

Kohlenstaubfeuerungen

Bericht, dem Reichskohlenrat erstattet im Auftrage
seines technisch-wirtschaftlichen Sachverständigen-
Ausschusses für Brennstoffverwendung

von

Hermann Bleibtreu

Oberingenieur der Wärmezweigstelle Saar
des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute in Saarbrücken

Herausgegeben vom Reichskohlenrat

Mit 66 Textabbildungen



Berlin

Verlag von Julius Springer

1922

ISBN-13:978-3-642-89127-4 e-ISBN-13:978-3-642-90983-2
DOI: 10.1007/978-3-642-90983-2

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

Copyright 1922 by Julius Springer in Berlin.
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1922

Vorwort des Sachverständigen-Ausschusses für Brennstoffverwendung.

Die Not unserer Zeit hat gelehrt, wie wichtig es ist, mit Brennstoffen hauszuhalten. Die Feuerungstechnik hat dadurch den Anreiz zu großen Fortschritten empfangen. Höchste Wirtschaftlichkeit im Verfeuern der Brennstoffe wird für Deutschland dauernd wichtig bleiben, auch wenn die eigentliche Kohlennot und die Absaugung der hochwertigen Sorten seitens der Entente vorüber sein werden, denn die Preise der Wärmeeinheit in ihren verschiedenen Formen sind sehr hoch, und die äußerste Beschränkung der industriellen Erzeugungskosten, also mit in erster Linie der Kosten der Energie, ist eine Lebensfrage für die deutsche Wirtschaft geworden.

Die Kohlenstaubfeuerung, seit langem aus der Zementindustrie bekannt, kann zweifellos diesen Zielen auch in anderen industriellen Öfen und unter den Dampfkesseln und für die verschiedenartigsten Brennstoffe erfolgreich dienen. Dementsprechend ist sie neuerdings stark in den Vordergrund des allgemeinen Interesses getreten. Unter diesen Umständen erachtete es der Technisch-wirtschaftliche Sachverständigen-Ausschuß für Brennstoffverwendung beim Reichskohlenrat für geboten, die Fragen, unter welchen Voraussetzungen und für welche Verwendungsgebiete diese Feuerungsart in ihrem heutigen Entwicklungsstand technisch und wirtschaftlich Erfolg verspricht, unbeeinflußt von Sonderinteressen zu prüfen. Er war sich dabei bewußt, daß eine solche Prüfung zur Zeit keineswegs zu abschließenden Ergebnissen auf der ganzen Linie führen könne, da sich die Entwicklung in lebhaftestem Flusse befindet.

Herr Oberingenieur Bleibtreu von der Wärmestelle des Vereins deutscher Eisenhüttenleute, Zweigstelle Saarbrücken, wurde mit der Berichterstattung betraut, weil er bis vor kurzem an der Entwicklung der Kohlenstaubfeuerung in den Vereinigten Staaten von Amerika praktisch mitgearbeitet hatte. Die Mitglieder des Sachverständigen-Ausschusses und eine große Reihe der deutschen Spezialfirmen auf diesem Gebiete haben ihn durch Vermittelung der

Geschäftsführung des Ausschusses ausgiebig mit ihren Erfahrungen und Kenntnissen unterstützt, wie er auch in den verschiedensten Betrieben, die Staubkohlenfeuerungen eingeführt haben, bereitwilligst zu Studien zugelassen wurde. Alle, die so an dem Entstehen dieses Berichts mitwirkten, haben sich ein Verdienst um die Allgemeinheit erworben, und es sei ihnen auch an dieser Stelle wärmster Dank dafür ausgesprochen!

Dieser Bericht soll kein „Werbebericht“ sein. Er soll dazu verhelfen, sich ein möglichst unbeeinflusstes Urteil zu bilden.

Der Technisch-wirtschaftliche Sachverständigenausschuß für Brennstoffverwendung beim Reichskohlenrat (Berlin W 62, Wichmannstr. 19) wird sich weiterhin mit der Frage der Kohlenstaubfeuerung befassen. Jede Anregung wird von ihm dankbar begrüßt werden.

Zum Schlusse ist es dem Ausschuß Bedürfnis, Herrn Oberingenieur Bleibtreu auch an dieser Stelle den verbindlichsten Dank für die mühevollen, neben seiner anstrengenden Berufstätigkeit ausgeübte Arbeit auszusprechen, die nötig war, um der Allgemeinheit diese Summe von Kenntnissen und langjährigen Erfahrungen zur Verfügung zu stellen.

Berlin, im Mai 1922.

Reichskohlenrat,
Technisch-wirtschaftlicher
Sachverständigen-Ausschuß
für Brennstoffverwendung
zur Nedden
Geschäftsführer.

Vorwort des Verfassers.

Bei dem großen Interesse, das der Staubfeuerungsfrage neuerdings auch in der deutschen Industrie entgegengebracht wird, schien eine eingehende Behandlung der Materie erwünscht. Gleichzeitig aber mußte eine umfassende, in sich geschlossene Darstellung von vornherein als verfrühtes Unterfangen angesehen werden; dazu ist die Kohlenstaubfeuerungsfrage noch zu sehr im Fluß und in ihren einzelnen Phasen und Zusammenhängen noch zu wenig überblickbar.

Dagegen schien im Hinblick auf den Meinungsstreit über Wert und Bedeutung dieses Feuerungsverfahrens eine etwas eingehendere Darstellung sowohl der grundlegenden Prinzipien, als auch der bereits vorliegenden Erfahrungen angebracht. Der Verfasser war daher bestrebt, unter Berücksichtigung der physikalischen Vorgänge auf die wichtigsten Gesichtspunkte bei der Aufbereitungs- und Verbrennungstechnik hinzuweisen, dabei noch zu klärende Fragen oder Verbesserungsmöglichkeiten hervorzuheben und bei Besprechung konstruktiver Ausbildungen nur das Wesentliche zu berücksichtigen unter Ausschaltung aller sachlich nicht bedingten Einzelheiten; dies schien um so wünschenswerter, als namentlich in letzter Zeit zahllose Konstruktionen auf den Markt kommen, die nichts wie Patentumgehungen darstellen und es dem Käufer erschweren, sich ein klares Urteil zu bilden. Auch auf verfehlte Konstruktionen mußte an einigen Stellen eingegangen werden, um vor Wiederholungen begangener, oft viele Jahre zurückliegender und daher in Vergessenheit geratener Irrtümer zu warnen.

Die Anwendungsgebiete wurden nur so weit berücksichtigt, als bei ihnen noch von einer Staubfeuerungsfrage die Rede sein kann. Auf die Staubfeuerungen in Zementfabriken einzugehen, schien sich daher zu erübrigen. Bei dem Vorsprung, den die Amerikaner besitzen, war es natürlich, daß in der vorliegenden Arbeit amerikanische Anlagen und Betriebsergebnisse einen großen Teil des Raumes in Anspruch nehmen; dies lag dem Verfasser um so näher, als er selber während einer mehrjährigen amerikanischen Tätigkeit Gelegenheit hatte, sich mit Kohlenstaubfeuerungsproblemen eingehend zu befassen, wertvolle Anregungen zu erhalten und Erfahrungsmaterial zu sammeln. Von den recht zahlreichen Veröffentlichungen in Zeitschriften wurden nur die zuverlässig erscheinenden verwertet. Dabei ließen sich Wiederholungen bereits auch in Deutschland bekannter, und vor allem in der Arbeit von Dr.-Ing. Bansen in „Stahl und Eisen“ enthaltener Angaben nicht vermeiden. Über Kessel kam vor Jahresfrist die vorzügliche und das Staubfeuerungsproblem zum ersten Male kritisch beleuchtende Arbeit von Dr. Münzinger heraus. Die vorliegende Schrift konnte sich bei dem Kapitel über ortsfeste Kessel daher auf die neueste Entwicklung beschränken. Vergleichende Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen gegenüber anderen Feuerungen wurden, soweit das möglich war, an verschiedenen Stellen eingeflochten.

Verfasser ist sich natürlich bewußt, keine lückenlose Arbeit geschaffen zu haben. Manches mag binnen kurzem veraltet und überholt sein; wenn die Arbeit dazu beitragen sollte, auf Verbesserungsmöglichkeiten hinzuweisen und die Anwendungsmöglichkeiten der

Staubfeuerungen sowie ihre Vorzüge und Nachteile schärfer zu erkennen, so ist ihr Hauptzweck erfüllt.

Zum Schluß möchte der Verfasser nicht versäumen, allen, die ihn bei dieser Arbeit mit Rat und Tat unterstützt haben — insbesondere dem Leiter der Wärmestelle Düsseldorf, Herrn Dr.-Ing. Rummel, sowie Herrn Oberingenieur Bulle — für das Interesse an der vorliegenden Schrift an dieser Stelle Dank zu sagen.

Saarbrücken, im Mai 1922.

H. Bleibtreu.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Einleitung	1
Erster Abschnitt.	
I. Theoretische und feuerungstechnische Grundlagen	3
a) Der Verbrennungsprozeß	3
1. Innere Vorgänge	3
2. Vergleich mit Rostfeuerungen	6
3. Vergleich mit Öl- und Gasfeuerungen	7
4. Zusammenfassung	7
b) Die Mahlfineinheit	8
1. Feinheitgrad	8
2. Normung	9
c) Die Zusammensetzung der Brennstoffe	10
1. Die flüchtigen Bestandteile	10
2. Feuchtigkeit	10
3. Aschegehalt	11
α) Aggregatzustände der Asche	12
β) Thermische Bedeutung der Asche	15
γ) Einfluß des Schwefels	16
δ) Zusammenfassung der Aschenfrage	17
II. Die Aufbereitung des Kohlenstaubes	17
a) Allgemeines	17
b) Vorbrechen und Schrotten	18
c) Trocknung	18
1. Allgemeines	18
2. Trommeltrockner mit Außen- und Innenbeheizung	19
3. Nach dem Gleichstromprinzip arbeitende Trommeltrockner	20
4. Senkrechte Trockenöfen der Bauart Ekelund	22
5. Wind-, Teller- und Röhrentrockner	22
6. Zusammenfassung	23
d) Mahlung	23
1. Vorbereitung	23
2. Mühlenarten	23
α) Schnellaufende Mühlen	23
β) Langsamlaufende Mühlen	28
3. Vergleich von schnell- und langsamlaufenden Mühlen	29
4. Kraftverbrauch und Mahlleistung der Mühlen	31
5. Siebung oder Windsichtung	32
e) Anordnung und Betrieb der Aufbereitungsanlage	33
1. Allgemeines	33
2. Entlüftung, Feuchtigkeit, Lagern	35
3. Explosionsgefahr	36

	Seite
f) Die Herstellungskosten von Kohlenstaub	37
1. Steinkohle	37
2. Braunkohle	39
α) Grubenaufbereitung	39
β) Werksaufbereitung	41
III. Die Beförderung und Verteilung des Kohlenstaubes	41
a) Allgemeines	41
b) Die mechanische Beförderung	42
c) Die pneumatische Beförderung	44
1. Das Niederdrucksystem	44
2. Das Hochdrucksystem	47
3. Das Emulsionssystem	48
d) Vergleich der Förderungssysteme	49
IV. Die konstruktiven Elemente der Feuerungen	50
a) Die Kohlenstaubspeisevorrichtungen	50
b) Die Brenner	54
1. Grundsätzliches	54
2. Konstruktionen	55
3. Leistung	57
4. Regelung	57
5. Betrieb	61
c) Die Verbrennungskammer	62
1. Flammenarten	62
2. Sekundärluftzuführung	63
α) Zentrale Zuführung	63
β) Verteilte Zuführung	64
3. Größe der Verbrennungskammer	64
4. Konstruktive Ausbildung der Verbrennungskammer	65
5. Ausmauerung	65
Zweiter Abschnitt.	
I. Staubfeuerungen in der Zement-, Kalk- und Glasindustrie und in chemischen Fabriken	66
II. Staubfeuerungen zur Roheisenerzeugung	66
a) Öfen zum Rösten von Spateisenstein	66
b) Öfen zum Agglomerieren von Erz- und Gichtstaub	67
c) Hochöfen	67
d) Koksöfen	68
III. Staubfeuerungen in Stahlwerken	68
a) Martinöfen	68
1. Konstruktion	68
2. Betrieb des Ofens	71
3. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	75
b) Einseitig gefeuerte Herdöfen	75
IV. Staubfeuerungen zur Schweißisenerzeugung	77
a) Puddelöfen	77
b) Schweiß- und Paketöfen	78
V. Staubfeuerungen in Walzwerken	79
a) Stoß- und Rollöfen	79
b) Wärmöfen (Schweiß- und Flammöfen)	81
c) Durchweichungsgruben und Tieföfen	82
VI. Staubfeuerungen in Blechwalzwerken	83
a) Blechwärm- und Doppelöfen	83

Inhaltsverzeichnis.

	IX Seite
b) Glühöfen	84
c) Verzinkungswannen	85
VII. Staubfeuerungen in Eisen- und Stahlgießereien	86
a) Kern- und Sandtrockenöfen	86
b) Gießereiofen (Herdschmelzöfen)	87
c) Glühöfen	89
VIII. Staubgefeuerte Schmiedeöfen	91
IX. Staubfeuerungen in Metallhütten	94
a) Röst- und Muffelöfen	94
b) Flammöfen	94
c) Schachtöfen	98
d) Spezialöfen	99
X. Abhitzeverwertung bei hüttenmännischen Staubfeuerungen	100
a) Allgemeines	100
b) Regenerativkammern	101
c) Abhitzekessel	101
d) Rekuperatoren	101
XI. Wirtschaftlichkeit der Staubfeuerungen in hüttenmännischen Öfen	102
a) Gegenüber Generatorgasfeuerung	103
1. Menge des Brennstoffes	103
2. Preis des Brennstoffes	106
3. Anlagekosten	106
4. Reparaturen	106
5. Löhne	106
6. Einfluß der Feuerung auf den Einsatz	107
7. Anpassungsfähigkeit an verschiedene Brennstoffe	107
8. Eignung für wechselweise Verwendung neben andern Feuerungsarten	107
b) Gegenüber Halbgasfeuerungen	110
c) Gegenüber Teerölfeuerungen	111
d) Zusammenfassung	111
Dritter Abschnitt.	
I. Staubfeuerungen unter ortsfesten Kesseln	112
a) Geschichtliches	112
b) Die Konstruktionen der Feuerungen	113
1. Größe der Verbrennungskammer	113
2. Form der Verbrennungskammer	115
3. Brenneranordnung	116
4. Sekundärluftzuführung	116
5. Schlackenführung	116
6. Ausführungen	116
c) Versuchsergebnisse	125
1. Kesselgattung	125
2. Wirkungsgrade	125
3. Kohlensäure und Luftüberschuß	128
4. Abgastemperaturen	128
5. Heizflächenbeanspruchung	129
6. Brennstoffe	129
7. Trocknung	129
8. Mahlfineinheit	129
9. Asche	129
10. Ausbesserungsarbeiten	130

	Seite
d) Verhalten der Staubfeuerung unter verschiedenen Betriebszuständen	131
1. Allgemeines	131
2. Vollast	131
3. Teillast	132
α) Wirkungsgrade	132
β) Regelung	132
4. Leerlauf, Anheizperioden	133
5. Zusammenfassung	134
e) Wirtschaftlicher Vergleich mit mechanischen Rostfeuerungen	135
1. Allgemeines	135
2. Menge und Art des Brennstoffes	135
3. Anlagekosten	135
4. Löhne	136
5. Reparaturen	137
6. Anpassungsfähigkeit an verschiedene Brennstoffe	137
7. Betriebssicherheit	137
8. Aussichten der Staubfeuerung bei verschiedenen Brennstoffen	137
α) Steinkohle	137
β) Schlammkohle und Braunkohle	137
γ) Gegenüber Braunkohlenbrikettfeuerung	138
f) Zusammenfassung	138
II. Staubfeuerungen auf Lokomotiven	140
a) Geschichtliches	140
b) Die Ausführungen von Staubfeuerungen auf Lokomotiven	141
c) Versuche und Betriebsergebnisse mit Staubfeuerungen auf Lokomotiven	146
1. Versuche der Delaware & Hudson Railroad	146
2. Versuche der Chicago & North Western Railway	146
3. Versuche der Atchison, Topeka u. Santa Fé Railroad	150
4. Versuche der Schwedischen Staatsbahnen	152
d) Bewertung der Staubfeuerung für Lokomotiven	154
1. Brennstoffersparnis gegenüber Rostbetrieb	154
2. Regelbarkeit	155
3. Überlastbarkeit	156
4. Rauchlosigkeit	156
5. Reparaturen	157
6. Konstruktion	157
7. Zusammenfassung	158
e) Verwendungsmöglichkeiten der Staubfeuerung auf Lokomotiven in Deutschland	158
III. Staubfeuerungen auf Schiffen	159
Schluß.	
Bedeutung der Staubfeuerung für die deutsche Brennstoffwirtschaft	160
a) Brennstoffe	160
1. Koks	160
2. Halbkoks	161
3. Anthrazit	163
4. Steinkohlen	164
5. Braunkohlen	164
6. Torf	165
b) Verwendungszweck	165
c) Forderungen	165
Sachverzeichnis	167

Einleitung.

Die Versorgung der deutschen Industrie mit Brennstoffen hat sich zu einem außerordentlich schwierigen Problem gestaltet, von dessen Lösung die zukünftige Entwicklung unseres Wirtschaftslebens in weitgehendem Maße abhängig sein wird. Es gilt, Feuerungs- und Verbrennungsmethoden so auszubilden, daß sie nicht nur den Übergang zu minderwertigen, bisher gar nicht oder nur in beschränktem Maße verwendbaren Brennstoffen gestatten, sondern auch allgemein eine größere wirtschaftliche Ausbeute der in der Kohle enthaltenen Wärmeenergie ermöglichen.

Beiden Aufgaben sucht das Kohlenstaubfeuerungsverfahren gerecht zu werden. Der Gedanke, staubförmige oder pulverisierte Kohle zu verbrennen, ist keineswegs neu. In der amerikanischen Zementindustrie hat sich die Kohlenstaubfeuerung bei Drehöfen seit dem Jahre 1895 allgemein eingebürgert und hat auch in der europäischen Zementpraxis vielfache Anwendung gefunden. Wenn sich die Kohlenstaubfeuerung jedoch bis vor kurzem im wesentlichen auf Zementfabriken beschränkte, so liegt das daran, daß die für dieses Feuerungsverfahren nötige Mahlung und Trocknung der Zementindustrie geläufige Vorgänge waren, während sie für andere Industriezweige aus dem Rahmen ihrer Fabrikationsmethoden fielen und die Angliederung eines neuen Arbeitsprozesses bedeuteten; dazu kommt noch, daß die Kohlenstaubfeuerung im Zementdrehofen so ideale Vorbedingungen findet, wie sie in anderen Industriezweigen kaum zu gewärtigen sind¹⁾. Erst in den letzten 7 Jahren hat die Kohlenstaubfeuerung in Amerika auch außerhalb der Zementindustrie Bedeutung gewonnen und sich nicht nur in hüttenmännischen Feuerungen, sondern auch unter Dampfkesseln und auf Lokomotiven Eingang verschafft. Den Anstoß zu dieser Entwicklung gab vor allem der Wunsch, sich von dem in Amerika vielfach angewandten, aber immer teurer werdenden Erdöl unabhängig zu machen und dieses

¹⁾ Journal of the Am. Soc. of Mech. Engineers, Okt. 1914, Seite 339.
„Glück auf“ 30. April 1921, Seite 413.

durch einen billigeren aber in betriebstechnischer Hinsicht ähnlichen Brennstoff, den Kohlenstaub, zu ersetzen.

In den Vereinigten Staaten werden gegenwärtig schätzungsweise etwa 15 Millionen Tonnen Kohle jährlich in Staubfeuerungen verheizt; davon dürften etwa 60⁰/₀ auf die Zementindustrie und rund 30⁰/₀ auf die Hüttenindustrie entfallen, während der Rest unter ortsfesten Kesseln und auf Lokomotiven verfeuert wird. Bei einer Gesamtförderung von etwa 600 Millionen Tonnen jährlich beträgt die als Kohlenstaub verarbeitete Kohlenmenge nur 2,5⁰/₀; sie ist also verhältnismäßig gering und zeigt, daß die Kohlenstaubfeuerung auch in Amerika noch nicht die Verbreitung gefunden hat, wie scheinbar vielfach in Deutschland angenommen wird. Immerhin sind mit Rücksicht auf die kurze Entwicklungszeit die erzielten Resultate derart, daß sie die Beachtung der deutschen Industrie verdienen und es angebracht erscheinen lassen, die Anwendungsmöglichkeiten dieses Feuerungsverfahrens in Deutschland eingehender zu untersuchen.

Erster Abschnitt.

I. Theoretische und feuerungstechnische Grundlagen.

a) Der Verbrennungsprozeß¹⁾.

1. Innere Vorgänge. Das Kohlenstaubfeuerungsverfahren besteht, kurz gesagt, darin, daß zu feinem Mehl gemahlene Kohle im Luftstrom in eine hochoverhitzte Verbrennungskammer geblasen und dort zur Entzündung gebracht wird; die letztere wird beim Anheizen durch ein unter den Brenner gelegtes Lockfeuer oder durch Vorwärmung der Verbrennungskammer durch ein Gas-, Kohle- oder Koksfeuer eingeleitet und alsdann durch die in der Verbrennungskammer aufgespeicherte Wärme selbsttätig unterhalten.

Im einzelnen geht die Verbrennung so vor sich, daß der mit Luft innig vermengte Kohlenstaub sofort nach Eintritt in die heiße Verbrennungskammer so stark erwärmt wird, daß die flüchtigen Bestandteile ausgetrieben werden und den Zustand von Gasen annehmen; diese verbrennen unter dem Einfluß der Diffusion mit der umgebenden Luft zu Kohlensäure und Wasserdampf. Vorbedingung ist also eine heiße Verbrennungskammer, um die Entgasung der Kohle durchführen zu können, während für die Entzündung der einmal befreiten flüchtigen Bestandteile ihre Berührung mit der Flamme oder die Rückstrahlung der letzteren genügen würde. Die Befreiung und Verbrennung der flüchtigen Bestandteile stellt die erste Phase des Verbrennungsprozesses dar und entspricht daher der Verbrennung eines Gases.

Die zweite Phase betrifft die verkokten Bestandteile. Sie wird dadurch eingeleitet, daß die bei der Verbrennung der Gase frei werdende Wärme im Verein mit den hochoverhitzten Kammerwänden die in der Schwebelage befindlichen entgasten Kohlenstaubteilchen schnell entzündet. Inwieweit der Wärmeaustausch zwischen Kohlenstaubflamme bzw. Gemisch einerseits und den Kammerwänden

¹⁾ Der Vollständigkeit halber seien hier die auf amerikanischen Lokomotiven häufig angewandten selbsttätigen Kohlenbeschickungen und die in „Braunkohle“ Nr. 12 vom 21. Juni 1919 beschriebene Trommelfeuerung erwähnt; obwohl in beiden Fällen staubförmige, aber nicht feingemahlene Kohle verbrannt wird, können diese Feuerungen nicht als Kohlenstaubfeuerungen im obigen Sinne angesprochen werden und wären daher zweckmäßig zur Unterscheidung als Staubkohlenfeuerungen zu bezeichnen.

andererseits in der Form von Strahlung, Leitung oder Berührung stattfindet, ist noch nicht einwandfrei festgestellt worden. Es ist jedoch anzunehmen, daß, wie noch gezeigt werden soll, von allen drei Formen die der Strahlung für die Zündung der verkokten Bestandteile die größte Bedeutung hat und beim Bau der Verbrennungskammern zu erstreben ist.

Die Zündung der entgasten Kohlenstaubpartikel erfolgt um so schneller, je intensiver die Wärmeübertragung auf jedes Staubteilchen ist, je niedriger sein Entzündungspunkt und seine spezifische Wärme sind, und je besser jedes Staubteilchen für die Aufnahme der Wärme und des Sauerstoffes aufgeschlossen ist, d. h. je größer sein Verhältnis von Oberfläche zu Volumen oder die Mahlfeinheit ist. Von welcher Bedeutung die Mahlung für die Aufschließung der Teilchen ist, geht aus folgender Rechnung hervor: Nimmt man an, daß bei der üblichen Mahlfeinheit die durchschnittliche Größe eines Kohlenstaubteilchens ein Würfel von 0,02 mm ist, so würden 3400 Millionen solcher Staubwürfel das Volumen eines Würfels von 3 cm Kantenlänge besitzen; während der letztere nur 54 qcm zur Aufnahme oder Abgabe von Wärme bietet, beträgt die für diesen Zweck zur Verfügung stehende Oberfläche der Staubteilchen 82000 qcm oder etwa 1500 mal soviel.

Die Verbrennung der entgasten, auf ihre Entzündungstemperatur gebrachten, schwebenden Kohlenstaubpartikel erfolgt nach den Gesetzen der Verbrennung fester Körper¹⁾. Ein ungefähres Bild kann man sich machen, wenn man bedenkt, daß zur vollständigen Verbrennung von 1 cbm reinem Koks etwa 14000 cbm Luft von 0° C und 760 mm Barometerstand nötig sind. Da es sich hier nur um eine prinzipielle Betrachtung handelt, nehmen wir der Einfachheit halber an, daß die entgasten Kohlenstaubteilchen aus reinem Koks bestehen und kugelförmige Gestalt besitzen. Man könnte sich dann ein derartiges Teilchen in einer kugelförmigen Lufthülle von 14000 fachem Volumen, oder was dasselbe ist, von 24 fachem Durchmesser befindlich denken. Aus dieser Lufthülle muß das Kohlenstaubteilchen seinen Sauerstoffbedarf entnehmen und dafür eine ebensogroße Volumenmenge Kohlenäure abgeben, sodaß unter Annahme reinen Kohlenstoffs am Ende der Verbrennung statt der Lufthülle eine ebenso große Stickstoff-Kohlenäurehülle vorhanden ist. Diese Betrachtung gilt allgemein, gleichgültig ob das Kohlenstaubteilchen 1 mm Durchmesser hat oder die Größe eines Moleküls besitzt. Es besteht nur ein Unterschied: Während bei molekularer Kleinheit des Kohlenstäubchens ein gasähnlicher Zustand erreicht ist und wir uns jedes Kohlenstoffmolekül

¹⁾ Siehe Z. d. V. D. I. 1917, Seite 266; ferner Sonderabdruck der Hauptstelle für Wärmewirtschaft: „Brennstoff und Verbrennung“.

bereits in seiner zur Verbrennung nötigen Lufthülle schwebend vorstellen können, müssen, wenn wir an dem Bild der kugelförmigen Lufthülle festhalten, bei einem Kohlenstaubteilchen von 1 mm Durchmesser die Kohlenstoffmoleküle ihren Sauerstoff durch die entstehende Kohlensäure hindurch aus einer Lufthülle von 24 mm Durchmesser heranziehen. Offensichtlich kommen die Moleküle eines Kohlenstaubteilchens um so leichter zu ihrem Sauerstoff, je feiner die Mahlung und je besser die Durchmischung mit der Verbrennungsluft ist. Ideale Verhältnisse wären erreicht, wenn man die Zerkleinerung bis zur Molekulargröße treiben und damit einen gasähnlichen Zustand erreichen könnte. Die Frage taucht auf, wie weit man sich diesem Zustande in der Praxis nähern kann. Bei der heute üblichen Mahlfineinheit von 8 bis 15⁰/₁₀₀ Rückstand auf einem 4900er Sieb dürfte der mittlere Durchmesser schätzungsweise 0,02 mm betragen. Die umgebende kugelförmige Lufthülle hätte dann einen Durchmesser von $0,02 \times 24 = 0,48$ mm; das wäre aber das 3 400 000-fache des Durchmessers eines Luftmoleküls!¹⁾

Daraus ist ersichtlich, wie weit man von einer molekularen Angliederung der Kohlenstoff- und Sauerstoffmoleküle oder dem gasförmigen Zustande entfernt ist und daß es technisch unmöglich erscheint, diesen Zustand bei Kohlenstaub auch nur annähernd durch noch so feine Mahlung zu erreichen. Man sollte daher die Tatsache nicht aus dem Auge verlieren, daß die Kohlenstaubfeuerung ihrem Wesen nach der Verfeuerung fester Brennstoffe auf Rosten sehr viel näher steht als der Gasfeuerung, wenn sie mit dieser auch äußerlich viel Ähnlichkeit besitzen mag. Im Gegensatz zu Gasen, bei denen bekanntlich infolge der Diffusion mit dem Luftsauerstoff die Vorbedingung für molekulare Durchmischung in sehr kleinen Zeiträumen erfüllt wird, kann das entgaste Kohlenstoffteilchen nur so schnell abbrennen, wie ihm der nötige Sauerstoff zuteil wird. Es handelt sich also nicht um eine momentane Verbrennung wie bei der ersten Phase. Daraus erhellt, weshalb das kennzeichnende Erfordernis der Kohlenstaubfeuerung, nämlich die festen brennbaren Bestandteile lang genug in der Verbrennungskammer in der Schwebe zu halten, um eine vollkommene Verbrennung zu erreichen, nicht immer leicht zu erfüllen und vielfach nicht richtig erkannt worden ist²⁾. Allerdings werden sich in Wirklichkeit die Verhältnisse insofern günstiger gestalten als die Annahme kugelförmiger Lufthüllen vermuten läßt, daß durch Ausdehnung von

¹⁾ Landolt-Börnstein, Physikalisch-chemische Tabellen, Seite 380, geben den Durchmesser eines Luftmoleküls mit $\sigma = 14 \times 10^{-9}$ cm an.

²⁾ „Power“ 10. Mai 1921, S. 745 f.

Luft und Kohlensäure infolge Erhitzung oder vielleicht auch durch den aus der Feuchtigkeit der Kohle und der Verbrennungsluft herührenden Wasserdampf eine lebhafte Durchmischung stattfindet. Diese kann ferner durch geeignete Brenneranordnung und zweckmäßige Einführung der Zusatz- oder Beiluft (Sekundärluft) in die Verbrennungskammer wirksam verbessert werden.

Die Zündung und Verbrennung erfolgt nach obigem um so schneller, je höher der Gehalt an brennbaren flüchtigen Bestandteilen oder je feiner die Mahlung ist. Man wird daher bei Kohlen mit hohem Gasgehalt weniger fein zu mahlen brauchen als bei Brennstoffen mit hohem Koksrückstand. Je schneller die Verbrennung, desto kleiner ist der von jedem Kohlenstaubteilchen zurückgelegte Weg, auf welchem der Umsatz in Wärmeenergie stattfindet, desto höher sind daher die Temperaturen und um so kürzer wird die Flamme.

2. Vergleich mit Rostfeuerungen. Die Kohlenstaubfeuerung zeichnet sich vor der Verbrennung fester Brennstoffe auf Rosten infolge der besseren Aufschließung durch schnellere Verbrennung, geringeren Luftüberschuß und höhere Flammentemperaturen aus und erscheint daher vom thermischen Standpunkt aus betrachtet als eine erstrebenswerte Form der Verbrennung fester Körper. Bei Kohlenstaubfeuerungen lassen sich Flammentemperaturen von 80% der theoretischen Höchsttemperatur erzielen. Das Verhältnis von wirklicher zu theoretischer Temperatur wird unter sonst gleichen Umständen um so größer sein, je höher der Gehalt und Heizwert der flüchtigen Bestandteile ist, und um so niedriger werden, je größer der im Kohlenstaub enthaltene Koksrückstand oder Aschebestandteil ist. Allgemein wird bei Brennstoffen, wie Koks und Anthrazit, oder bei Kohlen mit hohem Asche- und Feuchtigkeitsgehalt das Verhältnis von wirklicher zu theoretischer Flammentemperatur niedriger sein als bei Gaskohlen mit niedrigem Asche- und Feuchtigkeitsgehalt. Bei einer theoretischen Verbrennungstemperatur der Steinkohle von 2200°C lassen sich mit Kohlenstaubfeuerungen in der Praxis Temperaturen von $1600\text{--}1800^{\circ}$ ohne, und von etwa $2000\text{--}2200^{\circ}$ mit Luftvorwärmung erreichen, während die gleiche Kohle bei Rostfeuerung etwa $1400\text{--}1550^{\circ}$ ergeben würde¹⁾. Die feine Aufschließung des Brennstoffes zu Staub hat zur Folge, daß die Aschebestandteile die Verbrennung nicht in dem Maße erschweren können, wie bei Rostfeuerungen. Die Kohlenstaubfeuerung eignet sich daher zur Verwertung mancher aschereicher Kohlen. Sie ermöglicht ferner die Verbrennung feinkörniger und deshalb für Roste ungeeigneter Brennstoffe. Kohlen mit einem hohen

¹⁾ „Iron Age“ 19. August 1920, S. 459.

Gehalt an flüchtigen Bestandteilen lassen sich auf Rosten vielfach nicht verfeuern, ohne daß ein Teil der entwickelten Gase unverbrannt zum Schornstein entweicht, während es in der Natur der Kohlenstaubfeuerung liegt, daß sie sich gerade für solche Brennstoffe besonders eignet.

3. Vergleich mit Öl- und Gasfeuerungen. Legt man an ein Kohlenstaubluftegemisch den Maßstab der WE pro Kubikmeter, so ist es als ein reicher hochwertiger Brennstoff zu bezeichnen. Dies kann an einem Vergleich eines Kohlenstaubluftegemisches normaler Steinkohle mit verschiedenen Öl- bzw. Gasluftegemischen gezeigt werden; in allen Fällen sei die theoretisch erforderliche Luftmenge angenommen¹⁾:

Kohlenstaub	. 850—950 WE	pro Kubikmeter			
Heizöl 720	"	"	"	"
Leuchtgas 740	"	"	"	"
Wassergas 730	"	"	"	"
Generatorgas 550	"	"	"	"
Gichtgas 500	"	"	"	"

Die Kohlenstaubfeuerung besitzt die leichte Regelbarkeit von Gas- und Ölfeuerungen und gestattet wie diese, daß man die Flamme lenken und an der gewünschten Stelle zur Auswirkung bringen kann.

4. Zusammenfassung. Die Verbrennung von Kohlenstaub in der Schwebelagerung steht ihrem Wesen nach der Verbrennung fester Körper auf Rosten, ihrer Form nach der Verbrennung von Ölen und Gasen an Brennern näher.

Aus den obigen Betrachtungen lassen sich die folgenden thermischen Vorteile ableiten:

1. eine annähernd vollkommene Verbrennung bei geringem Luftüberschuß;
2. hohe Flammentemperaturen;
3. die Möglichkeit, minderwertige, d. h. aschereiche oder feinkörnige Brennstoffe, oder solche mit einem hohen Gehalt an flüchtigen Bestandteilen wirtschaftlich verfeuern zu können;
4. die Möglichkeit, die Verbrennung durch Regelung von Luft und Brennstoff weitgehend zu meistern und bald oxydierend, bald reduzierend arbeiten zu können;
5. Lenkbarkeit der Flamme.

Zu diesen Vorteilen gesellen sich noch einige mehr betriebstechnischer Art, wie der Fortfall von Arbeitskräften und die Mechanisierung der Feuerung; hierüber soll noch später eingehender gesprochen werden.

¹⁾ „Glück auf“ 30. April 1921, S. 416.

Den Vorteilen stehen aber auch entschiedene Nachteile gegenüber, die weniger thermischer als betriebstechnischer Natur sind und vorläufig nur kurz angedeutet seien:

1. Notwendigkeit der Trocknung und Mahlung;
2. Schlacken- und Ascheschäden.

b) Die Mahlfeinheit.

1. **Feinheitsgrad.** Nachdem der Einfluß der Mahlfeinheit auf den Verbrennungsvorgang festgestellt worden ist, wäre die Frage zu beantworten, wie weit man mit der Mahlfeinheit zweckmäßig gehen soll. Je weiter die Zerkleinerung getrieben wird, um so idealer sind die Vorbedingungen für einen hohen Wirkungsgrad der Verbrennung. Natürlich aber steigt mit der Feinheit der Kraftbedarf für die Mahlung bei gleicher Mühlenleistung, während bei gleichbleibendem Kraftverbrauch die Mühlenleistung sinkt¹⁾. Bei einer von der Firma Fellner & Ziegler vorgenommenen Untersuchung einer Verbundmühle stellte sich beispielsweise heraus, daß bei Übergang von 13⁰/₀ auf 3⁰/₀ Rückstand auf einem Sieb von 4900 Maschen pro Quadratcentimeter die Mahlmenge pro Zeiteinheit auf $\frac{1}{3}$ herabsank. Man muß daher ein Kompromiß zwischen thermischen und wirtschaftlichen Überlegungen schließen, und hätte die flüchtigen Bestandteile, die Flammentemperatur, die Asche und Flammenlänge einerseits, die Mahlkosten andererseits als maßgebende Faktoren zu berücksichtigen. Es lassen sich daher keine allgemeinen Regeln über den Grad der Mahlfeinheit aufstellen. Dieser wird vielmehr mit der Art des Brennstoffes, dem Zweck der Feuerungsanlage und der Wirtschaftlichkeit der Aufbereitungsanlage schwanken.

Die einzige, bisher praktisch brauchbare Methode zur Messung der Mahlfeinheit ist die Siebung. Man läßt den Kohlenstaub durch engmaschige Siebe fallen und wiegt den Rückstand. Tafel 1 zeigt für die in Amerika gebräuchlichen Siebe die Maschenzahl pro Quadratzoll und pro Quadratcentimeter, den Drahtdurchmesser sowie die lichte Weite der quadratischen Öffnungen in Zoll und Millimeter.

In Deutschland sind Siebe mit 4900 Maschen pro Quadratcentimeter (4900er Sieb), in Amerika solche mit 6200 Maschen pro Quadratcentimeter (6200er Sieb, 200 Maschen pro 1 Zoll) üblich. Als Durchschnittswerte in der Zementpraxis werden 8 bis 15⁰/₀ Rückstand auf einem 4900er Sieb bzw. 10 bis 20⁰/₀ Rückstand auf einem 6200er genannt. Größere Feinheit bringt bei Zementdrehöfen mit ihren langen Flammen keinerlei Gewinn ein. Auch für hüttenmännische und Kesselfeuerungszwecke hat man in Amerika diese Feinheit vor-

¹⁾ Herington, Powdered coal as a fuel, New York 1920, S. 26 f.

läufig als Norm angenommen; man wird aber von ihr abgehen und sie durch differenziertere Normen ersetzen, sobald größere Klarheit und Übereinstimmung in den Ansichten über den zweckmäßigen Grad der Feinheit bei verschiedenen Kohlsorten und Betriebsverhältnissen erzielt worden sein wird. Jedenfalls ist man bestrebt, mit geringerer Mahlfeinheit auszukommen. Daß dies möglich sein kann, zeigen die Versuche 4, 7 und 8 der Tafel 10, bei denen Steinkohle mit einem Rückstand von 30% auf einem 6200er Sieb anstandslos und ohne einen merklichen Abfall des Wirkungsgrades verfeuert wurde.

2. Normung. Die Feststellung der Mahlfeinheit durch Siebe ist in der Weise, wie sie heute angewandt wird, mangelhaft, weil sie über die Größenordnung der durch das Sieb fallenden Teile keine Auskunft gibt. Ausgesiebter Kohlenstaub zeigt unter dem Mikroskop Teilchen von sehr verschiedener Größe. Den wirklichen Verhältnissen käme man näher, wenn man eine bestimmte Menge von Staub durch eine größere Anzahl von Sieben zunehmender Maschenfeinheit gehen ließe und jedesmal den Siebrückstand messen würde. Ein Maß für die Feinheit erhielte man dann, wenn man die Siebrückstände entweder durch die zugehörige Maschenweite dividieren oder mit der zugehörigen Maschenanzahl pro Quadratcentimeter multiplizieren und aus den so erhaltenen Werten die Summe bilden würde. Die Feinheit wäre also $= \text{Konstante} \times \Sigma (\text{Rückstand} \times \text{Maschen pro Quadratcentimeter})$, worin die Konstante willkürlich ist und nach Übereinkunft festzulegen wäre. Ferner müßte über die Art, wie der Staub durch das Sieb geschüttelt wird, ein Übereinkommen etwa durch Festsetzung von Zeit und Anzahl der Schüttelbewegungen getroffen werden, um brauchbare Vergleichswerte zu erhalten. Es wäre daher wünschenswert, wenn die Physikalisch-technische Reichsanstalt oder ein von den Ingenieurvereinen einzusetzender Ausschuß veranlaßt würde, Methoden und Normen zur Messung der Mahlfeinheit in der angedeuteten Richtung auszuarbeiten.

Zahlentafel 1.

Maschenzahl pro Quadratzoll	Maschenzahl pro cm ² abgerundet	Durchmesser des Drahtes in engl. Zoll	Durchmesser des Drahtes in mm	Maschen- öffnung in engl. Zoll	Maschen- öffnung in mm
10 × 10	15,2	0,035	0,89	0,065	1,651
20 × 20	62,0	0,016	0,41	0,034	0,864
50 × 50	388	0,009	0,23	0,011	0,279
100 × 100	1550	0,0045	0,114	0,0055	0,140
150 × 150	3488	0,0026	0,066	0,0041	0,104
200 × 200	6200	0,0021	0,053	0,0029	0,074
250 × 250	9687	0,0016	0,041	0,0024	0,061
300 × 300	13950	0,0015	0,038	0,0018	0,046
350 × 350	18988	0,0012	0,030	0,0016	0,042

c) Die Zusammensetzung der Brennstoffe.

1. Die flüchtigen Bestandteile. Während man noch vor etwa 5 Jahren einen Gehalt von 30 bis 35 % „flüchtiger Bestandteile“ für einen erfolgreichen Betrieb erforderlich fand und noch gegenwärtig vielfach für wünschenswert hält, lassen sich doch so gut wie alle festen Brennstoffe mit flüchtigen Bestandteilen bis herab zu wenigen Prozenten bei feiner Mahlung und hohen Temperaturen verarbeiten.

Die brennbaren flüchtigen Bestandteile werden als Kohlenwasserstoffe ausgetrieben, deren Struktur von dem Brennstoff und der Temperatur abhängt, bei der sie entstehen. Die Menge der flüchtigen Bestandteile, auf die in der Literatur bei Beurteilung eines Brennstoffes für Kohlenstaubfeuerung in erster Linie hingewiesen wird, ist deshalb kein völlig richtiger Maßstab, weil er über Zusammensetzung und Heizwert keine Auskunft gibt.

Die flüchtigen Bestandteile dienen, wie oben beschrieben, als Zündmittel des Koksrückstandes. Daraus folgt, daß man unbeschadet sicherer Zündung mit dem Gasgehalt um so weiter heruntergehen kann, je höher die Verbrennungskammertemperaturen steigen. Ferner kann man bei großen hüttenmännischen Öfen und Dampfkesseln wegen der größeren Wärmespeicherfähigkeit ihrer Verbrennungskammern mit gasärmeren Brennstoffen auskommen als bei kleinen und mit Unterbrechungen arbeitenden Feuerungen, wie sie bei Kleinschmiedeöfen oder Glühöfen vorkommen, bei denen man zwecks sicherer Zündung nicht unter 20 % flüchtige Bestandteile gehen sollte¹⁾.

2. Feuchtigkeit. Ein Teil der Feuchtigkeit ist gebunden und wird als „unfühlbare“ oder „hygroskopische“ Feuchtigkeit bezeichnet. Sie kann nur durch Erhitzung des Brennstoffes über den Siedepunkt von Wasser oder 100 °C ausgetrieben werden. Zum Unterschied von der hygroskopischen Feuchtigkeit kann die „grobe“ oder „fühlbare“ Feuchtigkeit durch Trocknen an der Luft oder durch Verdunsten unter 100 °C beseitigt werden. In dem Maße, wie man die hygroskopische Feuchtigkeit austreibt, wird die Kohle hygroskopisch; sie wird daher nach erfolgter Abkühlung so viel Wasser aus der Luft anziehen, daß sie den ihr eigenen hygroskopischen Feuchtigkeitsgehalt wieder erlangt. Offenbar läßt sich für diesen kein scharf begrenzter Zahlenwert angeben, da gewisse Kohlebestandteile²⁾ früher hygrosko-

¹⁾ Iron Age, 19. Aug. 1920, S. 459. Siehe Seite 146.

²⁾ Dies gilt vor allem von gewissen Salzen (Kochsalz); diese gehen bei der Wäsche zum Teil in den Kohlenschlamm über.

pisch werden wie andere¹⁾. Die meisten Brennstoffe enthalten in ihrem natürlichen Zustande zu viel fühlbare Feuchtigkeit, um ohne übermäßigen Kraftaufwand fein vermahlen werden zu können. Um Schmieren und Anhaften an den Mahlwerkzeugen zu vermeiden, hat der Mahlung gewöhnlich eine teilweise Austreibung des Wassers durch Trocknung vorauszugehen. Ein weiterer Grund zur Trocknung liegt vor, wenn der gemahlene Brennstoff Neigung zum Anhaften und zur Brückenbildung in den Vorratsbehältern zeigt und sich dadurch nur unregelmäßig und stoßweise dem Brenner zuführen läßt²⁾. Von der fühlbaren Feuchtigkeit ist umsomehr zu entfernen, je feiner die Mahlung ist, mindestens aber soviel, daß die erforderliche Leichtflüssigkeit des Staubes erreicht wird. Bei schneller Abkühlung und mangelnder Entlüftung nach dem Mahlen oder längeren Lagerzeiten und schroffen Temperaturstürzen des Klimas zwingt der aus der zwischengelagerten Luft niedergeschlagene Wasserdampf häufig dazu, daß man nicht nur die gesamte fühlbare, sondern auch einen Teil der hygroskopischen Feuchtigkeit austreibt. Ein der letzteren gleicher Betrag Wasserdampf kann dann nachträglich vom Staub als unfühlbare Feuchtigkeit absorbiert werden. Bei sofortiger Verfeuerung des gemahlene Staubes kann man bei Steinkohle zuweilen ohne Trocknung auskommen.

Die Trocknung darf nicht so weit getrieben werden, daß der Brennstoff einen wesentlichen Verlust an flüchtigen Bestandteilen erleidet. Bei Koks und Anthrazit trocknet man in der Regel auf $\frac{1}{2}$ bis 3⁰/₁₀ Feuchtigkeit, bei Steinkohle je nach Art dieses Brennstoffes, der Mühle und des Verwendungszweckes auf $\frac{1}{2}$ bis 4⁰/₁₀ Feuchtigkeit, während sich Braunkohle noch bei 6 bis 20⁰/₁₀ genügend fein vermahlen läßt und nie unter 5⁰/₁₀ getrocknet werden sollte, damit kein zu großer Verlust an flüchtigen Bestandteilen und keine Selbstentzündung stattfindet.

Für den Verbrennungsvorgang selbst ist zwar im Interesse hoher Flammentemperaturen möglichst wenig Wassergehalt erwünscht. Trotzdem ist die Trocknung für die Verbrennung nur von untergeordneter Bedeutung, weil die mit der natürlichen Feuchtigkeit der Verbrennungsluft eingeführte Wassermenge die vom Brennstoff herrührende Feuchtigkeit meist um ein Vielfaches übersteigt.

3. Aschegehalt. Unter Aschegehalt seien alle mineralischen, nicht brennbaren Bestandteile wie Tonerde, Kieselsäure, Eisenoxyde

¹⁾ Dr. Aufhäuser gibt in „Vorlesungen über Brennstoffkunde“ (Hamburg 1910) den hygroskopischen Wassergehalt folgendermassen an:

Braunkohle . . .	20—30 ⁰ / ₁₀ Wasser	Englische Kohle . . .	1—3 ⁰ / ₁₀ Wasser
Ruhrkohle . . .	1—2 ⁰ / ₁₀ „	Schottische „ . . .	6—12 ⁰ / ₁₀ „

²⁾ Journal of the Am. Soc. of Mech. Engineers, Okt. 1914, S. 360.

Kalk, Magnesia, Kochsalz und Schwefel zusammengefaßt, die entweder aus der Pflanzenfaser mit in die Kohle übergegangen oder als Ton, Schiefer oder Sand zwischen der Kohle eingelagert sind. Der Schwefel ist teils als Sulfid (Schwefelkies), teils als Sulfat und außerdem in organischen Verbindungen in der Kohle vorhanden. Die meisten mineralischen Bestandteile sind härter als die Kohle; die Mahlung aschereicher Kohle wird daher durch größeren Kraftbedarf und erhöhten Mühlenverschleiß teurer. Der etwas verwickelte Einfluß der Asche sei im folgenden unter verschiedenen Gesichtspunkten betrachtet.

a. Aggregatzustände der Asche. Asche tritt in Kohlenstaubfeuerungen in zwei Formen auf: als Staub- oder Flugasche und als Schlacke.

Staub- oder Flugasche liegt vor, wenn die Ascheteilchen in der Flamme in festem Aggregatzustande verharren, d. h. wenn der Schmelzpunkt der Asche über der Flammentemperatur liegt. Fallen die Ascheteilchen aus der Flamme, so sammeln sie sich am Boden der Verbrennungskammer an und können leicht durch gelegentliche Reinigung entfernt werden. Der größere Teil der Ascheteilchen wird in der Regel mit den Verbrennungsgasen fortgerissen und fängt sich entweder in den Rauchzügen der Feuerung, oder fliegt als feiner Staub durch den Schornstein in die äußere Atmosphäre. Bei Schmiedeofen für Preßstahl kann Flugasche dadurch störend wirken, daß sie mit dem Werkstück in die Preßwerkzeuge gelangt und diese angreift. Bei Kleinschmiedeofen kann Flugasche für die Arbeiter sehr lästig sein, wenn nicht für Absaugvorrichtungen gesorgt wird. Staub- und Flugasche gibt zuweilen auch dadurch zu Klagen Anlaß, daß sie sich in dem Gitterwerk der Kammern von Herdschmelzöfen oder in den Feuerungszügen von Kesseln festsetzt. Dieser Übelstand kann durch geeignete Ausbildung des Gitterwerkes und der Staubtaschen bei Herdschmelzöfen¹⁾ und durch Staubbläser bei Dampfkesseln gemildert werden. Die Tatsache, daß in vielen Fällen nicht unbeträchtliche Mengen Flugstaub durch den Schornstein nach außen gelangen, scheint zwar auf den ersten Blick hygienisch nicht einwandfrei, wird aber in Wirklichkeit in ihren nachteiligen Folgen dadurch abgeschwächt, daß der Flugstaub vermöge seiner Feinheit lange in der Schwebe bleibt und sich in den höheren Luftschichten auf weite Flächen verteilt²⁾. Flugstaub dürfte ein geringeres Übel sein als der bei Rost- und Halbgasfeuerungen entstehende Ruß und Rauch. Durch den Einbau von Staubabscheidern zwischen Ofen und Schornstein kann man der Staubplage wirksam begegnen³⁾.

¹⁾ Siehe Seite 70. ²⁾ „Power“, 10. Mai 1921, S. 745 f. ³⁾ Siehe Seite 130.

Schlacke liegt vor, wenn der Schmelzpunkt der Asche unter der Flammentemperatur liegt. Man kann dann drei Fälle unterscheiden:

A. Die einzelnen oder zu Tropfen vereinten flüssigen Staubteilchen erstarren, nachdem sie die Flamme verlassen haben und während sie sich noch im Fluge befinden. Je nach dem Grad der Tropfenbildung oder Agglomerierung der im Fluge erstarrenden Ascheteilchen wird staubförmige Flugschlacke oder feinkörnige Schlacke von sandartigem Gefüge vorwiegen. Die erstere ist in ihren schädlichen Wirkungen der Flugasche gleichgeartet und wie diese zu bekämpfen. Die letztere ist durch ihre Sandstrahlwirkung, der vor allem das Mauerfutter der Verbrennungskammer, weniger das der Feuerungszüge ausgesetzt ist, oft störend. Große Verbrennungskammern mit geringen Gasgeschwindigkeiten und freiem Flammenauslauf sind am besten geeignet, die Sandstrahlwirkung hintanzuhalten¹⁾.

B. Die aus der Flamme tretenden, zu Schlackentropfen agglomerierten flüssigen Staubteilchen erstarren nicht, während sie sich noch im Fluge befinden; sie treffen die Wände der Verbrennungskammer und bleiben so dünnflüssig, daß sie leicht ablaufen und flüssig abgezogen werden können. Die dünnflüssige Schlacke kann aber auch in die Poren der feuerfesten Steine der Verbrennungskammer eindringen und jene chemisch angreifen. Man sollte daher auf ein dichtes Gefüge der Steine sehen und durch vorherigen Versuch in einem keramischen Laboratorium feststellen, ob die Schlacke nicht chemische Verbindungen mit den Bestandteilen der feuerfesten Steine eingehen wird. Es kann vorkommen, daß hochtemperaturbeständige und schwer schmelzbare Steine schon bei verhältnismäßig niedrigen Temperaturen plastisch oder gar flüssig werden, wenn ihre Bestandteile zufällig mit den Schlackenkomponenten die leichtflüssigste Lösung bilden. Durch geeignete Wahl der Steine kann man diesem Zustande vorbeugen.

Bei Wasserrohr- und Lokomotivkesseln werden die dünnflüssigen Schlackenpartikel zuweilen von den Abgasen mitgerissen und zwischen bzw. vor den Kesselröhren als sog. „Schwalbennester“ oder „Honigwaben“ (honey combs) abgesetzt. Die Neigung zu derartigen Gebilden scheint nach Mühlfeld vor allem bei Anwesenheit von Eisenpyriten (FeS_2) in der Asche und bei mangelnder Zufuhr von Verbrennungsluft zu bestehen. Eisenpyrite werden in der Flamme in Eisensulfür (FeS) verwandelt, das bei etwa 1260°C schmilzt und bei Luftüberschuß und hohen Temperaturen zur Bildung von Eisenoxyd (Fe_2O_3)

¹⁾ Siehe Seite 64 und 115.

führt; dies letztere sintert mit den in der Asche vorhandenen Silikaten zu einem verhältnismäßig harmlosen Klinker zusammen. Bei mangelnder Sauerstoffzufuhr entsteht dagegen Eisenoxydul (FeO), das in Verbindung mit Silikaten eine dünnflüssige Schlacke bildet, welche an den Heizflächen erstarrt und die erwähnten Schwalbennester verursacht. Man wird daher in solchen Fällen für genügenden Luftzutritt zur Flamme sorgen müssen, oder hohe Gasgeschwindigkeiten zu vermeiden suchen, oder durch Zutritt geringer Dampf- oder Luftmengen durch Düsen die „Schwalbennester“ schwammig oder lose zu machen bestrebt sein¹⁾.

C. Die aus der Flamme tretenden, zu Schlackentropfen agglomerierten flüssigen Staubpartikel bleiben an den Wänden der Verbrennungskammer haften und bilden einen zähflüssigen Überzug, der nach Erreichung einer gewissen Dicke zu Tropfschlacke und Fädenbildung am Deckengewölbe führt, während sich am Boden der Verbrennungskammer eine zähflüssige, schwer entfernbare Schlackemasse ansammelt. Die zähflüssige Form der Schlacke ist im allgemeinen die bösartigste, weil die periodisch vorzunehmende Entfernung der Tropfschlacke meist nicht ohne Zutritt kalter Luft beim Öffnen der Schlackentür bewerkstelligt werden kann. Infolge der dabei eintretenden Erstarrung läßt sich die Schlacke dann selten entfernen, ohne die Mauerung in Mitleidenschaft zu ziehen. Man wird daher bestrebt sein, bei Eintritt von Fall C die Schlackenführung in der Richtung nach Fall A oder B zu beeinflussen, d. h. man wird entweder auf Erstarrung der im Fluge befindlichen Aschenpartikel hinarbeiten, oder man wird versuchen, die Schlacke durch Flußmittel dünnflüssig zu machen. Erstarrung kann durch feinere Mahlung, große Verbrennungskammern, Kühlröhren²⁾ oder geeignete Luftzuführung³⁾ erstrebt werden, indem den Schlackenpartikeln auf ihrem Wege von der Flamme zu den Wänden die Möglichkeit geboten wird, abzukühlen. Allerdings darf man nicht vergessen, daß zähflüssige Schlacken nicht wie dünnflüssige bei Temperaturerniedrigung plötzlich in den starren Aggregatzustand übergehen, sondern sich innerhalb weiter Temperaturspannen der Erstarrung widersetzen. Kommt man daher bei zähflüssigen Schlacken durch Abkühlung in der angedeuteten Weise nicht zum Ziel, so muß man sich der Flußmittel bedienen. Welcher Art diese sind, hängt von der Schlackenzusammensetzung ab. Das üblichste wird auf jeden Fall Kalkzusatz sein. Leider sind über die Einflüsse der chemischen Zusammensetzung auf Schmelztemperatur und Schmelzbarkeit nur allge-

¹⁾ Herington, Powdered coal as a fuel, S. 14f.; The Blast Furnace & Steel Plant, Sept. 1920, S. 530. ²⁾ Siehe Abb. 51. ³⁾ Sieh S. 64.

meine Regeln bekannt, so daß es meist nur dann möglich ist, an Hand der Achenanalyse vorhersagen zu können, welche Schlackenverhältnisse eintreten werden, wenn man auf ähnliche praktisch erprobte Fälle zurückgreifen kann¹⁾. Die Theorie der Flußmittel wird dadurch kompliziert, daß jede Änderung in der Zusammensetzung der Schlacken auch die Schmelztemperatur und die Schmelzbarkeit ändert, und daß die verschiedenen schlackenbildenden Komponenten zahllose Vereinigungen miteinander bilden können.

Im allgemeinen liegen Schmelz- und Erstarrungspunkt um so niedriger, je größer die Zahl der in der Schlacke vereinigten Verbindungen ist. Die Verhältnisse werden dadurch noch unübersichtlicher, daß die Schlacken mit niedrigen Schmelztemperaturen durchaus nicht immer die dünnflüssigeren sind. Zu den zähflüssigen Schlacken gehören vor allem die kieselsäurereichen und gleichzeitig Tonerde haltigen Kalkerdemagnesiasilikate (Bi- und Trisilikate), während die kalkerdereichen und gleichzeitig tonerdearmen Schlacken dünnflüssig sind. Des Einflusses von Eisenoxydul bei silikatreichen Schlacken wurde bereits oben gedacht. Nach E. Probst hängt die Schmelzbarkeit der Steinkohleschlacken besonders vom Tonerdegehalt derselben ab; am schwersten schmilzt solche mit 32 bis 34⁰/₀ Tonerde und 46⁰/₀ Kieselsäure, während Eisenoxyd und Kalk die Schmelzbarkeit befördert²⁾. Der bei Hochofenschlacken gewonnene Erfahrungssatz, daß Dünnflüssigkeit erreicht wird, wenn



kann auch bei Kohleschlacken als Anhalt dienen. Jedenfalls aber wird in zweifelhaften Fällen eine vorherige Schlackenschmelzprobe durch ein keramisches Laboratorium anzuraten sein, bei der nicht nur Schmelzpunkt und Schmelzbarkeit der Asche, sondern auch ihr chemischer Einfluß auf die zu verwendenden feuerfesten Steine in der bereits angedeuteten Weise festzustellen wäre. Bemerkt sei noch, daß sich in Amerika bei Bestimmung des Schmelzpunktes von Kohlenaschen das Bedürfnis der Normung der Untersuchungsmethoden herausgestellt hat, um die von verschiedenen Laboratorien gefundenen Resultate ohne weiteres verwenden oder vergleichen zu können³⁾.

β) Thermische Bedeutung der Asche. Asche ist als mitzuerhitzender Ballast anzusehen und wird daher den pyrometrischen Wirkungsgrad der Verbrennung durch Temperaturerniedrigung und Wärmeverluste herabdrücken. Während aber bei Rostfeuerungen ein Teil der an die Asche gebundenen Wärme durch Rostdurchfall ver-

¹⁾ Osann, Band 1, S. 548f.

²⁾ Fischer, Kraftgas, 1911, S. 89.

³⁾ Bulletin 129 of the U. S. Bureau of Mines.

loren geht, sind bei der Kohlenstaubfeuerung Flugasche und Flugschlacke Träger von Wärme, die teilweise an die zu heizenden Flächen abgegeben werden kann und daher nicht völlig verloren geht. Bei vielen Kohlenstaubfeuerungen muß man mit Luftüberschuß arbeiten, um mit Rücksicht auf die feuerfesten Steine der Verbrennungskammer die Temperaturen zu mäßigen. Der Luftüberschuß wird unter sonst gleichen Umständen um so geringer sein können, je größer der Aschegehalt ist. Dieser braucht daher — thermisch betrachtet — kein Nachteil zu sein.

γ) Einfluß des Schwefels¹⁾. Sofern der Schwefel auf den Aggregatzustand der Schlacke einwirkt, wurde er bereits unter B berücksichtigt, gleichgültig welchem Zweck die Staubfeuerung dient. Dazu kommen noch andere Einflüsse, die nach folgenden Gesichtspunkten geordnet seien:

In der Verbrennungskammer: Eiserne Teile, wie Roste in Kesselfeuerungen, Halbgasfeuerungen und Generatoren, oder Aschpfannen bei Lokomotiven sind bei schwefelhaltigen Kohlen (Pyriten) häufig Korrosionen ausgesetzt. Diese fallen bei Staubfeuerungen naturgemäß fort. Kohlen mit 5⁰/₀ Schwefelgehalt sind unter Kesseln ohne nennenswerte Korrosionserscheinungen dauernd in Staubfeuerungen verarbeitet worden.

An Kesselheizflächen: Auf die bei eisenpyrithaltiger Kohle auftretenden „Schwalbennester“ wurde bereits auf Seite 13 hingewiesen. Ob einerseits infolge der höheren Temperaturen der Staubfeuerung ein größerer Teil der Sulfide als Schwefeldioxyd mit den Rauchgasen abzieht, ob andererseits infolge vorhergehender Trocknung des Brennstoffes ein geringerer Betrag der Sulfide in schweflige Säure übergeht als bei Rostfeuerungen, sei dahingestellt.

Auf dem Bade von Herdschmelzöfen: Während bei Halbgas- und Generatorgasfeuerungen die Schlacke dem Bade ferngehalten wird, ist bei den Kohlenstaubfeuerungen eine auch nur teilweise Ablagerung der Asche und Schlacke auf dem Schmelzherd bisher nicht vermeidbar gewesen. Die Gefahr des Überganges des Schwefels an das Bad ist daher bei Staubfeuerungen nicht von der Hand zu weisen. Bei Flammöfen ist der Schwefelgehalt des Kohlenstaubes erfahrungsgemäß dann von untergeordneter Bedeutung, wenn die Charge, wie es oft der Fall ist, selbst große Beträge an Schwefel enthält²⁾. Dagegen hat sich bei Martinöfen der Schwefelgehalt der

¹⁾ Analyse of Sulphur-Forms in coal, Techn. Paper 254 of U. S. Bureau of Mines.

²⁾ Journal of the Am. Soc. of Mech. Engineers, Oktober 1914, S. 359; The Foundry, Nov. 1917, S. 487.

Kohle in der amerikanischen Praxis zuweilen störend geltend gemacht. Durch Kalkzuschlag oder basisches Futter läßt sich der schädliche Einfluß des Schwefels allerdings meistern; ein einwandfreier Betrieb konnte in einem Fall bei 1,5⁰/₀ Schwefelgehalt ohne, und bei 2,25⁰/₀ mit Kalkzuschlag ermöglicht werden.

δ) Zusammenfassung der Aschenfrage. Aus dem Gesagten geht hervor, daß nicht so sehr die Menge, wie die chemische Beschaffenheit der in der Kohle enthaltenen Asche bei Kohlenstaubfeuerungen ins Gewicht fällt. Daraus folgt natürlich nicht, daß aschereiche Kohlen schlechthin brauchbar oder sogar zu bevorzugen wären. Es ist aber erwiesen, daß gewisse Kohlen für Rostfeuerungen wegen des hohen Aschegehaltes unbrauchbar waren, sich aber in Kohlenstaubfeuerungen noch gut verbrennen ließen. Gruben- und Abfallkohle mit 35 bis 40⁰/₀ Aschegehalt ist u. a. von der Farbenfabrik Fr. Bayer in Leverkusen, Kohle mit 52⁰/₀ Aschegehalt in Amerika verarbeitet worden, während in anderen Fällen Kohle mit nur 10⁰/₀ Aschegehalt der böartigen Schlacke wegen für Kohlenstaubfeuerungen verworfen werden mußte¹⁾.

Es ist daher bei Beurteilung der Aschenfrage das chemische, mechanische und thermische Verhalten von Asche und Schlacke im Zusammenhang mit Mahlkosten, Mühlenverschleiß, Ofenkonstruktion, Flammentemperatur und Feuerungs zweck zu berücksichtigen.

II. Die Aufbereitung des Kohlenstaubes.

a) Allgemeines.

Für die Herstellung des Kohlenstaubes gelten die aus der Zerkleinerungstechnik bekannten allgemeinen Grundsätze und Erfahrungen. Die Zerkleinerung kann durch Spalten, Schlag, Stoß, Druck, Quetschen, Reibung oder durch mehrere dieser Mittel bewirkt werden. Bestimmend für die Wahl der Zerkleinerungsmethode ist neben der physikalischen Beschaffenheit des zu zerkleinernden Stoffes der Zerkleinerungsgrad und die Korngröße. Es ist wirtschaftlich, stufenweise vorzugehen und die für die jeweilige Korngröße bestgeeignete Zerkleinerungsmethode anzuwenden. Bei der Herstellung von Kohlenstaub handelt es sich um den Übergang von mehr oder weniger großen Kohlenstücken zu einem unfühlbaren, feinen Pulver als Endprodukt. Man teilt den Zerkleinerungsprozeß daher in die folgenden hintereinander geschalteten Vorgänge: Vorbrechen oder Grobzerkleinerung — Schro-

¹⁾ The Blast Furnace and Steel Plant, Sept. 1920, S. 528 u. f.; Herington, Powdered coal as a fuel, New York 1921, S. 13; Heft 3 der Hauptstelle für Wärmewirtschaft; Journal Am. Soc. Mach. Eng. Okt. 1914, S. 359.

ten — Mahlung, wobei zu bemerken ist, daß der Mahlvorgang zuweilen wieder in Vor- und Feinmahlung zerfällt. Es wurde bereits der Einfluß erwähnt, den die in der Kohle enthaltene fühlbare Feuchtigkeit auf die Mahlfähigkeit hat, und der je nach Art des Brennstoffes zu mehr oder weniger scharfem Trocknen zwingen kann. Es wäre also in vielen Fällen den obigen Zerkleinerungsvorgängen noch die Trocknung hinzuzufügen, so daß der Arbeitsplan wie folgt lautet: Vorbrechen und Schroten — Trocknen — Mahlen.

b) Vorbrechen und Schroten.

Sieht man von anderen, für die Auswahl der Kohle maßgebenden Faktoren ab, so wird man Kohle in feinkörnigem oder bröckligem Zustande bevorzugen, weil diese meistens für andere Feuerungszwecke wenig geeignet ist und als Abfall behandelt wird, und weil sie das Vorbrechen, häufig auch das Schroten erübrigt. Ist man dagegen genötigt, zur Vorzerkleinerung zu schreiten, so verwendet man hierzu Granulatoren oder Walzenmühlen; die letzteren werden als Einfach- oder Doppelwalzenmühlen in den Handel gebracht. Bei Einfachwalzenmühlen kann das aufzugebende Gut bis 80 mm, bei Doppelwalzenmühlen bis 300 mm groß sein, wobei die Zerkleinerung in der Regel bis auf Stücke von Haselnuß- bis Erbsengröße getrieben wird. Der Kraftbedarf der Vorzerkleinerung beträgt je nach Art der Kohle 2,5 bis 11 KW bei einer Leistung von 2,5 bis 9 t in der Stunde. Zuweilen werden zur Vorzerkleinerung auch Kugelmühlen verwandt, in denen die Mahlung durch Stahlkugeln von 70 bis 150 mm Durchmesser bewerkstelligt wird.

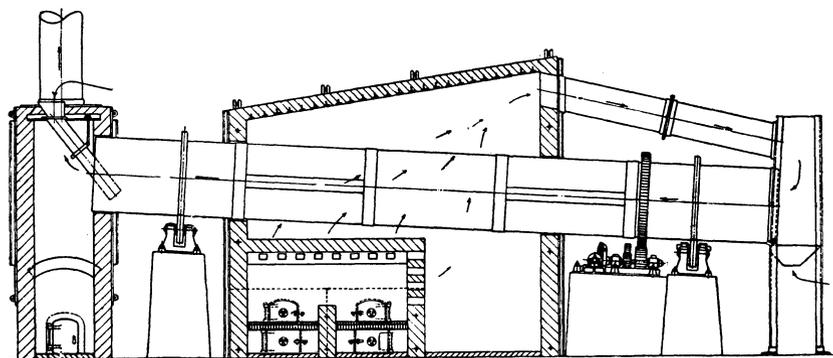
c) Trocknung.

1. Allgemeines. Die Trocknung der Kohle geschieht entweder mittels indirekter Heizung durch Wandungen oder mittels direkter Heizung durch Berührung der Heizgase oder -dämpfe mit dem zu trocknenden Gut, oder mit Hilfe beider Methoden. Da die Trockenwirkung auf Verdunstung und Verdampfung der in der Kohle enthaltenen Feuchtigkeit beruht, wäre es unwirtschaftlich, das Trockengut auf mehr als etwa 100° C zu erhitzen. Höhere Temperaturen sind auch deshalb zu vermeiden, weil sie die Selbstentzündung begünstigen oder den Verlust von flüchtigen Bestandteilen nach sich ziehen. Es erscheint daher wünschenswert, die „grobe“ oder „fühlbare“ Feuchtigkeit bei niedrigen Temperaturen auszutreiben und das Trockengut nur soweit Temperaturen von 100° C auszusetzen, als es zur Entfernung der „unfühlbaren“ oder „hygroskopischen“ Feuchtigkeit erforderlich ist (siehe S. 10). Dabei wird allerdings die

zur Trocknung aufzuwendende Zeit länger und der Umfang der Trockenanlage in unwirtschaftlicher Weise vergrößert¹⁾).

Die Trockner werden häufig nach ihrem Wirkungsgrad beurteilt; für diesen findet man verschiedene Werte, je nachdem die mit der Trockensubstanz abgehende Heizwärme berücksichtigt wird oder nicht. Solange der Begriff „Wirkungsgrad“ verschieden gedeutet wird, ist es richtiger, wenn man unter Nennung der Heizungsart (Kohle, Gas, Abhitze) und des Trocknungsgrades (Prozent ausgetriebene Feuchtigkeit) den Wärmeaufwand in WE pro Kilogramm entfernte Feuchtigkeit angibt. Dieser Wert ist je nach der Brennstoffart verschieden und nimmt ferner bei der gleichen Kohle mit abnehmender Feuchtigkeit zu.

2. Trommeltrockner mit Außen- und Innenbeheizung. Eine häufige Ausführung ist in Abb. 1 dargestellt. Die Verbrennungsgase einer Heizfeuerung umspülen eine schräg gelagerte,



M. ~ 1:160.

Abb. 1. Kohlentrockner, Bauart Fuller.

sich drehende Trommel erst von außen, und streichen dann nach dem Gegenstromprinzip durch das Innere über das Trockengut nach der Staubkammer und dem Schornstein. Damit weder Verluste an flüchtigen Bestandteilen noch eine Entzündung des Trockengutes entsteht, müssen die Verbrennungsgase bei ihrem Eintritt in das Trommelinnere genügend abgekühlt sein. Die Heizung muß daher mit großem Luftüberschuß arbeiten, so daß der Wirkungsgrad der Trocknung entsprechend gering ausfällt. Die Verbrennungsgase verlassen die Trommel mit 40 bis 120° C und ziehen entweder mit natürlichem Zuge oder mittels eines Ventilators durch einen Staubab-

¹⁾ Eine Analogie besteht bei Braunkohlenbrikettwerken, bei denen man zum Zwecke eines größeren Durchsatzes von dem Windtrocknungsverfahren zur Röhrentrocknung übergegangen ist und dabei den größeren Verlust an flüchtigen Bestandteilen in Kauf nahm.

scheider ab¹⁾. Bei anderen Ausführungen ziehen die Verbrennungsgase der Heizfeuerung erst durch ein im Inneren der Trommel befindliches Rohr, anstatt die Trommel von außen zu umspülen (Ruggles-Coles), oder sie heizen die Trommel von außen im Gegenstrom, kommen dann aber nicht mit dem Trockengut in Berührung, sondern treten durch senkrecht zur Trommelachse stehende Rohrstützen in einen innerhalb der Trommel liegenden Zylinder, von wo sie im Gleichstrom durch einen Ventilator abgezogen werden (Krupp-Grusonwerk). Die Trommeldimensionen betragen je nach Größe und Ausführung 0,8 bis 2,2 m Durchmesser, 6 bis 22 m Länge. Die Leistung ist je nach Größe der Trommel, der Beschaffenheit und Feuchtigkeit der Kohle mit 1,2 bis 20 t pro Stunde anzunehmen. Der Kraftbedarf beläuft sich bei Steinkohle auf 4 bis 1 KWst pro Tonne ohne, und auf 5 bis 2 KWst pro Tonne mit Ventilator.

Diese Trockner eignen sich für Steinkohlen. Zur Heizung kann Kohle, Öl, Gas oder Abhitze dienen. Bei Rostfeuerungen beträgt der Wärmearaufwand 2300 bis 1800 WE pro 1 kg entfernte Feuchtigkeit, wenn der Wassergehalt der ungetrockneten Kohle zwischen 3 und 5⁰/₁₀ liegt und die Trocknung auf 0,5 bis 1⁰/₁₀ getrieben wird. Bei einer Steinkohle von 7000 WE, einer Feuchtigkeit von 5⁰/₁₀ im Anlieferungszustand und Trocknung auf 0,5⁰/₁₀ Feuchtigkeit würde daher der Aufwand an Steinkohle rd. $\frac{2300 \cdot 45}{7000000} = 1,5\%$ der getrockneten Kohle betragen²⁾.

Die Verwendung dieser Trockner für Braunkohle ist wegen der leichten Entzündlichkeit der letzteren nicht unbedenklich und hat bei einem niederrheinischen Werk dadurch zu verschiedenen Bränden Veranlassung gegeben, daß die Kohle an den inneren Wänden der Trommel festbackte und überhitzt wurde. Bei der Trocknung von Lignit durfte die Heizgastemperatur im Trockner einer amerikanischen Anlage mit Rücksicht auf Selbstentzündungen und Explosionen nicht über 120° C getrieben werden³⁾.

3. Nach dem Gleichstromprinzip arbeitende Trommel-trockner (Abb. 2). Bei diesen Trocknern werden die von einer Heizung kommenden Feuergase im Gleichstrom und unter direkter Berührung mit dem zu trocknenden Material durch eine mäßig geneigte, sich drehende Trommel mittels eines Exhaustors gesogen; dieser führt die mit Wasserdampf angereicherten Gase einem Zyklon zu, in welchem die Staubabscheidung erfolgt. Das Trommelinnere ist mit Zellen ausgerüstet, um eine große Heizfläche im Trommelrohr unterzubringen

¹⁾ Power, 4. Mai 1920, S. 730.

²⁾ Power, 2. März 1920, S. 357.

³⁾ Chemical and Metallurgical Engineering, 31. März 1920, Seite 606.

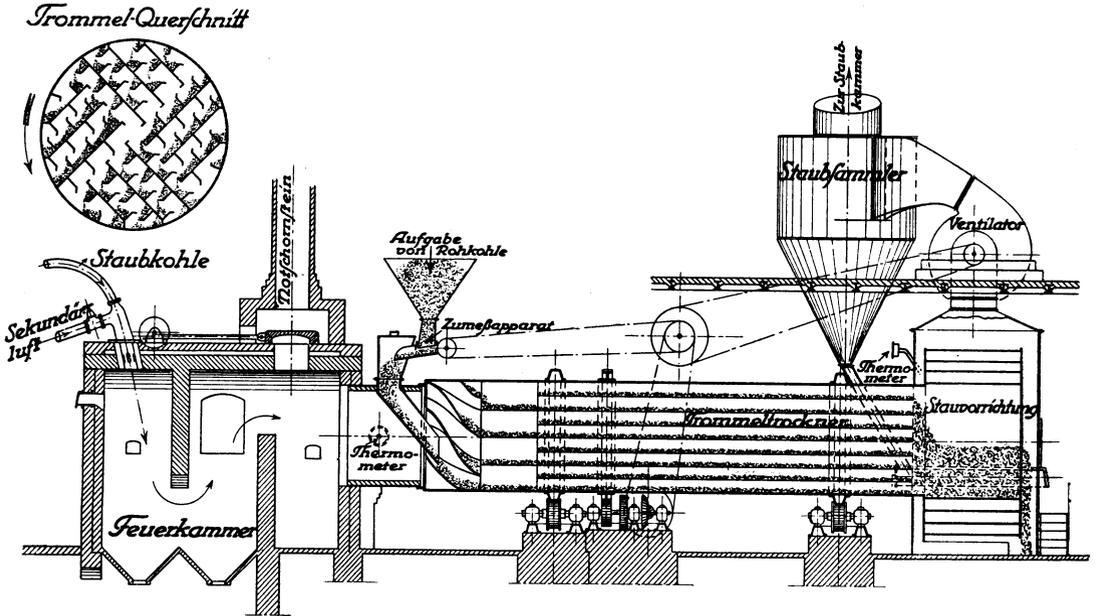


Abb. 2. Gleichstromtrockner der Firma Decker in Krefeld.

und das Material ständig den durchgesaugten Gasen entgegenzuwerfen. Es liegt im Wesen des Gleichstromverfahrens, daß die grubenfeuchte Kohle zunächst mit den in die Trommel eintretenden heißen Gasen in Berührung kommt, während das getrocknete Gut nur von den abziehenden, abgekühlten und feuchten Gasen umspült wird. Dadurch wird die Entzündungsgefahr erheblich vermindert; man kann daher bei sehr feuchten Brennstoffen, wie Braunkohle oder Torf höhere Eintrittstemperaturen der Gase ($400\text{--}700^{\circ}\text{C}$) zulassen und dadurch den Wirkungsgrad verbessern. Da man mit dem Heizgase sofort an das Trockengut herangehen kann, ohne sich des Hilfsmittels indirekter Beheizung der Trommel von außen bedienen zu müssen, wird die Gefahr der Selbstentzündung durch Festbacken der zu trocknenden Kohle an den inneren Trommelflächen geringer als bei den unter 2. beschriebenen Trocknern sein. Bei feuchten Brennstoffen, wie Braunkohle und Torf, die nur auf etwa 15% Feuchtigkeit zu trocknen sind, wird man daher logischerweise im Gleichstrom trocknen.

Der Kraftbedarf des Trockners pro Stunde und Tonne getrockneter Kohle hält sich in den gleichen Grenzen wie bei den unter 2. erwähnten Trocknern. Der Brennstoffverbrauch zur Erzeugung der Heizgase beträgt bei Braunkohle von 50 bis 60% Grubenfeuchtigkeit und einer Trocknung auf 15 bis 18% Feuchtigkeit etwa 18 bis 26% der nassen, in die Trommel eingeführten Kohle bei Verfeuerung von

Rohbraunkohle von 2000 WE auf einen Treppenrost¹⁾. Das entspricht einem Wärmeverbrauch von 880 bis 1020 WE pro 1 kg entfernte Feuchtigkeit. Erfahrungen mit Gleichstromtrommelrocknern, die mit verhältnismäßig trocknen Abgasen aus Kesseln oder Öfen arbeiten, liegen zur Zeit noch nicht vor.

Bei allen Trockentrommeln, einerlei ob sie im Gegen- oder Gleichstrom arbeiten, sind die Einflüsse von Trommelneigung, Umdrehungszahl und Zeit, während welcher das Trockengut der Erwärmung ausgesetzt ist, sorgfältig gegeneinander abzuwägen und bei der Konstruktion zu beachten. Es empfiehlt sich daher, nur Firmen mit Erfahrungen zu berücksichtigen.

4. Senkrechte Trockenöfen der Bauart Ekelund²⁾. Diese werden zur Torfpulverbereitung der schwedischen Staatsbahnen benutzt. Der abgeseibte Torfstaub tritt in den senkrechten Trockenraum oben mit durchschnittlich 40% Feuchtigkeit ein und wird im Zickzackweg über etagenförmig angeordnete Platten mittels Kratzer geführt, während die aus den Heizkanälen des Ofens in den Trockenraum tretenden Heizgase im Gegenstrom von unten nach oben ziehen. Die Trocknung wird auf 16% Feuchtigkeit getrieben. Für eine genügend schnelle Trocknung ist eine Anfangstemperatur der Heizgase von etwa 200°C erforderlich. Die Leistung eines Ofens beträgt im 24-stündigen Betrieb etwa 13 bis 17 t Torfpulver. Zur Erzeugung einer Tonne Pulver sind 1,7 t Torf mit 40% Wassergehalt einschließlich Brennstoffverbrauch für die Trocknung erforderlich. Das entspricht einem Wärmeverbrauch von 2200 WE pro 1 kg entfernter Feuchtigkeit.

5. Auf die aus den Braunkohlenbrikettwerken bekannten Wind-, Teller- und Röhrentrockner sei hier nur kurz hingewiesen, weil sie unter Umständen auch für die Herstellung von Braunkohlenstaub in Frage kommen. Die Heizung geschieht durch den Abdampf der Brikettpressen, Pumpen, Fördermaschinen usw. und könnte im Falle von Kohlenstauberzeugung aus dem Abdampf derjenigen Maschinen gedeckt werden, welche die Mühlen und Transportvorrichtungen der Mahlanlage antreiben. Der Heizdampf tritt mit 3 at Überdruck ein und als Wasser von etwa 110° aus. Dabei ist der Dampfverbrauch 1,85 kg pro 1 kg auszutreibende Kohlenfeuchtigkeit³⁾. Bei Trocknung von 60 auf 18% sind 512 kg Wasser pro Tonne Rohkohle oder $\frac{512}{0,488} = \text{rd. } 1045 \text{ kg}$ pro Tonne Braunkohlenstaub zu entfernen; der

¹⁾ Angaben der Firma Felner & Ziegler, Frankfurt a. M.

²⁾ Siehe Vortrag von Dr.-Ing. Carl Birk über Torfstaubbereitung auf der 39. Mitgliederversammlung des Vereins zur Förderung der Moorkultur.

³⁾ De Grahl, Die wirtschaftliche Verwertung der Brennstoffe. 1921, S. 98.

Dampfverbrauch ist alsdann $1,85 \cdot 1045 = 1935$ kg pro Tonne Braunkohlenstaub. Die Sicherheit gegen Brände dürfte größer als bei Trommeltrocknern sein, die nach dem Gegenstromprinzip arbeiten.

6. Zusammenfassung. Zusammenfassend kann gesagt werden, daß sämtliche Trocknungsverfahren noch verbesserungsbedürftig sind. Dazu bedarf es vor allem weiteren Eindringens in die physikalischen Trockenvorgänge. Das gilt besonders von Braunkohle, bei der die Trocknung eine bedeutendere Rolle spielt als bei Steinkohle. Wesentliche Verbesserungsmöglichkeiten liegen auf dem Gebiet der Speisevorrichtungen, die für eine möglichst gleichmäßige Beschickung der Trockner zu sorgen haben; entwicklungsfähig ist ferner die Temperaturkontrolle im Trockner; je zuverlässiger jene ist, desto näher kommt man den günstigsten Temperaturen und um so besser wird die Wirtschaftlichkeit werden. Besondere Beachtung verdient auch die Verwertung von Abhitze für Trockenzwecke.

d) Mahlung.

1. Vorbereitung. Die Kohle sollte vor Eintritt in die Mühlen von Eisenteilen, wie Nägeln, Schrauben, Stiften usw. befreit werden und wird daher zuweilen auf einem Transportband über einen elektromagnetischen Trommelabscheider oder unter einem feststehenden Elektromagneten hergeführt.

Würde es sich darum handeln, Koks, Braschen und Kohle aus Brennstoffrückständen aus den Betrieben der Eisenbahnen (Kammerlösche), Gasanstalten, Bergwerke, Hüttenwerke und Fabriken für Kohlenstaubfeuerungen zu verwenden, so ist eine Schlackenabsonderung nach dem nassen oder nach dem elektromagnetischen Verfahren in Erwägung zu ziehen. Die nasse Absonderung ähnelt dem von der Kohlenwäsche bekannten Setzverfahren. Das elektromagnetische Verfahren beruht darauf, daß sich der in fast allen Steinkohlen vorhandene Eisenpyrit beim Verbrennen der Kohle in Eisenverbindungen verwandelt, die in die Schlacke übergehen und, da sie magnetisch sind, durch elektromagnetische Abscheider zusammen mit der Schlacke von den brennbaren Bestandteilen absondert werden können.

2. Mühlenarten. Die zur Mahlung verwandten Maschinen lassen sich in schnelllaufende und langsamlaufende Mühlen einteilen.

a) Schnelllaufende Mühlen.

In der Schlagkreuzmühle (Abb. 3) dreht sich ein Schlagkreuz, das aus einer zweiteiligen Stahlgußnabe und 4 bis 6 nachstellbaren Schlägern besteht, in einem zylindrischen Gehäuse mit hohen Touren

zahlen. Am äußeren Umfange dieses Gehäuses ist ein aus Stahlstäben gebildeter Rost mit veränderlicher Spaltweite angebracht. Die Kohle wird seitlich eingeführt und vom Schlagkreuz durch den

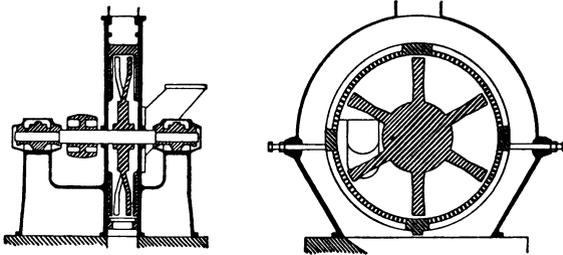


Abb. 3. Schlagkreuz-Mühle¹⁾.

Rost hindurchgeschlagen und dadurch zerkleinert. In dieser Mühle können Stücke bis etwa 8 cm Größe aufgegeben werden.

Zum Unterschied von der Schlagkreuzmühle ist die in der Hammermühle (Abb. 4) angebrachte Schlagvorrichtung nicht starr,

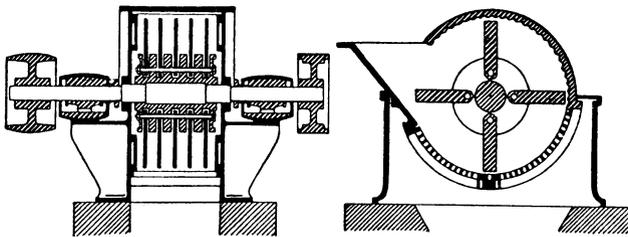


Abb. 4. Hammer-Mühle¹⁾.

sondern gelenkig auf einer rotierenden Nabe befestigt. Die Schlagarme oder Hämmer stellen sich daher im Betriebe radial ein und weichen bei hartem oder großstückigem Mahlgut zunächst aus, so daß die Zerkleinerung erst durch die Schläge mehrerer aufeinanderfolgender Hämmer bewirkt wird.

Schlagkreuz- und Hammermühle kommen für die Vorzerkleinerung von Steinkohle in Betracht und haben sich vor allem für die Herstellung von Braunkohlenstaub gut bewährt.

In Pendelmühlen (Abb. 5) sind an einer auf vertikaler Welle aufgekeilten Nabe 1 bis 4 Pendel freischwingend aufgehängt, an deren Enden sich je eine Mahlwalze befindet. Diese wird bei hoher Umdrehungszahl der Welle durch die Fliehkraft gegen einen feststehenden Mahlring angepreßt. Die Zerkleinerung findet zwischen Walze und Ring statt. Das Mahlgut wird entweder von einem Venti-

¹⁾ Zeitschr. f. Dampfk. u. Maschbetr. Nr. 17, 1921, S. 130.

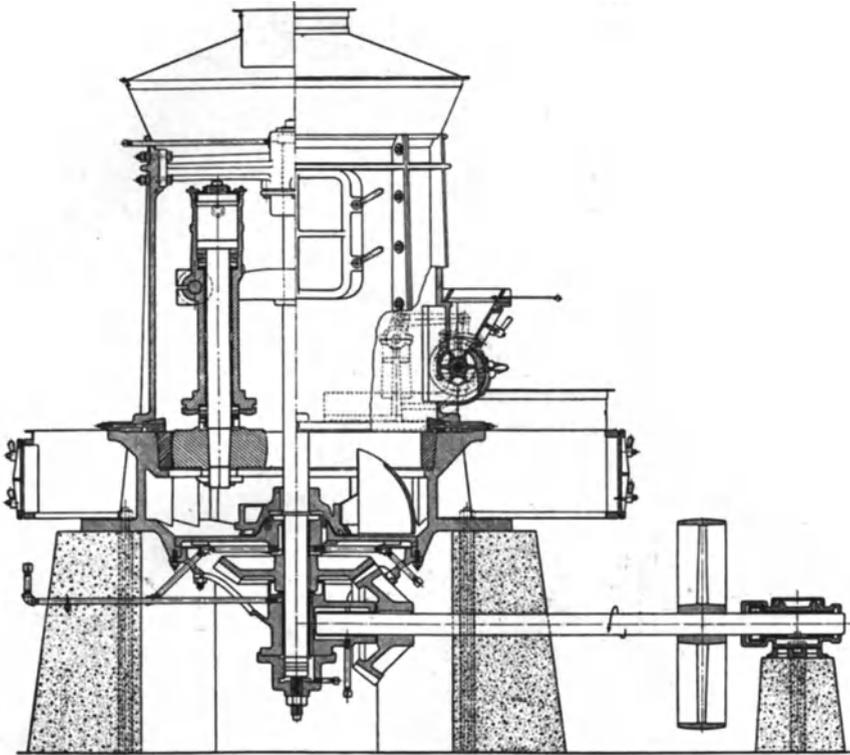


Abb. 5. Pendelmühle, Bauart Raymond.

lator, der unter dem Mahlring auf der Welle sitzt, gegen einen am Umfang der Mühle befindlichen Siebring geblasen, oder es wird nach oben abgesogen und einem Windsichter (Abb. 12) zugeführt, während die groben Bestandteile zwecks weiterer Mahlung zwischen Ring und Walze zurückfallen.

Bei Horizontalkugelmühlen (Rouletten) findet die Mahlung ähnlich wie bei Pendelmühlen zwischen einem feststehenden horizontalen Mahlring und Stahlkugeln statt, die, von einem schnellrotierenden Mitnehmer angetrieben, gegen die innere Fläche des Mahlrings gepreßt werden und auf diesem abrollen. Die Ausscheidung des Feingutes erfolgt durch Ventilatorflügel und Siebring (Abb. 6) oder durch Windsichtung in ähnlicher Weise wie bei Pendelmühlen.

In Ringmühlen (Abb. 7) findet die Mahlung zwischen einem vertikalen Mahlring und drei gegen dessen Innenfläche durch Federdruck gepreßten Stahlwalzen statt. Eine der Walzen wird ange-

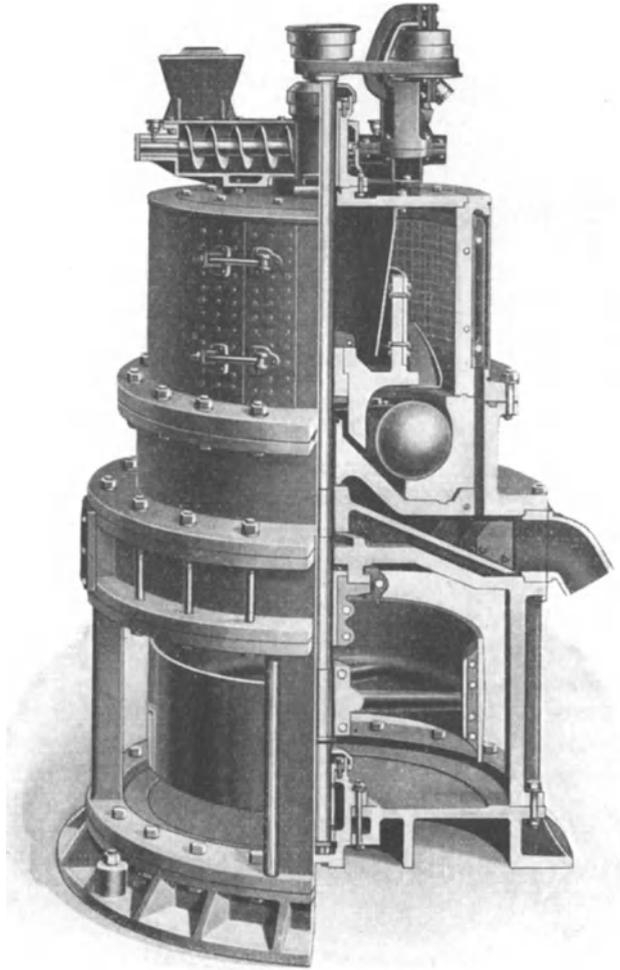


Abb. 6. Fullermühle mit Siebsichtung.

trieben und nimmt den Ring mit, an dem die andern Walzen abrollen. Die Abscheidung des Feinmahlgutes geschieht durch Windsichtung.

Bei Pendelmühlen, Horizontalkugelmühlen und Ringmühlen wird die zu mahlende Kohle in der Regel in Stücken von 12 bis 20 mm aufgegeben. Die Leistungsfähigkeit dieser Mühlen läßt sich steigern, wenn man zum Vormahlen Schlagkreuz- oder Hammermühlen verwendet. Auch wegen der durch die Reibungswärme erzeugten Erhitzung ist es zuweilen vorteilhaft, die Kohle in zwei Gängen zu mahlen. Bei der konstruktiven Durchbildung ist zu beachten, daß

mit zunehmendem Mahlringdurchmesser der Wirkungsgrad der Mühle steigt. Die Mahlringe sollten von Staub, der sich am Boden etwa ansammelt, durch geeignete Konstruktion freigehalten werden, weil sonst der Kraftbedarf steigt, ohne daß die Mühlenleistung zunimmt. Zwischen Ring einerseits und Walze oder Kugel andererseits sollten sich im Interesse hoher Mühlenleistungen immer nur kleine Mengen Mahlgut befinden. Dieser Forderung kann man am besten bei horizontaler Ringanordnung (Pendel- und Horizontalkugelmühlen) gerecht werden. Nach amerikanischen Erfahrungen liefern Mühlen mit vertikalem Ring (Ringmühlen) ein weniger feines Pulver bei geringerer Leistung, als Mühlen mit horizontalem Mahlring.

Zu den schnelllaufenden Mühlen sind auch die Kofinomühle des Krupp-Grusonwerkes, die Walther-Farner-Mühle von Walther u. Cie. in Köln-Dellbrück und die amerikanische Aeromühle¹⁾ zu zählen, die im wesentlichen aus mehreren hintereinander-

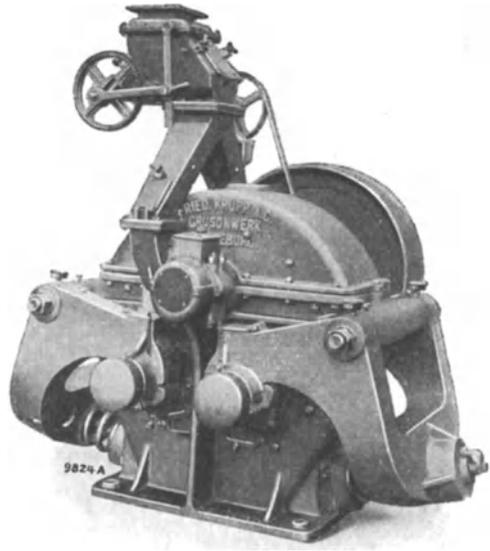


Abb. 7. Ringmühle des Krupp-Grusonwerkes.

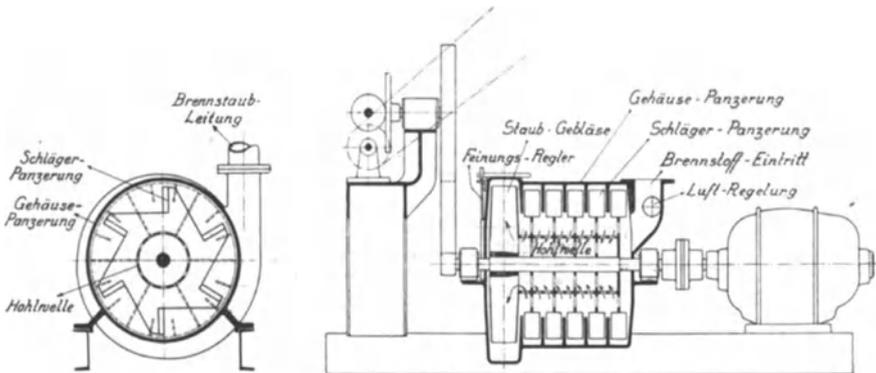


Abb. 8. Walther-Farner-Mühle von Walther & Cie., Köln-Dellbrück.

¹⁾ Eine derartige Mühle befindet sich auf einem westfälischen Elektrizitätswerk und dient zur Heizung eines 350 qm Babcock-Wilcox-Kessels. Die

geschalteten Schlagkreuzen und einem an diese angeschlossenen Ventilator bestehen, der das Mahlgut absaugt und zum Verbraucher befördert (Abb. 8). Der Vorteil, diese Mühlen ohne besondere Vorkehrungen an den Ofen setzen zu können und eine Zentralmahlanlage zu sparen, kann vor allem für kleinere Verbraucher in Betracht kommen. Trockner und Kohlenstaubbunker fallen fort. Diese Mühlen eignen sich alsdann nur für verhältnismäßig trocken angelieferten Brennstoff. Für gewisse hüttenmännische Feuerungen, bei denen besonders hohe Temperaturen gewünscht werden, scheint die Aeromühle von vornherein ausgeschlossen zu sein, weil sie nicht fein genug mahlt¹⁾.

β) Langsamlaufende Mühlen.

Zu den langsamlaufenden Mühlen sind die Kugelmühlen und die Rohrmühlen zu zählen. Sie sind dadurch gekennzeichnet, daß in wagerechten, langsamdrehenden Trommeln (20 bis 40 Umdrehungen pro Minute) Mahlkörper durch Fallwirkung das Mahlgut zerkleinern.

Bei der Kugelmühle (Abb. 9) besteht der Mantel der Trommel aus stufenförmig gegeneinander versetzten Mahlplatten aus Stahlguß,

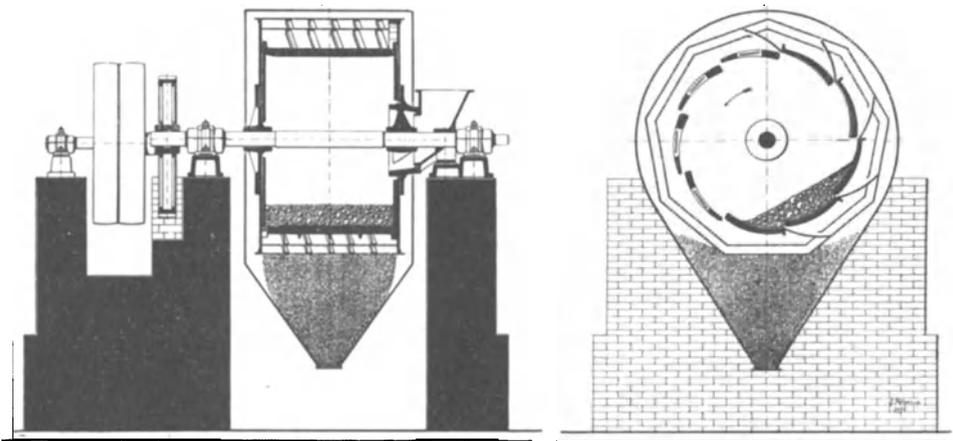


Abb. 9. Kugel-Mühle von G. Polysius, Dessau.

auf deren innerer Fläche Kugeln aus Schmiedestahl infolge Drehung der Trommel abrollen und durch den Fall von Mahlplatte zu Mahlplatte die Zerkleinerung bewirken. Um die Mahltrommel sind Vor-

Mühlenleistung beträgt 900 bis 1100 kg/st, der Kraftbedarf ist rd. 25 KWst je t. Der Betrieb war bisher zufriedenstellend.

¹⁾ Harvey, The use of pulverized Coal, S. 33; Technique moderne, Februar 1920, S. 81f.; Münzinger, Kohlenstaubfeuerungen, S. 21. 1921. Verlag von Julius Springer, Berlin.

und Feinsiebe angebracht, durch welche das Mahlgut in den unter der Mühle befindlichen Behälter fällt, um dann in der Regel in Rohrmühlen zu feinstem Staube gemahlen zu werden.

Rohrmühlen (Abb. 10) bestehen im wesentlichen aus einem vorne und hinten abgeschlossenen Blechrohr, in welchem als Mahlkörper

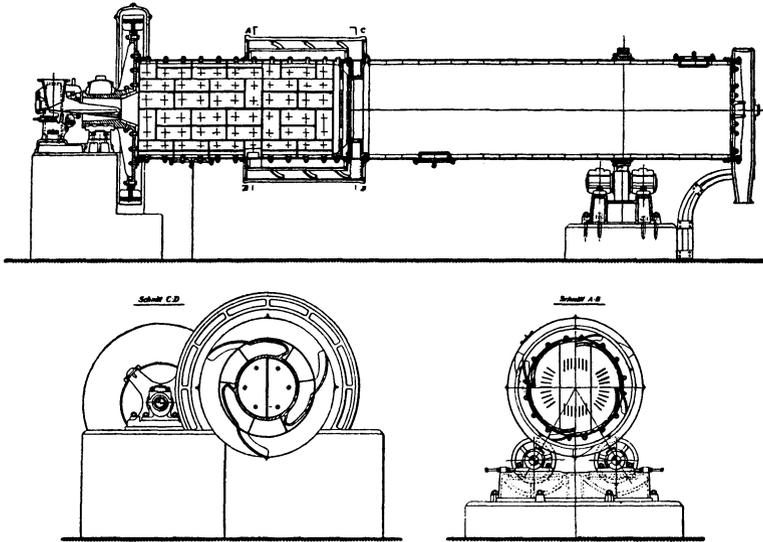


Abb. 10. Verbund-Kugel- und Rohrmühle von Fellner & Ziegler, Frankfurt a. M.

Stahlkugeln oder Flintsteine verwandt werden. Die Kohle wird an dem einen Ende zugeführt und wandert bei Drehung des Rohres allmählich nach dem anderen, wobei sie von den fallenden Mahlkörpern gepulvert wird. Die Zerkleinerung kann in einem Rohr auf einmal geschehen, oder sie kann als Vor- und Feinmahlung entweder in einem mit Trennungswand versehenen und in Grob- und Feinkammer zerfallenden Rohre, oder in zwei neben- oder übereinander angebrachten Rohren vorgenommen werden. Man spricht dann von Verbund- bzw. Doppelrohrmühlen. Der Durchmesser von Rohrmühlen ist 800 bis 1500 mm, die Länge 4500 bis 8000 mm, die Leistung 0,2 bis $5\frac{1}{2}$ t pro Stunde, je nach Größe der Mühle und Beschaffenheit der Kohle.

3. Vergleich von schnell- und langsamlaufenden Mühlen. In Deutschland haben Langsamläufer, in Amerika Schnellläufer größere Verbreitung gefunden. Bei gleicher Mahlfeinheit sind Kraftbedarf und Anschaffungskosten der schnellaufenden Mühlen geringer, ihr Verschleiß aber größer als bei Langsamläufern. Bei Schnellläufern sinkt mit zunehmender Abnutzung die Leistung der Mühle, während sich bei Rohr- und Kugelmühlen durch Nachfüllen von Mahlkörpern gleichbleibende Mahlleistungen erzielen lassen. Die

Empfindlichkeit der Schnellläufer gegen Fremdkörper wie eiserne Nägel, Stifte usw. ist bei der seit dem Kriege vermehrten Unreinheit der Kohle besonders störend und zeigt sich bei Langsamläufern nicht im gleichen Maße. Die größere Unempfindlichkeit der letzteren verbunden mit ihrer einfachen Konstruktion würde daher dort zu ihren Gunsten sprechen, wo kein gelerntes Personal zur Verfügung steht. Der geringere Platzbedarf der Schnellläufer kann bei räumlich beschränkten Anlagen entscheidend werden, fällt aber im allgemeinen dadurch weniger ins Gewicht, daß man häufig Reserve-mühlen hat und daß die Raumersparnis im Vergleich zum Raumbedarf der gesamten Aufbereitungsanlage wenig verschlägt. Für kleine Anlagen wie etwa bei kleinen Schmiede-, Wärm- und Glühöfen der Kleiseisen- und Maschinenindustrie dürften Schnellläufer am ehesten in das Bild des Betriebes passen. Von Kesselanlagen für elektrische Kraftwerke, bei denen ja ohnehin die Neigung zu Schnellläufern besteht, gilt das Gleiche, vor allem dann, wenn die Kohlenstaubfeuerung nicht dauernd, sondern nur zur Deckung von Spitzenlasten herangezogen werden soll. Dagegen dürften sich für große, dauernd arbeitende Zentralmahlanlagen in Hüttenbetrieben mit großen Schmelz-, Schweiß- oder Glühöfen die Langsamläufer wegen ihrer größeren Unempfindlichkeit, Betriebssicherheit und gleichbleibenden Leistungsfähigkeit am besten eignen. Ihr größerer Platz- und Kraftbedarf wird bei Hüttenwerken mit billigen Bodenpreisen und billiger, im eigenen Betriebe erzeugter elektrischer Energie eine untergeordnete Rolle spielen. Hüttenkraftwerke werden den höheren Kraftverbrauch der Langsamläufer gern mit der bei diesen Mühlen möglichen Dauerbelastung in Kauf nehmen.

Es wäre wünschenswert, wenn an Hand einer größeren Anzahl von Mahlproben festgestellt würde, ob sich wesentliche Unterschiede in der Güte des Mahlgutes ergeben, je nachdem man auf Schnell- oder Langsamläufern mahlt. Besonders wären die von interessierter Seite stammenden Behauptungen, Schnellläufer mahlen den Staub zuweilen zu Blättchen aus und erzielen nicht den durchschnittlichen Feinheitsgrad wie Langsamläufer, auf ihre Richtigkeit hin zu prüfen. Eine mikroskopische Untersuchung, die der Verfasser an Kohlenstaub aus einem Schnell- und einem Langsamläufer machte, ließ weder eine Blättchenbildung noch einen nennenswerten Unterschied im durchschnittlichen Feinheitsgrad erkennen. Das Gesamtbild war in beiden Fällen das gleiche¹⁾. Um die Frage endgültig zu klären,

¹⁾ Bei derartigen mikroskopischen Untersuchungen empfiehlt es sich, den Kohlenstaub auf das Objektivglas zu bringen, mit Paraffinöl zu benetzen und durch ein Deckglas abzudecken. Die Benetzung mit Wasser führt zu keiner guten Verteilung des Kohlenstaubes.

wäre es am besten, in der auf Seite 9 angegebenen Weise vorzugehen und den Staub nacheinander durch Siebe zunehmender Feinheit zu schütteln.

4. Kraftverbrauch und Mahlleistung der Mühlen. Der Kraftbedarf der Mühlen hängt von der Beschaffenheit des zu mahlenden Brennstoffes, dem Feuchtigkeitsgehalt und dem Feinheitsgrad in hohem Maße ab. Zurzeit liegen noch keine umfassenden Versuchsergebnisse vor.

Die in der Tafel angegebenen Zahlen sollen nur zu einem ungefähren Anhalt dienen und sind als abgerundete Grenzwerte aufzufassen, die den Mitteilungen verschiedener Mühlenhersteller und Zementfabriken entnommen sind¹⁾.

Zahlentafel 2.

Bauart der Mühlen	Mahlgut	Feinheitsgrad	Leistungen in t pro Stunde	Kraftbedarf in KWst pro t Kohlenstaub
Schnellläufer	Steinkohle	10% Rückstand auf 4900er Sieb	0,5—10	(7)—25
Schnellläufer	Braunkohle	65% Rückstand auf 4900er Sieb; 15—20% Feuchtigkeit	—	10—15
Schnellläufer	Braunkohle	20—25% Rückstand auf 4900er Sieb; 10% Feuchtigkeit	—	25—30
Langsamläufer	Steinkohle	10% Rückstand auf 4900er Sieb	0,2—5 1/2	20—30
Langsamläufer	Braunkohle	65% Rückstand auf 4900er Sieb; 15—20% Feuchtigkeit	0,2—5 1/2	15—20
Langsamläufer	Braunkohle	5—10% Rückstand auf 4900er Sieb	—	25—35
Langsamläufer	Koks	5—10% Rückstand auf 4900er Sieb	—	45—70

Der bei der Tieftemperaturverkokung gewonnene Halbkoks läßt sich, wie Versuche von Fellner & Ziegler ergaben, mit geringerem Kraftaufwand vermahlen, als die Kohle, aus der er hergestellt wurde.

¹⁾ Die von den Mühlenherstellern zuweilen genannten niedrigen Wert für den Kraftbedarf lassen sich infolge unvermeidlichen Verschleißes meist nicht aufrechterhalten.

5. Siebung oder Windsichtung, Speisevorrichtungen. Je nachdem die Ausscheidung des Feingutes in den Mühlen mechanisch oder pneumatisch geschieht, spricht man von Siebung oder Windsichtung. Siebe sind dem Verschleiß durch den Kohlenstaub ausgesetzt, können schlecht beobachtet und nur mit Mühe erneuert werden. Sie geben besonders dann zu häufigen Reparaturen und Betriebsstörungen Anlaß, wenn Eisenteile mit der Kohle in die

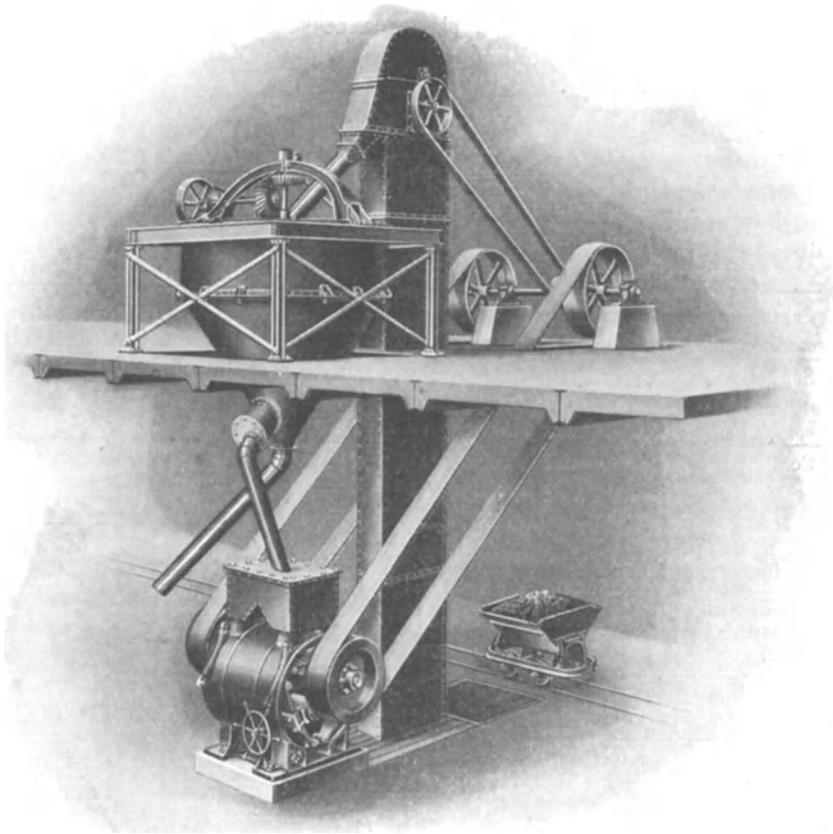


Abb. 11. Ringmühle mit Windsichter von Gebr. Pfeiffer in Kaiserslautern. Mühle eingeführt werden und die Maschen zerreißen. Verstopfung ist durch hinreichende Ventilation und Trocknung der Kohle zu verhindern. Siebe verbrauchen wenig Kraft und haben sich bei nicht zu hartem oder zu feuchtem Kohlenstaub bewährt. Beim Windsichter wird das Feingut im Luftstrom abgesondert. Entweder

wird das Mahlgut von der Luft in eine über der Mühle befindliche und nach oben sich erweiternde Kammer gehoben, in der die gröberen Teile ihrer Schwere erliegen und der Mühle wieder zugeführt werden, oder es wird von einem rotierenden Streuteller in einen senkrecht nach oben gerichteten Luftstrom geworfen (Abb. 11 und 12), wobei das feine Mehl mitgerissen wird, während die gröberen Teile herabfallen und wieder zur Mühle gelangen. Da Windsichter nicht wie Siebe dem Verschleiß ausgesetzt sind, können sie mit gleichbleibender Genauigkeit arbeiten. Sie treten daher in Amerika trotz ihres hohen Kraftverbrauchs mit Sieben in erfolgreichen Wettbewerb. Windsichter brauchen nach einer amerikanischen Angabe 25 bis 50⁰/₀ des Kraftbedarfes der Mühle¹⁾. Durch Anordnungen nach Abb. 11, bei denen lange Zwischentransporte und mehrfache Richtungswechsel vermieden werden,

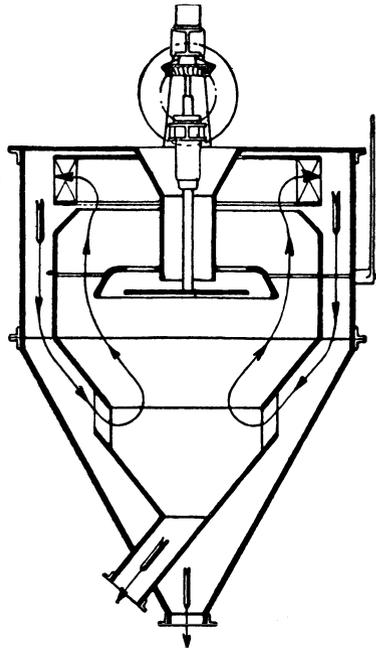


Abb. 12. Windsichter von Gebr. Pfeiffer in Kaiserslautern.

den, wird der Kraftbedarf niedriger und beträgt nach Mitteilungen von Gebr. Pfeiffer, Kaiserslautern, 0,35 bis 0,75 KWst pro 1 t Staub. Um zu vermeiden, daß Kohlenstaub aus den Windsichtern nach außen gelangt, werden diese häufig unter geringen Unterdruck gesetzt. Von einer Überlegenheit der Sieb- oder Windsichtung kann kaum die Rede sein. Windsichtung ist bei Mühlen, mit denen ein Ventilator organisch verbunden ist, oft das Naturgemäße, während sich die Siebsichtung den Rohrmühlen ohne weiteres gut anpaßt.

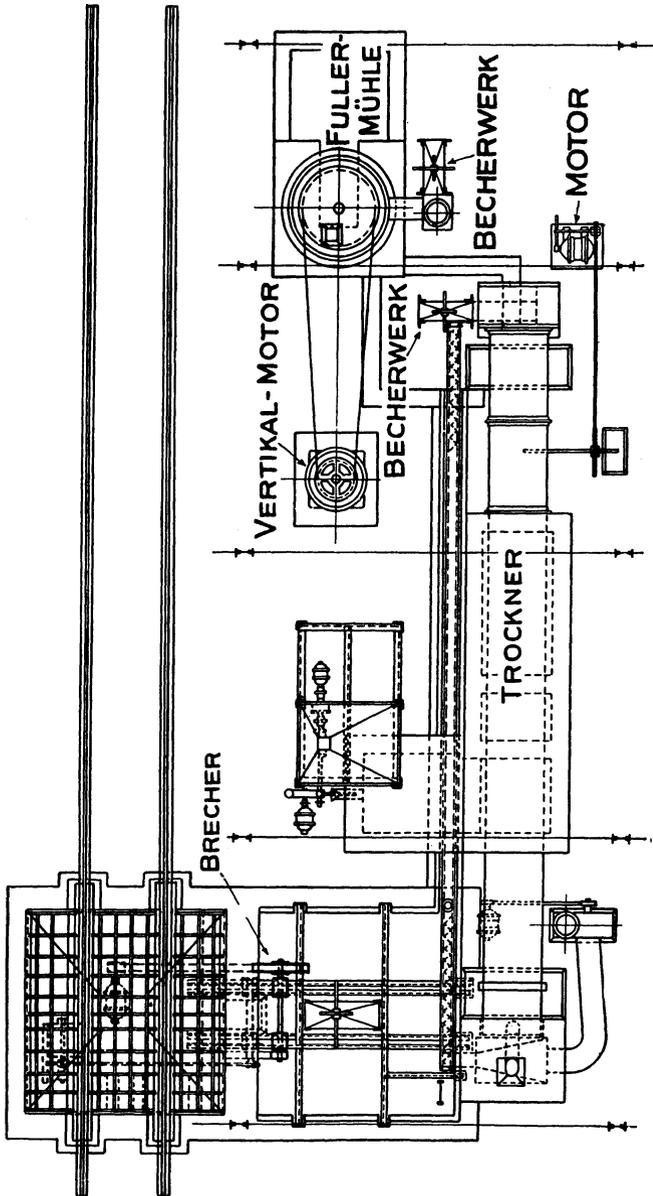
Die gleichmäßige Zuteilung der Kohle zu Trocknern und Mühlen geschieht durch besondere Speisevorrichtungen, die als Stoß-, Teller- oder Schüttelspeiser ausgebildet sind.

e) Anordnung und Betrieb der Aufbereitungsanlage.

1. Allgemeines. Die Anordnung der Aufbereitungsanlage wird durch ihre Größe, den zur Verfügung stehenden Raum und die Transportverhältnisse bedingt. Als Beispiel einer kleineren Anlage diene Abb. 13. Für die Herstellung von Braunkohlenstaub im großen auf

¹⁾ Harvey, The use of pulverized coal, S. 29.

der Grube dürfte die Anordnung von Trocknern und Maschinen ähnlich wie auf Brikettfabriken in besonderen Gebäuden zu wählen sein. Für Kleinverbraucher mit einer oder mehreren Feuerstellen und trocken angeliefertem Brennstoff kommen statt zentraler Aufbereitungsanlagen Mühlen nach Art der Kofino, Walther-Farner und Aeromühle in Betracht. Diese eignen sich auch für Versuchsanlagen.



M. ~ 1:150.

Abb. 13 a. Aufbereitungsanlage mit Schnellläufer für eine Leistung von 8 t/st. (Grundriß.)

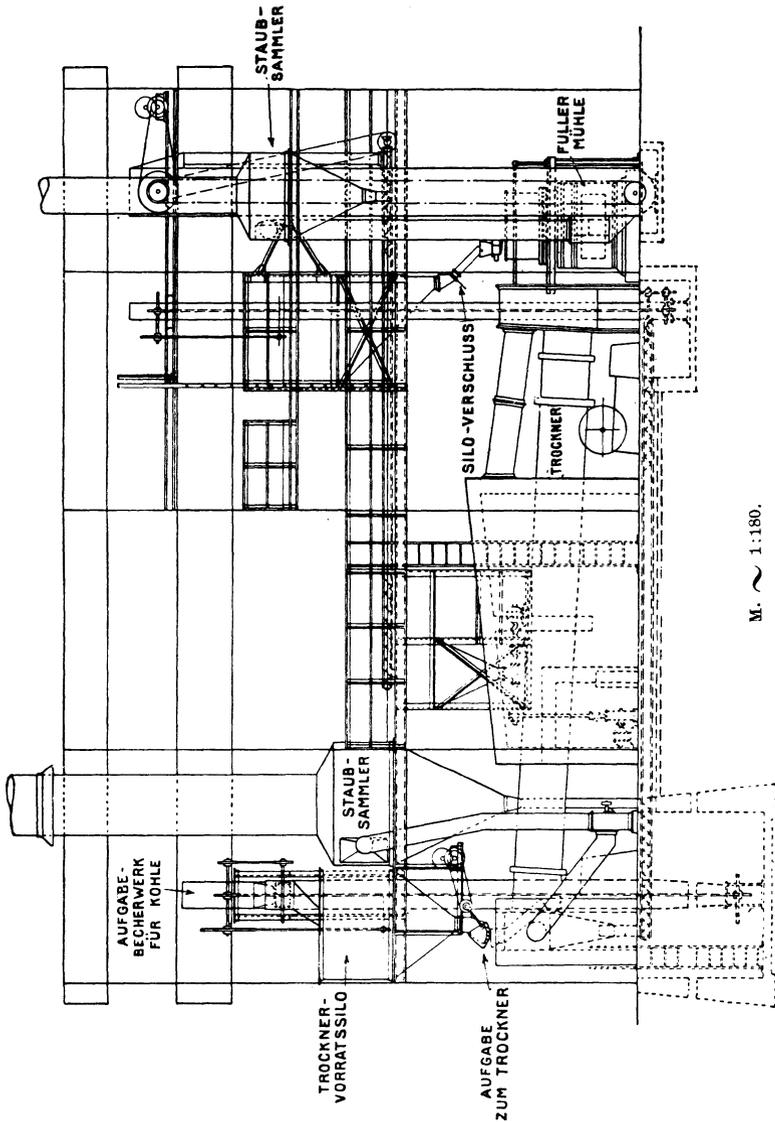


Abb. 13b. Aufbereitungsanlage mit Schnellläufer für eine Leistung von 8 t/st.

2. Entlüftung, Feuchtigkeit, Lagern. Neben genügender Abkühlung ist für hinreichende Entlüftung des Kohlenstaubes zu sorgen. Letztere findet in der Regel in Staubabscheidern (Zyklonen) oder Staubfiltern statt, die zwischen Mühle und Vorratsbehälter zu schalten sind und den Staub von der Luft und der durch Reibungswärme nachträglich verdampften Feuchtigkeit befreien. Diese würde sonst in die Vorratsbehälter mit übergehen, an den

kalten Wandungsflächen niederschlagen und Anhaften und Zusammenballung des Kohlenstaubes verursachen¹⁾. In diesem Zusammenhange sei das spezifische Gewicht von frischem Kohlenstaub erwähnt; es beträgt 0,56 bis 0,72, während das spezifische Gewicht von Stückkohle etwa 1,2 ist. Das deutet auf die Luftzwischenräume und das lockere Gefüge frischgemahlener Kohlenstaubes hin. Wird dieser geschüttelt, so sackt er derartig zusammen, daß sein spezifisches Gewicht sich auf 0,8 bis 0,9 erhöht. Dieser Zuwachs ist lediglich auf die Volumverkleinerung und nicht etwa auf Feuchtigkeitsaufnahme zurückzuführen; kommt die letztere noch hinzu, so würde das spezifische Gewicht weiterhin steigen. Trockner Kohlenstaub fließt zuweilen wie Wasser, sackt er dagegen zusammen oder wird er feucht, so wird er fest wie naß gewordenes Kochsalz. Man soll nicht außer acht lassen, daß Feuchtigkeit und langes Lagern die Entzündungsgefahr erhöhen. Trotzdem ist die in der Literatur wiederkehrende Behauptung, Kohlenstaub dürfe nicht über 24 Stunden gelagert werden, eine Verallgemeinerung, die nicht auf jede Kohlenart zutrifft; hier sei nur ein Fall erwähnt, in dem Lignitstaub aus Kalifornien 6 Monate in einem eisernen Behälter aufbewahrt wurde, ohne irgendwelche Symptome von Selbstentzündung zu zeigen²⁾. Hat man mit einer Kohle zu tun, die zur Selbstentzündung neigt, so ist allerdings Vorsicht geboten und eine fortlaufende Temperaturkontrolle im Vorratsbehälter zu empfehlen. Als allgemeine Regel kann gelten, daß Kohlenstaub in der Aufbereitungsanlage möglichst in Bewegung gehalten werden und nicht in übergroßen Vorratsbehältern lagern sollte, sondern baldigst den einzelnen Zwischenbunkern an den Feuerstätten zuzuführen ist. Dadurch wird erstens eine größere Sicherheit gegen Störungen im Transport von der Aufbereitungsanlage zu den Verbrauchern erzielt und zweitens die Gefahr der Selbstentzündung vermindert, die bei großen Behältern erheblicher ist als bei kleinen³⁾. Vorratsbehälter und Zwischenbunker werden aus Eisenblech oder bei pyrrhaltigen Kohlen besser aus Beton hergestellt⁴⁾; sie sollten mit einer genügenden Anzahl von Öffnungen versehen sein, um festgepackten Kohlenstaub losbrechen zu können.

3. Explosionsgefahr. Um der Explosionsgefahr des Kohlenstaubes vorzubeugen, muß die gesamte Aufbereitungsanlage gut ventiliert sein. Trockner und Mühlen sollten unter einem geringen Unterdruck stehen, damit kein Staub nach außen treten kann. Das

1) Siehe S. 11.

2) Chemical and Metallurgical Engineering, 31. März 1920, S. 606. — Journal of the Am. Soc. of Mech. Engineers, Oktober 1914, S. 360 f.

3) Harvey, The use of pulverized coal, S. 23.

4) Power, 15. März 1921, S. 429 f.

gleiche gilt für Becherwerke und Förderschnecken, die allseitig verschalt werden müssen; dabei ist die Bildung von Hohlräumen und Taschen, die als Staubfänger wirken, tunlichst zu vermeiden. Die Explosionsgefahr der mit Kohlenstaub angereicherten Luft in den Räumen der Aufbereitungsanlage wird vielfach überschätzt. Nicht jedes Gemisch von Luft und Kohlenstaub ist explosibel, bedarf es doch dazu bestimmter Mischungsverhältnisse. Man sollte sich jedoch auch auf eine gut ausgeführte Raumventilation nicht ausschließlich verlassen. In jeder Anlage gibt es Winkeleisen und Ecken, die von der Luft nicht umspült werden und gute Staubfänger sind. Es ist daher in Amerika vorgeschlagen worden, Aufbereitungsanlagen mit Vakuumpreinigern zu versehen, mit denen alle Teile, die als Staubfänger dienen können, zu erreichen sind. Auskehren mit Besen ist nur zulässig, wenn der Staub vorher angefeuchtet ist. Trockenraum, Mahlraum und Vorratsbehälter sollten durch Brandmauern voneinander getrennt sein. Die Überhitzung der Kohle in den Trocknern ist unbedingt zu vermeiden und der Einbau registrierender Pyrometer zu empfehlen. Hat eine Anlage mehrere Tage stillgestanden, so ist es ratsam, vor Inbetriebsetzung der nach den Verbrauchern führenden Transportstränge festzustellen, ob die Temperatur in den Vorratsbehältern nicht einen derartigen Grad angenommen hat, daß sich der Kohlenstaub entzünden kann, wenn er auf dem Transport mit der Luft in Berührung kommt. Bei einiger Vorsicht und Aufmerksamkeit kann von einer Explosionsgefahr kaum die Rede sein. Schwere Explosionen, die sich im Laufe der Jahre in amerikanischen Aufbereitungsanlagen zugetragen haben, sind in den meisten Fällen auf vermeidbare Undichtigkeiten und andere Fahrlässigkeiten zurückzuführen. In Deutschland liegen ja auch genügende Erfahrungen mit Aufbereitungsanlagen für Kohlenstaub in einer Anzahl von Zementfabriken vor, die bei Neuanlagen als Anhalt oder Vorbild dienen können.

f) Die Herstellungskosten von Kohlenstaub¹⁾.

Es werden folgende Daten der Berechnung zugrunde gelegt:

		Steinkohle	Braunkohle
Preis der angelieferten Rohkohle, frei Werk	Mk./t	350.—	50.—
Heizwert der angelieferten Rohkohle . .	WE/kg	6500	2000
Feuchtigkeit der angelieferten Rohkohle .	%	5	60
Feuchtigkeit des Kohlenstaubes	%	0,5	18

1. Steinkohle. Die Herstellungskosten für Steinkohlenstaub sind auf Tafel 3 für Aufbereitungsanlagen von 1 bis 40 t Stunden-

¹⁾ Nach dem Stande vom Sommer 1921.

leistung zusammengestellt. Die in Spalte b befindlichen Anlagekosten schließen Fundamente, Gebäude, Maschinen und Montage ein und sind für Anlagen von 1 bis 6 t Mittelwerte aus Kalkulationen deutscher Erbauer; für Leistungen über 6 t/st wurden die Anlagekosten in der Weise ermittelt, daß sie zu den Kosten der kleineren Anlagen in das gleiche Verhältnis gesetzt wurden, wie es sich bei amerikanischen Aufbereitungsanlagen von 1 bis zu 40 t Stundenleistung findet. Dies schien in Ermanglung deutscher Kalkulationen für größere Anlagen der einzige Weg zu sein, zumal da

Zahlentafel 3. (Steinkohle, 350 Mk. pro t.)

a	b	c	d	e	f	g	h	i	k	l	m	n	o
Leistung in t Kohlenstaub pro Stunde	Kosten der Anlage in Mill. Mk. ¹⁾	Bezugskosten der Kohle, bezogen auf 0,5% Feuchtigkeit ²⁾ Mk.	Kosten für Amortisation u. Verzinsung pro t Kohlenstaub ³⁾ Mk.	Kosten f. Heizkohle pro t Kohlenstaub ⁴⁾ Mk.	Kraftbedarf in KW st pro t Staub	Kraftkosten pro t Kohlenstaub ⁵⁾ Mk.	Reparatur pro t Kohlenstaub ⁶⁾ Mk.	Arbeiter pro Schicht	Arbeitslöhne pro t Kohlenstaub und Stunde ⁷⁾ Mk.	Aufbereitungskosten von 1 t Kohlenstaub (d + e + g + h + k) Mk.	Wärmepreis der Kohle im Anlieferungszustand (pro 1 Mill. WE) ⁸⁾ Mk.	Wärmepreis des Kohlenstaubes (pro 1 Mill. WE) ⁹⁾ Mk.	Wärmepreis nach der Aufbereitung in % von m
1	0,5	367,0	15,6	5,6	45	36,0	rd. 6,0	2	14,0	77,20	53,8	64,7	120
2	1,2		18,7		35	28,0		3	10,50	68,80		63,4	118
4	1,7		13,4		25	20,0		3	5,25	50,25		60,7	113
6	2,0		10,4		20	16,0		4	4,66	42,66		59,6	111
8	2,2		8,6		18	14,4		4	3,50	38,10		59,0	110
10	2,4		7,5		17	13,6		4	2,80	35,50		58,6	109
15	3,0		6,2		17	13,6		4	1,87	33,27		58,3	108
20	3,5		5,4		17	13,6		5	1,75	32,35		58,1	108
25	4,0		5,0		17	13,6		6	1,68	31,88		58,0	108
30	4,5		4,7		17	13,6		7	1,63	31,53		58,0	108
35	5,0		4,5		17	13,6		8	1,60	31,30		58,0	108
40	5,6		4,4		17	13,6		8	1,40	31,00		57,9	108

¹⁾ Anlagen von 2 t Stundenleistung und darüber sind mit Brandmauern zwischen Trocknern und Mühlen versehen.

²⁾ Bei 5% Feuchtigkeit im Anlieferungszustand und Trocknung auf 0,5% ($\frac{350,0}{0,955} = 367,0$ Mk.).

³⁾ Bei 15% des Anlagekapitals, 2 Schichten zu je 8 Stunden und 300 Arbeitstagen im Jahr.

⁴⁾ Bei Trocknung von 5% auf 0,5% Feuchtigkeit und 6500 WE der Heizkohle sind gemäß S. 20 ca. 1,6% der angelieferten Kohle erforderlich ($0,016 \cdot 350,0 = 5,60$ Mk.).

⁵⁾ Bei 0,80 Mk. pro KWst.

⁶⁾ Nach Mitteilungen deutscher Kohlenstaubmahlanlagen auf Zementfabriken.

⁷⁾ Bei 7,0 Mk. Stundenlohn.

⁸⁾ Bei 6500 WE/kg der angelieferten Kohle.

⁹⁾ Bei 6870 WE/kg des Kohlenstaubes (Heizwerterhöhung infolge Trocknung).

die schwankenden Valutaverhältnisse eine Umrechnung von Dollar in Mark verboten.

Ferner wurde zweischichtiger Betrieb = 16 Stunden angenommen. Für andere Betriebszeiten lassen sich die Werte in Reihe d und k leicht aus den angegebenen Zahlen ermitteln. Die Trocknung gehe in Trommeltrocknern vor sich, die mit der angelieferten Kohle beheizt werden. Von Interesse sind die unter l aufgestellten Aufbereitungskosten, sowie die unter m bzw. n befindlichen Wärmepreise. In der letzten Reihe der Tafeln ist die Zunahme des Wärmepreises infolge des Aufbereitungsvorganges angegeben; diese Werte liegen bei Steinkohle zwischen 20 und 8 $\frac{0}{0}$. Die unter m, n und o gegebenen Ziffern sind für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit der Kohlenstaubfeuerung von Wert.

2. Braunkohle. Man muß grundsätzlich unterscheiden zwischen Grubenaufbereitung, bei welcher der Staub ähnlich wie in Briekettfabriken auf der Grube hergestellt wird, und Werksaufbereitung, bei welcher die von der Grube bezogene feuchte Rohkohle erst am Verbrauchsort zu Staub verarbeitet wird.

a) Grubenaufbereitung. Zum Vergleich des Heiz- und Kraftbedarfs zweier Aufbereitungsanlagen für Braunkohlenstaub, von denen die eine mit Gleichstromtrommeltrockner und Rohkohlenheizung, die andere mit Abdampf geheizten Röhrentrocknern ausgerüstet ist, diene die folgende Rechnung:

Aufbereitungsanlage A.

Trocknung durch Trommeltrockner; Mahlung mittels gekaufter elektrischer Kraft.

a) Trocknung. Um Rohkohle von 60 auf 18 $\frac{0}{0}$ Feuchtigkeit herabzutrocknen, sind 1045 kg Wasser pro 1 t Braunkohlenstaub auszutreiben. Dies erfordert gemäß S. 22 einen Wärmehaufwand von $1045 \cdot 1020 = 1065900$ WE pro 1 t Braunkohlenstaub.

b) Kraftbedarf. Schätzungsweise sind für Förderung, Abraumbetrieb, Wasserhaltung sowie für Trocknung, Mahlung und Transport innerhalb der Aufbereitungsanlage etwa 40 KWst pro 1 t Braunkohlenstaub erforderlich. Nimmt man an, daß die aus dem Kraftwerk bezogene KWst aus 8000 WE der Rohkohle hergestellt wird, so beträgt der Wärmehaufwand $40 \cdot 8000 = 320000$ WE pro 1 t Braunkohlenstaub.

Der gesamte Wärmehaufwand pro 1 t Braunkohlenstaub ist daher $1065900 + 320000 = 1385900$ oder rd. 1,4 Mill. WE.

Aufbereitungsanlage B.

Die Trocknung gehe in Röhrentrocknern vor sich. Der Kraftbedarf der Anlage werde von einer Dampfmaschine oder Turbine

bestritten, die gesättigten Dampf von 7 auf 3 at Überdruck entspanne. Der Abdampf werde den Röhrentrocknern zugeführt und in diesen zu Wasser von 110° kondensiert.

a) Dampfbedarf für Kraft. Rechnet man wie bei Anlage A mit einem Kraftbedarf von 40 KWst pro 1 t Braunkohlenstaub, so beträgt unter Annahme adiabatischen Wärmegefälles von 30,1 WE¹⁾, eines Gütegrades von 0,7 und eines mechanischen Wirkungsgrades von 0,8 der Dampfbedarf $\frac{860,5 \cdot 40}{30,1 \cdot 0,7 \cdot 0,8} = \text{rd. } 2040 \text{ kg Dampf pro 1 t Braunkohlenstaub.}$

b) Dampfverbrauch für Trocknung. Gemäß S. 23 sind zur Trocknung von 60°/o auf 18°/o Feuchtigkeit 1935 kg trocken gesättigten Dampfes von 3 at Überdruck pro 1 t Braunkohlenstaub erforderlich. Unter Berücksichtigung einer Dampfeuchtigkeit von 0,956¹⁾ stehen zur Verfügung $2040 \cdot 0,956 = 1950 \text{ kg Abdampf von 3 at Überdruck.}$ Die Trocknung wird also durch Abdampf vollständig bestritten.

Zur Erzeugung von 2040 kg trocken gesättigten Dampfes von 7 at Überdruck und einer Gesamtwärme von 662 WE sind bei einer Speisewassertemperatur von 80° und einem gesamten Kesselwirkungsgrad von 60°/o erforderlich: $\frac{2040(662 - 80)}{0,6} = \text{rd. } 1,98 \text{ Mill. WE.}$

Der gesamte Wärmearaufwand pro 1 t Braunkohlenstaub beträgt also bei Anlage B 1,98 Mill. WE gegenüber 1,4 Mill. WE bei Anlage A.

Anlage A ist daher die thermisch bessere und besitzt gegenüber Anlage B einen um rd. 30°/o niedrigeren Wärmearaufwand. Anlage A stellt sich ferner in den Anlagekosten wegen des elektrischen Antriebes billiger, an dessen Stelle bei B Dampfkessel und Dampfmaschinen oder Turbinen treten. Will man den Kohlenstaub in großen Zentralmahlanlagen herstellen, so wäre bei einer Anordnung gemäß A die elektrische Zentrale mit Kondensationsanlage einzubeziehen, und die Anlagekosten dürften dann etwa die gleichen wie bei B sein.

Unter Annahme einer Trocknung von 18°/o ist der Heizwert von Staub und Briketten etwa der gleiche. Die Erzeugung der letzteren erfordert einen Wärmearaufwand von 1,9 bis 2 Mill. WE/t. Anlage B ist daher einer Brikettfabrik thermisch etwa gleichwertig, Anlage A dieser überlegen. Da die Erstellungskosten einer Brikettfabrik und einer großen Aufbereitungsanlage ungefähr die gleichen sein müssen, so kann man annehmen, daß die Herstellungskosten von 1 t

¹⁾ Siehe J-S-Tafeln für Wasserdampf.

bezw. 1 Mill. WE. in Staubform bei Anlage B die gleichen, bei Anlage A niedriger als für die entprechenden Beträge in Brikettform sind. Eine weitere Verbilligung träte ein, wenn es gelänge, bei Anlage A Abhitze zum Trocknen zu verwenden.

β) Werksaufbereitung. Da noch keine eigens für Braunkohlenstaub durchgebildeten Aufbereitungsanlagen vorliegen, die zu mehr als Versuchszwecken dienen, so sind die Herstellungskosten schwer zu errechnen. Um wenigstens zu einem Begriff der fraglichen Größenordnungen zu kommen, sei folgendes angenommen: Wenn Rohkohle von 60% Feuchtigkeit 50,— Mk. frei Werk kostet, so errechnet sich der Preis der auf 18% getrockneten Rohkohle analog Spalte c der Zahlentafel 3 zu 102,— Mk. Bei Gleichstrom-Trommel-trocknern ist laut S. 21 der Rohkohlenheizaufwand 260 kg/t zu trock-

nender Kohle oder $\frac{260}{0,488}$ kg/t Staub; der Preis der Heizkohle ist $= \frac{0,260}{0,488} \cdot 50 = 26,6$ Mk./t. Unsicherheit besteht bezüglich der An-

lagekosten und des Kraftaufwandes zum Mahlen; es seien daher dieselben Werte wie bei Steinkohle angenommen; dies ist erlaubt, weil selbst ein beträchtlicher Irrtum den Gesamtpreis pro t nicht stark beeinflussen würde. Geht man analog Tafel 3 vor und nimmt ferner die Reparaturen zu 4,— Mk./t an, so ist bei dreischichtigem Betrieb der Wärmepreis pro Mill. Staub-WE. 41,8 Mk. bei 1 t und sinkt bis auf 31,7 Mk. bei 40 t Stundenleistung. Beträgt gleichzeitig der Marktpreis für Brikette 170,— Mk./t, so ist deren Wärmepreis 35,8 Mk. pro 1 Mill. WE. Der Staub ist daher bei kleinen Aufbereitungsanlagen etwas teurer, bei großen etwas billiger als Brikette. Eine Verbilligung träte bei Verwendung von Abhitze zum Trocknen ein. Als Mittelding zwischen α und β wäre die Trocknung auf der Grube (etwa in Brikettfabriken) und die Mahlung auf dem Werk zu erwägen, wenn dadurch die Transportkosten wesentlich verringert werden können.

III. Die Beförderung und Verteilung des Kohlenstaubes.

a) Allgemeines.

Die Entwicklung der Kohlenstaubfeuerung drängt zu großen, wirtschaftlich arbeitenden Zentralmahlanlagen, die nach Art der elektrischen Energieverteilung zweckmäßig im Schwerpunkt des Verbrauchernetzes anzulegen sind. Derartige Netze kommen nicht nur für große Fabriken oder Hüttenwerke in Betracht, sondern können

auch zur Speisung von kleinen, selbständigen Betrieben — etwa der Kleisenindustrie — von einer gemeinsamen Aufbereitungsanlage aus dienen. Eine wirtschaftliche und betriebssichere Beförderung des Kohlenstaubes wird daher zu einem wichtigen Erfordernis und hat neben der Trocken- und Mahlfrage die größte Bedeutung für die Lebensfähigkeit der Kohlenstaubfeuerung. Kohlenstaub kann auf mechanischem oder pneumatischem Wege befördert werden.

b) Die mechanische Beförderung.

Die mechanische Beförderung geschieht durch Förderschnecken, welche den Kohlenstaub den über den Verbrauchsstellen befindlichen Zwischenbunkern, zuweilen auch unmittelbar dem Brenner selbst zuführen. Durch einen Strang können mehrere Verbraucher gespeist werden, und etwaige Brennstoffüberschüsse zu den Vorratsbehältern ebenfalls durch Förderschnecken zurückbefördert werden. Bei Förderlängen von mehr als rd. 100 m ist eine Unterteilung des Stranges zweckmäßig. Förderschnecken sollten staub- und luftdicht eingekapselt sein. Sie passen sich den örtlichen Verhältnissen nicht immer leicht an, sind für winkelig ausgelegte Stränge schlecht geeignet und werden wegen der vielen beweglichen Teile und Lager bei längeren Entfernungen teuer und unhandlich. Für kurze Strecken sind sie dagegen wegen ihrer Betriebssicherheit und des geringen Kraftbedarfes durchaus brauchbar. Letzterer kann bei normalen Ausführungen für je 10 t und je 10 m horizontale Förderlänge zu 0,3 bis 0,5 KWst angenommen werden. Steigungen von mehr als 15° sind zu vermeiden, weil sonst der Kohlenstaub über die Schneckengänge fließen kann.

Außer durch Förderschnecken ist der Transport in Röhren versucht worden, in welchen der Kohlenstaub durch Mitnehmerscheiben, die an einem Kabel gezogen werden, gefördert wird.

Zu den mechanischen Beförderungsmethoden gehört ferner der Transport in Fässern oder Behälterwagen¹⁾. Abb. 14 zeigt einen derartigen Wagen der schwedischen Staatsbahnen zum Transport von Torfstaub. Allseitig geschlossene Wagen sind mehr wegen der Gefahr des Fortfliegens des Staubes als wegen der Durchnässung bei Regenwetter erforderlich. Es hat sich gezeigt, daß nieder-rheinischer Braunkohlenstaub, der monatelang Wind und Wetter ausgesetzt war, völlig trocken blieb; der Staubhaufen wies nur an der

¹⁾ In Minneapolis (Minn.) hat sich eine Gesellschaft gebildet, welche Kohlenstaub herstellt und in Behälterwagen an Kleinverbraucher vertreibt. In ähnlicher Weise wird Kohlenstaub in Seattle (Wash.) von einer benachbarten Lignit-Grube an kohlenstaubgefeuerten Heizanlagen vertrieben.

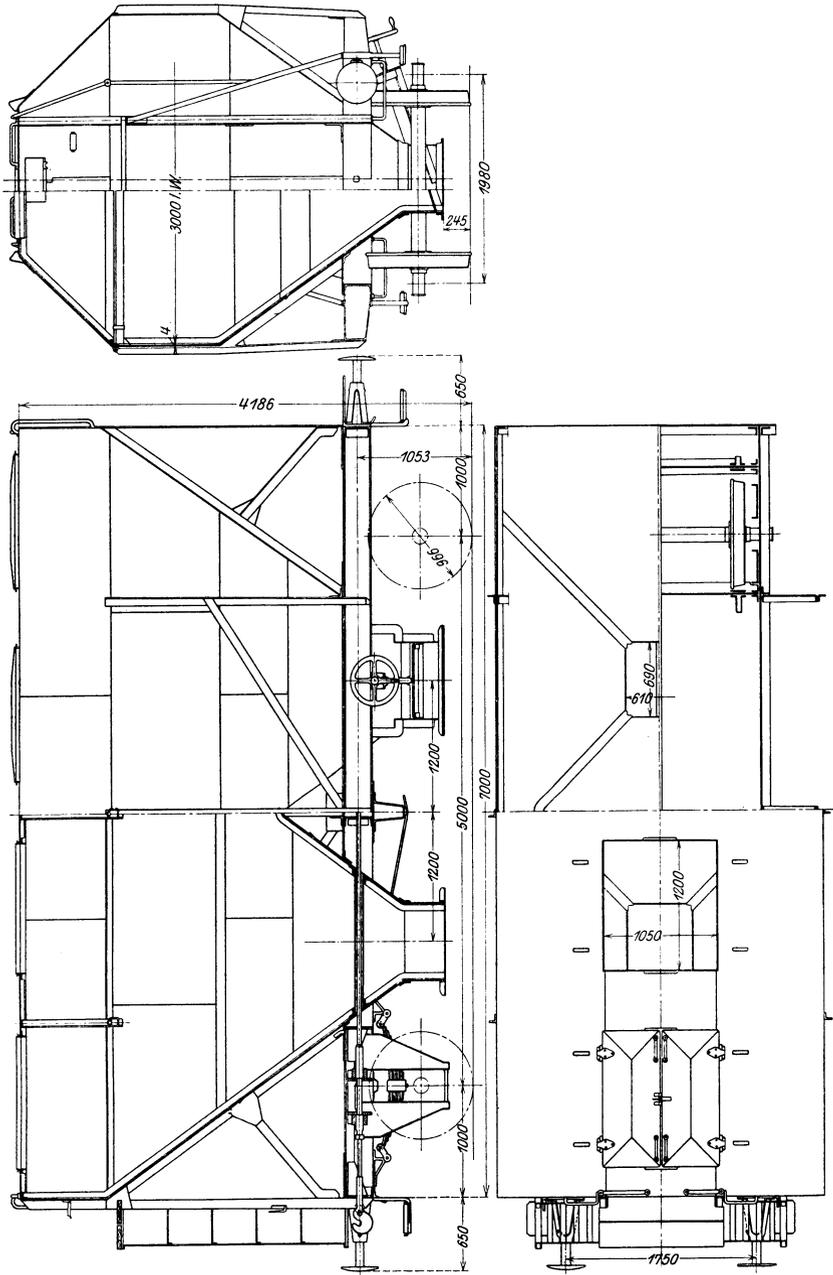


Abb. 14. Torfpulverwagen der schwedischen Staatsbahnen.
Gewicht des Wagens 10,7 t, Ladefähigkeit 15 t, Rauminhalt 45 cbm.

Oberfläche eine dünne, offenbar undurchlässige, feuchte Schicht auf. Die gleiche Beobachtung machte der Verfasser kürzlich bei Steinkohlenstaub aus einer Kohlenwäsche.

c) Die pneumatische Beförderung.

Bei der pneumatischen Beförderung sind im wesentlichen drei verschiedene Verfahren zu unterscheiden: Das Niederdruck-, Hochdruck- und Emulsionssystem. Das letztere ist streng genommen kein pneumatisches Verfahren, sondern stellt eine Kombination von mechanischer und pneumatischer Beförderung dar.

1. Das Niederdrucksystem. Beim Niederdrucksystem wird der Kohlenstaub einer Förderleitung zugeführt und durch den von einem Ventilator erzeugten Windstrom mitgerissen. Um den Kohlenstaub in der Schwebelage zu halten, muß die Geschwindigkeit $\simeq 25$ m/sec sein und ein von der Windgeschwindigkeit abhängiges Verhältnis von Kohlenstaub zu Luft innegehalten werden. Dieses beträgt je nach Ausführung 2,5 bis 5 cbm¹⁾ Luft pro 1 kg Kohlenstaub und würde etwa $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{2}$ der gesamten zur Verbrennung nötigen Luftmenge entsprechen. Niederdruckleitungen haben Rohrdurchmesser von 8 bis 50 cm l. W., sind meist aus galvanisierten, spiralgenieteten Blechen hergestellt, passen sich den örtlichen Verhältnissen besser an als Förderschnecken und eignen sich für Übertragungen auf Entfernungen bis zu etwa 600 m. Durch Einschaltung weiterer Ventilatoren läßt sich die Förderweite beliebig vergrößern. Der Kraftverbrauch ist größer als bei Förderschnecken. Nachteilig ist der schnelle Verschleiß der Ventilatorflügel.

Von dem Niederdruckverfahren wird bei der auf Seite 27 beschriebenen Kofino-, der Walther-Farner-, der Aeromühle und dem auf Seite 125 erwähnten Bettington-Kessel Gebrauch gemacht. In diesen Fällen ist nur ein einzelner Verbraucher an die Rohrleitung angeschlossen, und eine Regelung von Brennstoff- und Luftzufuhr von Hand nach Maßgabe des jeweiligen Verbrauches der Feuerung zu bewirken. Sollen mehrere Verbraucher von einer Leitung versorgt werden, so ist natürlich an eine derartige Regelung nicht mehr zu denken. Es kann ja der Fall eintreten, daß von allen angeschlossenen Verbrauchern nur einer zur Zeit gespeist werden soll, und daß die dabei auftretende, vom Ventilator geförderte Luftmenge nicht mehr genügt, den Kohlenstaub in der Schwebelage zu halten. Um unbeschadet des jeweiligen Verbrauches die zur Förderung des Kohlenstaubes nötige Mindestgeschwindigkeit in der Leitung aufrechterhalten zu können, ist man auf den Gedanken der Ringleitung verfallen, bei der ein etwaiger Überschuß an Kohlenstaub und Luft zur Aufbereitungsanlage zurückbefördert wird. Ringleitungen werden bei den Bauarten von Holbeck und Covert verwandt.

¹⁾ Herington, Powdered coal as a fuel New York 1920, S. 223; Engineering, 25. Juli 1919, S. 125f.; Journal of the A. S. of M. E., September 1919.

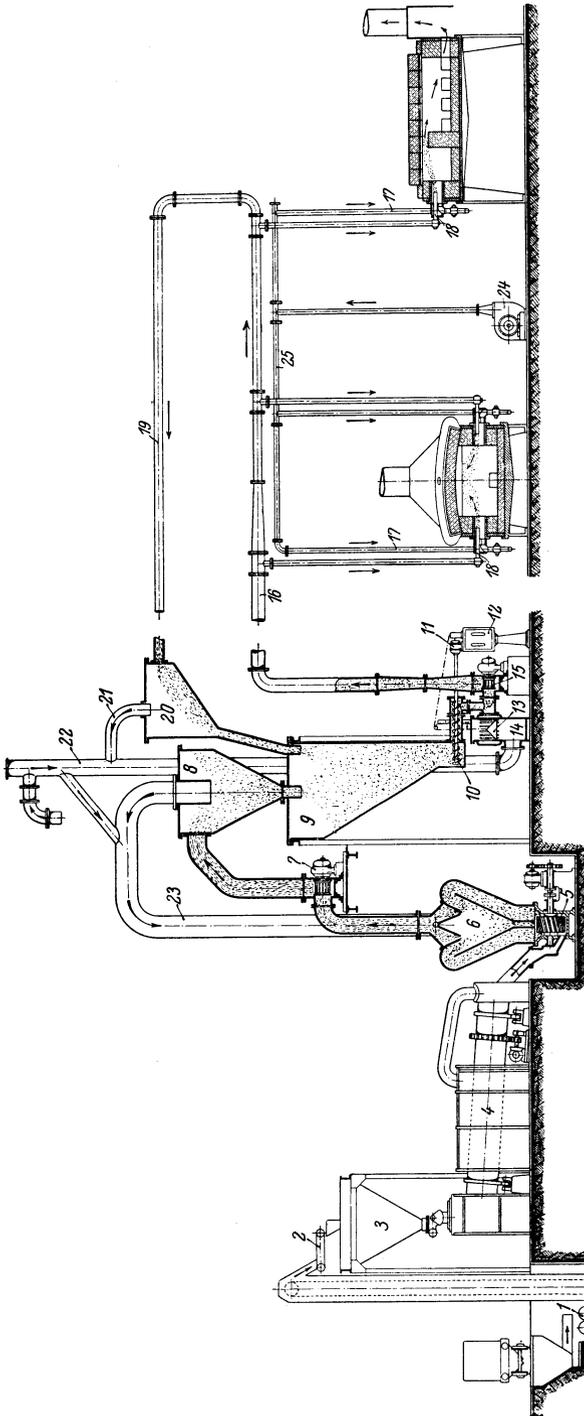


Abb. 15. Schema einer Kohlenstaubfeuerungsanlage mit Niederdruckförderung, Bauart Holbeck, für Kleinschmiedöfen.
(Nicht maßstäblich gezeichnet.)

- 1 = Brecher, 2 = Magnetausseider, 3 = Bunker für Rohkohle, 4 = Trockner, 5 = Mühle, 6 = Windsichter, 7 = Ventilator für Windsichter, 8 = Staubabscheider, 9 = Sammelbunker für Trockenkohle, 10 = Zuteilschnecke, 11 = Antriebsmotor, 12 = Elektrischer Drehzahlregler, 13 = Regulierkegel, 14 = Reguliergehäuse für Suspensionsluft, 15 = Zentralverteilventilator, 16 = Verteilleitung, 17 = Abzweigungen, 18 = Brenner, 19 = Rückführung, 20 = Absetzbunker, 21 = Lufrückführung, 22 = Frischluftleitung, 23 = Lufrückleitung zur Mühle, 24 = Ventilator für Sekundärluft, 25 = Verteilleitung für Sekundärluft.

Eine Aufbereitungsanlage und Niederdruckförderung mit Ringleitung nach Holbeck ist in Abb. 15 dargestellt¹⁾. Der Kohlenstaub gelangt von der Bonnotmühle 5 über Windsichter 6 und Ventilator 7 zum Staubabscheider 8; die abgesonderte Luft kehrt durch 23 zum Windsichter zurück, während das Mahlgut in den Vorratsbehälter 9 fällt. Aus diesem wird der Kohlenstaub durch eine Förderschnecke 10 dem Ventilator 15 zugeführt und in die Verteilungsleitung 16 zu den Verbrauchern befördert; der nicht gebrauchte Kohlenstaub gelangt durch die Rückleitung 19 und den Staubabscheider 20 in den Vorratsbehälter zurück, während die Förderluft wieder durch Rohr 21 nach dem Saugstutzen des Windsichters 6 geleitet wird. Der Querschnitt der Rückleitung muß so bemessen sein, daß die Geschwindigkeit in allen Punkten der Ringleitung 16, 19 selbst bei Außerbetriebsetzung aller angeschlossenen Verbraucher genügt, den Kohlenstaub in der Schwebe zu halten. Um das Verhältnis von Luft:Brennstoff bei veränderlichem Verbrauch selbsttätig konstant zu halten, ist in den Luftkreislauf eine Kammer 14 eingeschaltet, in der sich eine Glocke 13 freischwiegend bewegt, und die je nach der in der Leitung herrschenden Windgeschwindigkeit unter Einfluß des Winddruckes eine höhere oder tiefere Lage in der Kammer einnimmt. Die Bewegung der Glocke wird auf einen Kontaktarm eines Rheostaten übertragen, welcher seinerseits die Geschwindigkeit des die Förderschnecke treibenden Elektromotors 11 nach Maßgabe der jeweiligen, durch den Verbrauch der eingeschalteten Brenner bedingten Luftgeschwindigkeit regelt²⁾.

Bei der Bauart Covert (Abb. 16) kehrt der überflüssige Kohlenstaub unmittelbar zum Saugstutzen des Ventilators zurück. Der

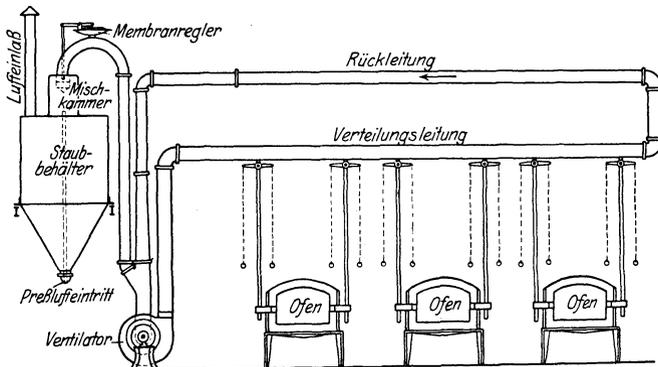


Abb. 16. Niederdruckförderung. Bauart Covert³⁾.

¹⁾ Iron Age, 20. Juli 1916, S. 134 f.; die dort gezeigte Ringleitung ist 650 m lang. ²⁾ Iron Age, 24. April 1919, S. 1068.

³⁾ Nach Harvey, Pulv. coal as a fuel.

Brennstoffbedarf wird durch die über dem Hauptvorratsbehälter befindliche Mischkammer ergänzt, in welche Kohlenstaub mittels Injektors und Preßluft geblasen wird und durch ein Regulierventil zum Ventilator gelangt. Die Regelung geschieht durch eine mit der Saugleitung in Verbindung stehende Membran. Im Gegensatz zur Bauart Holbeck bleibt der Kohlenstaub in der Schwebe, nachdem er sich einmal mit der Luft vermischt hat. Eine Schichtenbildung von gröberem und feinerem Kohlenstaub, wie sie angeblich bei der Holbeckschen Anordnung durch Ablagerung des aus der Rückleitung wiederkehrenden Kohlenstaubes auftritt, kann daher bei der Bauart Covert nicht stattfinden¹⁾.

Zwischenbunker und maschinelle Anlagen an der Verbrauchsstelle fallen bei der Anordnung von Covert und Holbeck fort. Darin liegt ein Vorteil, vor allem dort, wo eine größere Anzahl kleiner Feuerungen (Kleinschmiedeöfen) von einer gemeinsamen Zentrale gespeist werden sollen und wo der Verbrauch keinen starken Schwankungen ausgesetzt ist. Übersteigen diese eine gewisse Grenze, so wird ihnen die selbsttätige Regelung von Luft:Brennstoff nicht mehr folgen können; man könnte dann das System durch Vergrößerung der Ringleitungsquerschnitte gegen starke Belastungsänderungen unempfindlicher machen, müßte dabei aber höheren Kraftverbrauch in Kauf nehmen.

Die Explosionsgefahr ist bei Niederdruckförderung nicht von der Hand zu weisen. Nicht nur Undichtigkeiten in der Rohrleitung können explosible Gemische in den Arbeitsräumen verursachen, sondern die Mischung in der Rohrleitung selbst kann innerhalb der Grenzen liegen, bei denen Kohlenstaub explosibel ist. Explosionen in den Rohrleitungen können sich über die gesamte Anlage verbreiten und dadurch sehr verheerend wirken. Dem sucht Holbeck durch hohe Windgeschwindigkeiten und kohlenstaubreiche Mischungen entgegenzuwirken. Jedenfalls erfordert die Niederdruckförderung gute Instandhaltung und sorgfältige Bedienung.

2. Das Hochdrucksystem. Beim Hochdrucksystem drückt Preßluft von 1 bis 7 at Überdruck den Kohlenstaub wie eine Flüssigkeit von den Vorratsbehältern durch Röhren zu den Zwischenbunkern. Eine intensive Mischung von Luft und Kohlenstaub wie bei 1. findet daher nicht statt. Die Vorratsbehälter (Abb. 17) werden mit Kohlenstaub gefüllt, luftdicht abgeschlossen, mittels eines Kompressors unter Druck gesetzt und mit der Rohrleitung nach den Zwischenbunkern verbunden¹⁾²⁾. Diese sind mit Luftabscheidern versehen, um Förderluft und Kohlenstaub zu trennen. Um kontinuier-

¹⁾ Engineering, 25. Juli 1919, S. 125 f. ²⁾ Iron Age, 11. Dez. 1919, S. 1167f.

lich arbeiten zu können, sind zwei Vorratsbehälter erforderlich. Die Förderleitungen haben einen Durchmesser von 50 bis 150 mm l. W. Parallel zu ihnen läuft eine Druckluftleitung, welche mit der Förderleitung an verschiedenen Stellen verbunden ist und bei Verstopfungen zum Ausblasen dient. Förderweiten bis zu 1400 m sind bereits im

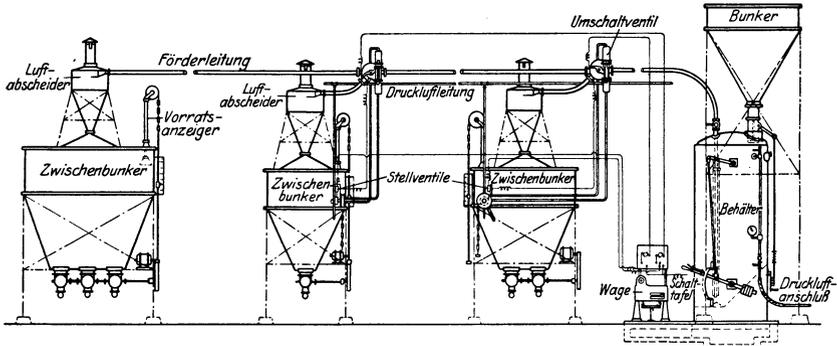


Abb. 17. Hochdruckförderung. Bauart Quigley¹⁾.

Betrieb. Der Druckluftbedarf beträgt 220 bis 56 cbm/t bei 1 bis 3,5 at und 45 bis 35 cbm/t bei 5 bis 7 at Überdruck. In einem Werk wurden z. B. 1,3 t durch eine 180 m lange Leitung von 100 mm l. W. mit einem Überdruck von rd. 1 at in 1 Minute befördert. Auf Grund der obigen Daten kann man für eine mittlere horizontale Förderweite von 150 bis 200 m einen Kraftbedarf von 4 bis 7 KWst pro t Staub annehmen. Die Förderleitungen schmiegen sich den örtlichen Raumverhältnissen leicht an. Eine Explosionsgefahr liegt beim Hochdrucksystem nicht vor, weil Luft und Kohlenstaub nicht gemischt werden.

3. Das Emulsionssystem. Das Emulsionssystem beruht darauf, daß Kohlenstaub, wenn er unter Zutritt von geringen Mengen Luft umgerührt wird, einer wäßrigen Lösung ähnelt und wie eine solche durch Röhren befördert werden kann. Hiervon wird in der Fuller-Kinyon-Pumpe Gebrauch gemacht, die in Abb. 18 schematisch dargestellt ist. Der Kohlenstaub gelangt durch Trichter und Fallrohr vor eine schnellrotierende, von einem Motor mittels Riemscheibe angetriebene Schnecke und wird von dieser in die Mischdüse befördert, wo mit Hilfe einer Anzahl am Umfang angebrachter Luftdüsen die „Emulsion“ des Kohlenstaubes erzeugt wird. Dieser wird sodann unter dem von der Schnecke erzeugten Druck in die Förderleitung gepumpt. Die der Mischdüse zugeführte Luft steht je nach der Förderlänge unter einem Überdruck von 1 bis $3\frac{1}{2}$ at. Eine

¹⁾ Nach Harvey, Pulv. coal as a fuel.

Abscheidung des Kohlenstaubes von der Luft über den Zwischenbunkern ist wegen der geringen Luftmenge, die dem Kohlenstaub beigemischt ist (15 bis 20 cbm pro t Staub), nicht erforderlich. Das Emulsionsverfahren ist noch zu neu, als daß bereits praktische Erfahrungen damit vorliegen könnten. Nach Mitteilungen der Her-

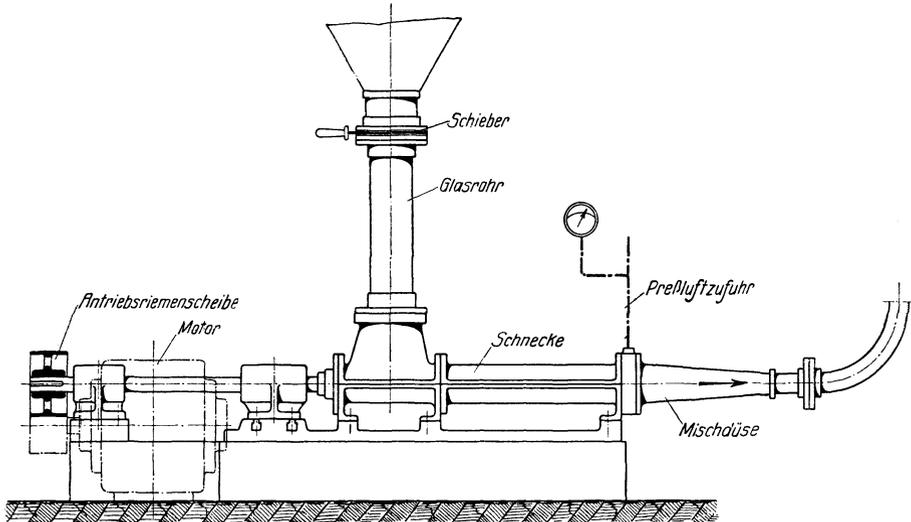


Abb. 18. Fuller-Kinyon-Pumpe¹⁾.

steller genügt für eine Förderleistung von 10 t pro Stunde ein Rohr von 100 mm, und für eine Leistung bis zu 25 t pro Stunde ein solches von 130 mm l. W. Der Kraftbedarf soll bei mittleren Entfernungen nicht größer und bei großen Entfernungen sogar geringer als bei anderen Systemen sein.

d) Vergleich der Förderungssysteme.

Über den Kraftbedarf liegen zur Zeit noch keine genauen Angaben und Messungen vor. Die Förderung durch Förderschnecken ist betriebssicher und eignet sich für kurze Entfernungen und gerade Linienführung. Das Niederdruckverfahren von Holbeck und Covert schmiegt sich den örtlichen Verhältnissen leicht an. Die Abwesenheit von Zwischenbunkern und maschinellen Einrichtungen an der Verbrauchsstelle ist insofern ein Vorteil, als sie eine wesentliche Vereinfachung darstellt, und ein Nachteil, weil alle Verbraucher bei Betriebsstörungen in der zentralen Verteilungsstelle in Mitleidenschaft gezogen werden. Alle Niederdruckförderungen bergen eine gewisse Explo-

¹⁾ Aus Münzinger, Kohlenstaubfeuerungen. 1921. Verlag von Julius Springer, Berlin.

sionsgefahr in sich. Ihr Anwendungsgebiet dürften Betriebe mit ziemlich gleichbleibenden Belastungsverhältnissen und nicht allzuweit verteilten und ausgedehnten Zweigen sein. Das Hochdruckverfahren hat mit dem Niederdruckverfahren Anschmiegarkeit der Linienführung gemein, dürfte aber in der Anlage teurer ausfallen. Es zeichnet sich durch seine Betriebssicherheit aus, sowohl was Unabhängigkeit von Störungen in der Aufbereitungsanlage, als auch Explosionsgefahr angeht. Es eignet sich für Übertragungen großer Kohlenstaubmengen, für große Entfernungen, häufig verzweigte Leitungen und für Betriebe, die starke Belastungsschwankungen und Spitzenlasten aufweisen oder feine Regulierung der Feuerung erheischen.

IV. Die konstruktiven Elemente der Feuerungen.

a) Die Kohlenstaubspeisevorrichtungen.

Diese haben den Zweck, den Kohlenstaub aus den Zwischenbunkern zu entnehmen und in bestimmten, regelbaren Mengen den Brennern zuzuführen. Die Speisung erfolgt meistens mechanisch, seltener pneumatisch. Zu den mechanischen Speisevorrichtungen gehören:

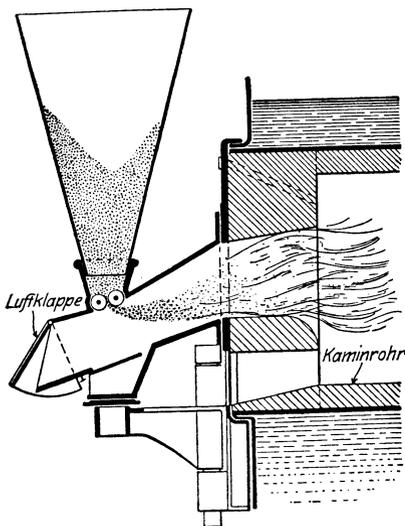


Abb. 19. Beschickung von Pinther¹⁾.

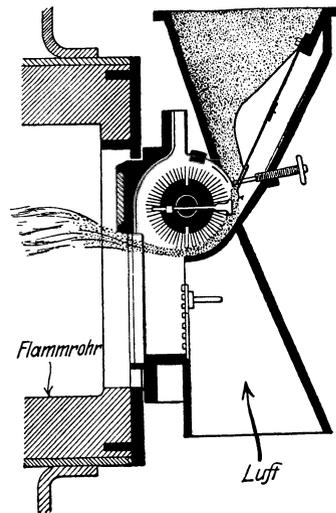


Abb. 20. Beschickung von Schwartzkopff¹⁾.

Die Beschickung von Pinther (Abb. 19). Der Kohlenstaub wird zwischen zwei mit veränderlicher Tourenzahl laufenden Rollen

¹⁾ Nach Herington, Powdered coal as a fuel.

durchgeführt und von dem unter der Luftklappe eintretenden natürlichen Zuge in die Feuerung mitgerissen. Diese Konstruktion hat wegen geringer Speiseleistung, engen Regelbereiches und unvollkommener Mischung von Brennstoff und Luft keine Verbreitung finden können.

Die Beschickung von Schwartzkopff (Abb. 20). Der Kohlenstaub wird dem Brenner durch eine mit veränderlicher Tourenzahl rotierende Bürste zugeführt. Dieser Konstruktion haften dieselben Mängel wie der zuvor erwähnten an¹⁾.

Trommelspeiser. Zu diesen gehört die in Abb. 21 gezeigte Beschickung von Edison, die bei Zementdrehöfen Verwendung ge-

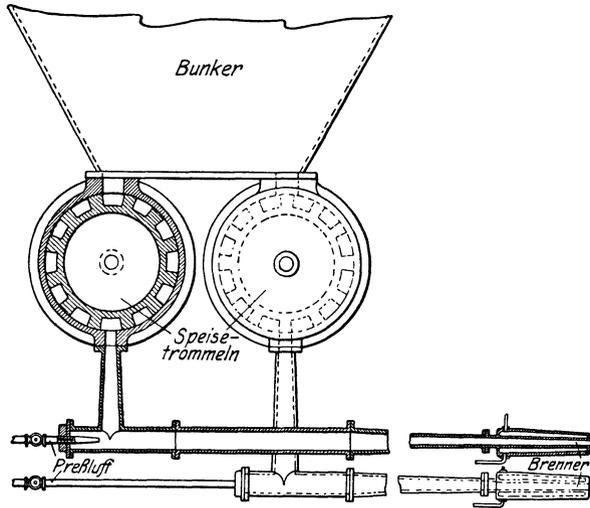


Abb. 21. Doppel-Trommelspeiser von Edison²⁾.

funden hat. Der Kohlenstaub wird von Aussparungen, die sich am Umfang langsam rotierender horizontaler Trommeln befinden, aus dem Bunker entnommen und fällt nach einer halben Umdrehung zum Brenner. Trommelspeiser finden zuweilen Verwendung, wenn zwischen Fülltrichter und Brenner größere Druckunterschiede bestehen. Nur bei gut getrocknetem und fein gemahlenem Brennstoff geben Trommelspeiser Befriedigung³⁾.

Speiseschnecken haben von allen Speisevorrichtungen die weiteste Verbreitung gefunden. Sie werden unter den trichterförmigen Abschluß des Zwischenbunkers gesetzt, aus dem sie den Brennstoff empfangen und zu einem nach dem Brenner führenden

¹⁾ Journ. of the Am. Soc. of Mech. Engineers, Okt. 1914, S. 346f.

²⁾ Nach Herington, Powdered coal as a fuel.

³⁾ Herington, Powdered coal as a fuel, New York 1920, S. 69.

Rohr leiten. Um zu vermeiden, daß der Brennstoff zwischen den Schneckengängen und der umgebenden Rohrwand durchsickert, soll das über den Fülltrichter hinausragende Ende der Schnecke genügend lang und gut eingepaßt sein. Ein Übelstand ist die stoßweise Speisung bei niedrigen Tourenzahlen. Manche Firmen verwenden daher Doppelschnecken (Abb. 22), bei denen die Schneckengänge

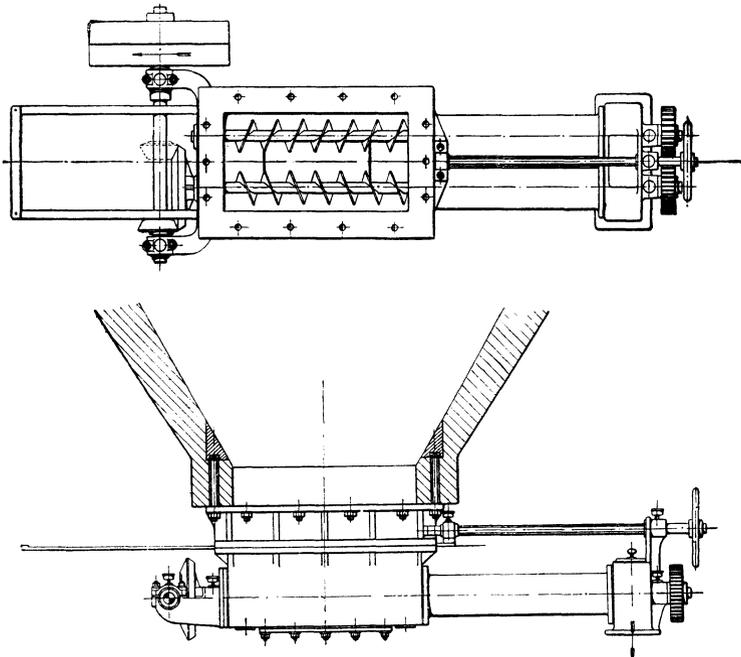


Abb. 22. Doppelspeiseschnecke von Fellner & Ziegler,
Frankfurt a. M.

um 180° gegeneinander versetzt sind. Die Brennstoffregelung geschieht durch verstellbare Schieber oder durch Änderung der Tourenzahl. Im letzteren Fall erfolgt der Antrieb zweckmäßig entweder durch einen regelbaren Motor oder durch Zwischenschaltung eines Wechselvorgeleges. Eine Speisevorrichtung mit Rückführschnecke nach Quigley ist in Abb. 23 gezeigt. Der Brennstoff wird von der horizontalen Speiseschnecke mit veränderlicher Tourenzahl vor einen Luftstrahl geworfen und mit diesem nach dem Brenner geleitet; nicht mitgerissener Staub wird von der schrägen Rückführschnecke zurückbefördert¹⁾. Bei dieser Anordnung soll ein Festlaufen der Schnecken durch Klemmen oder Backen des Kohlenstaubes vermie-

¹⁾ Journ. of the Am. Soc. of Mech. Engineers, Okt. 1914, S. 357; Stahl und Eisen 1920, S. 1164.

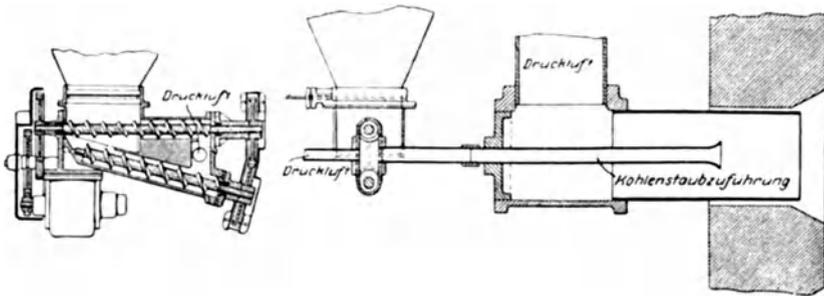


Abb. 23. Speiseschnecke mit Rückführschnecke, alte Bauart Quigley.

den werden. Die Zweckmäßigkeit der Rückführschnecke muß bezweifelt werden; bei seinen neueren Ausführungen verwendet Quigley eine Speisevorrichtung (Abb. 24), bei der die Regelung durch einen verstellbaren Regelbacken bewirkt wird¹⁾.

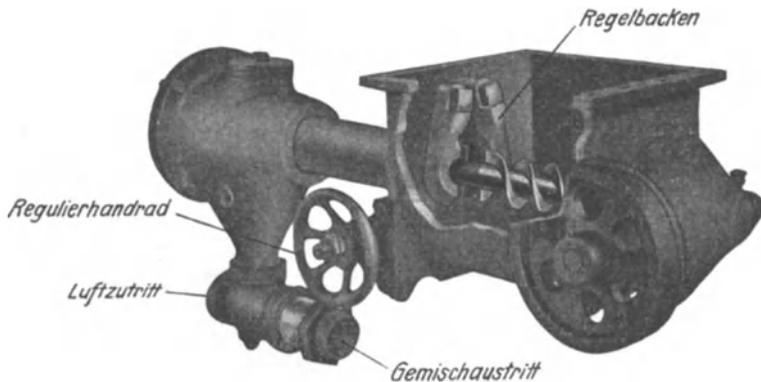


Abb. 24. Speiseschnecke mit Regelbacke, neue Bauart Quigley²⁾.

Eine pneumatische Speisevorrichtung ist der „Syphonspeiser“. Der Kohlenstaub wird aus einem unter dem Zwischenbunker angebrachten Trichter durch die Ejektorwirkung eines Druckluftstrahles gesogen und in den Brenner geblasen (Abb. 30). Diese Bauart setzt das Vorhandensein einer Druckluftleitung voraus und ist u. a. bei Martinöfen und auf den torfstaubgefeuerten Lokomotiven der schwedischen Staatsbahnen verwandt worden (Abb. 65)³⁾.

¹⁾ Engineering, 25. Juli 1919, S. 125.

²⁾ Nach Münzinger, Kohlenstaubfeuerungen.

³⁾ „Torfwirtschaft“, 5. Jan. 1921.

b) Die Brenner.

1. Grundsätzliches. Die Brenner haben den Zweck, Kohlenstaub und Luft miteinander zu mischen und in die Verbrennungskammer einzuführen. Dabei tritt die Luft gleichzeitig als Träger des Kohlenstaubes auf; sie wird in der Regel mittels eines Ventilators oder Kompressors in den Mischraum des Brenners geblasen und häufig als Primärluft bezeichnet. Was dabei an der nötigen Verbrennungsluftmenge fehlt, wird durch besondere Luftöffnungen oder Schlitze, die sich am Brenner selbst oder an der Verbrennungskammer befinden, dieser zugeführt und vielfach Sekundärluft genannt. Diese kann entweder lediglich durch die Saugwirkung des Primärluftstromes und der Flamme oder durch den Schornsteinzug eingesogen oder mittels eines besonderen Ventilators in regelbaren Mengen eingeblasen werden. Die Sekundärluftmenge beträgt je nach den Verhältnissen 30 bis 85⁰/₀ des gesamten Luftbedarfs¹⁾. Bei Verwendung von Rekuperatoren oder Regenerativkammern wird sich die Luftvorwärmung in der Regel nur auf die Sekundärluft beschränken müssen, weil die Vorwärmung der Primärluft leicht zu Anhaften und Verkokung des Kohlenstaubes im Brenner führen kann.

Je nach der Höhe des Primärluftdruckes unterscheidet man Hoch- und Niederdruckbrenner. Diese haben in der Regel einen Überdruck vor dem Brenner von 25 bis 350 mm W. S., jene eine Pressung von 2,5 bis 7 at. Hochdruckbrenner besitzen hohe Luft- bzw. Staubgeschwindigkeiten und erzeugen daher lange schmale Flammen mit deutlich wahrnehmbaren schwarzen Kegeln am Brennermund. Niederdruckbrenner weisen niedrige Geschwindigkeit auf und erzeugen kurze, bauschige oder kugelige Flammen, die an ihren Oberflächen leichtflatternde Verästelungen erkennen lassen und sich schon äußerlich von dem stichflammartigen Aussehen der an Hochdruckbrennern erzeugten Verbrennung unterscheiden. Hochdruckbrenner sind von vornherein auf solche Anwendungsgebiete beschränkt, bei denen man mit langen Flammen arbeiten kann, wie etwa bei Zementdrehöfen oder auch bei Herdschmelzöfen. Für die meisten Feuerungszwecke sind diese Brenner wegen mangelnden Flammenauslaufes nicht geeignet; selbst bei Martinöfen ist eine Entwicklung zugunsten von Niederdruckbrennern zu erkennen. Neben reinen Hoch- und Niederdruckbrennern gibt es auch eine Kombination, bei der man zwecks Erzielung verschiedener Flammenlängen die Luft je nach Bedarf einer Hoch- oder Niederdruckleitung oder beiden gleichzeitig entnimmt. Diese Kombinationsbrenner finden bei Martinöfen zuweilen Verwen-

¹⁾ Iron Age, 11. Dez. 1919, S. 1172.

dung. Die Wirtschaftlichkeit dürfte bei Hochdruckbrennern etwas niedriger als bei den beiden anderen Arten sein, weil infolge der großen Geschwindigkeiten häufig Teilchen fortgerissen werden, bevor sie verbrennen können.

Die an einen Brenner zu stellenden Erfordernisse sind folgende:

- a) Einfache Konstruktion und leichter Einbau.
- b) Innige Vermischung von Luft und Brennstoff.
- c) Genaue Regelbarkeit des Verhältnisses von Luft- zu Brennstoffmengen.
- d) Regelbarkeit der Brennerleistung ohne wesentliche Beeinträchtigung des Wirkungsgrades der Verbrennung.
- e) Bei gewissen hüttenmännischen Feuerungen Lenkbarkeit der Flamme.

2. Konstruktionen. Zur Konstruktion der Brenner ist zunächst zu bemerken, daß es falsch wäre, sich allzusehr an Gasbrenner anzulehnen. Das gilt vor allem von den Mischorganen. Es ist grundsätzlich zu beachten, daß die Mischung von Luft mit Gasen anderen Gesetzen unterliegt als die Durchmischung von Luft und Kohlenstaub. Es sind beispielsweise Einbauten zur Erzielung einer Drehbewegung auf Grund von praktischen Erfahrungen dann zu verwerfen, wenn der erzeugte Drall derartig ist, daß die Kohlenstaubteilchen der Fliehkraft erliegen und aus dem Flammenweg geschleudert werden. Da es zur Mischung des Kohlenstaubes mit der Luft einer gewissen Strecke bedarf, soll der Punkt, an dem der Brennstoff und die Primärluft zusammentreffen, nicht zu nahe an dem Brennermund liegen. Andererseits soll aber die Strecke, auf welcher der Brenner das Luft-Kohlenstaubgemisch führt, mit Rücksicht auf Flammenrückschläge und Explosionen nicht größer gemacht werden, als für gute Durchmischung unbedingt nötig erscheint. Mit Schlitzten, durch die manche Brenner Sekundärluft ansaugen, kann man in der Regel bis dicht an die äußere Wandungsfläche der Verbrennungskammer gehen. Natürlich darf die Leitung, welche den Staub dem Brenner zuführt, nicht der Hitze der Verbrennungskammer ausgesetzt werden. Die Mischung erfolgt in der Regel so, daß der Kohlenstaub den Luftstrahl mantelförmig umgibt, damit er beim Auseinandergehen im Mischraum des Brenners den Staub durchdringt; wird umgekehrt der Staub zentral eingeblasen, so strebt der umgebende Luftmantel auseinander, ohne den Staub wirksam zu erfassen und zu durchdringen.

Von den zahlreichen Brennerkonstruktionen seien nur einige herausgegriffen, die typische Vertreter der verschiedenen in der Praxis verbreiteten Spielarten sind. Einen einfachen und bewährten

Niederdruckbrenner zeigt Abb. 25¹⁾. Die über dem Brenner befindliche Brennstoffspeisevorrichtung kann je nach Wunsch in beliebiger

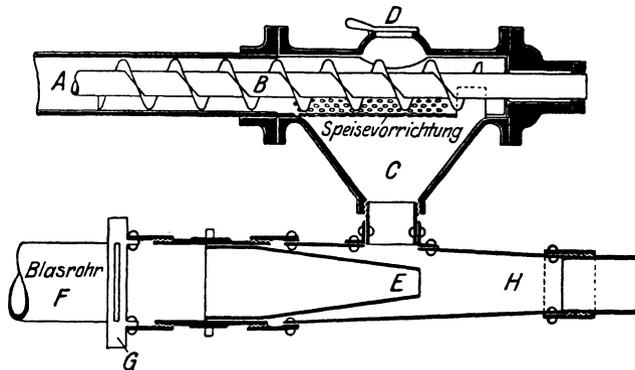


Abb. 25. Dünn-Brenner¹⁾.

Höhe über dem Brenner angeordnet werden. Der Brennstoff umgibt die Gebläseluft mantelförmig. Das umgekehrte Verfahren wird bei dem Brenner der Abb. 26 verwendet; hier tritt der Brennstoff

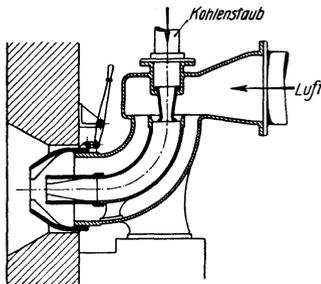


Abb. 26. Bergman-Brenner²⁾.

als Kern ein. Um trotzdem eine gute Durchmischung zu erzielen, sind die Kohlenstaubdüse und der Brennermund mit gegenläufigen schraubenförmigen Rippen versehen, die den Staub und die Luft in Drehung versetzen. Der infolge des Dralles nach außen geschleuderte Staub wird von dem in entgegengesetzter Richtung drehenden Luftwirbel erfaßt. In Abb. 27 ist die Mischvorrichtung von Staub und Primärluft von dem Brenner örtlich getrennt worden und mit

der Speisevorrichtung zusammengefaßt. Die Primärluftmenge ist so knapp bemessen, daß sie gerade genügt, ein Staub-Luftgemisch herzustellen; dieses ist so reich, daß es nicht explosibel ist und daher die örtliche Trennung vom Mischaum und eigentlichen Brenner unbedenklich erscheinen läßt. Sekundärluft wird von der Flamme in den Brenner eingesogen und durch Drosselklappen geregelt³⁾. Aus diesen Brennern wurde die in Abb. 28 angedeutete Konstruktion mit ovalem Brennermund entwickelt⁴⁾. Eine ähnliche, auf Lokomotiven benutzte Bauart stellt Abb. 29 dar. Durch flache Querschnitte

¹⁾ Feuerungstechnik 1913/14, S. 264. ²⁾ Nach Münzinger, Kohlenstaubfeuerungen. ³⁾ Siehe Abb. 50 und Tafel 10 Versuchsreihe 3, 4 und 5. ⁴⁾ Siehe Abb. 51 und Tafel 10 Versuchsreihe 7 und 8.

will man eine bessere Kühlung des Mundes erzielen, um dadurch Anhaften und Verkokung des Kohlenstaubes hintanzuhalten¹⁾. Ein Hochdruckbrenner für einen Martinofen ist in Abb. 30²⁾ veranschaulicht. Eine Kombination von Hoch- und Niederdruckbrenner zeigt Abb. 31²⁾. Durch Regelung der Ventilator- und Kompressorluft kann man verschiedene Flammenlängen erzielen. Um auch die

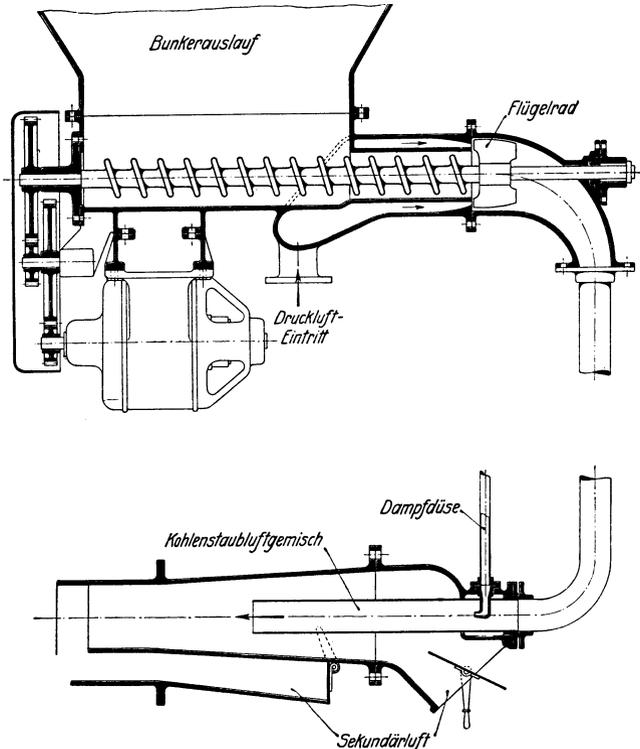


Abb. 27. Lopulco-Brenner für Kessel, alte Bauart³⁾.

Flammenrichtung verändern zu können, ist der Brennermund schwenkbar angeordnet. Bei Brennern, die mit vorgewärmter Primärluft arbeiten, ist Wasserkühlung erforderlich.

3. Leistung. Die Leistung eines Brenners beträgt in der Regel bis zu 600 kg, in extremen Fällen bis zu 3000 kg pro Stunde. Der Kraftbedarf schwankt je nach der Ausführung und dürfte etwa 2,5 bis 5 KWst/t betragen.

4. Regelung. Die Regelung der Brennerleistung kann geschehen durch:

¹⁾ Journ. of the Am. Soc. of Mech. Engs, Sept. 1919, S. 748. ²⁾ Journ. of the Franklin Institute, Sept. 1916, S. 340 f.; Stahl und Eisen, 2. Sept. 1920, S. 1164 und 1165. ³⁾ Nach Münzinger, Kohlenstaubfeuerungen.

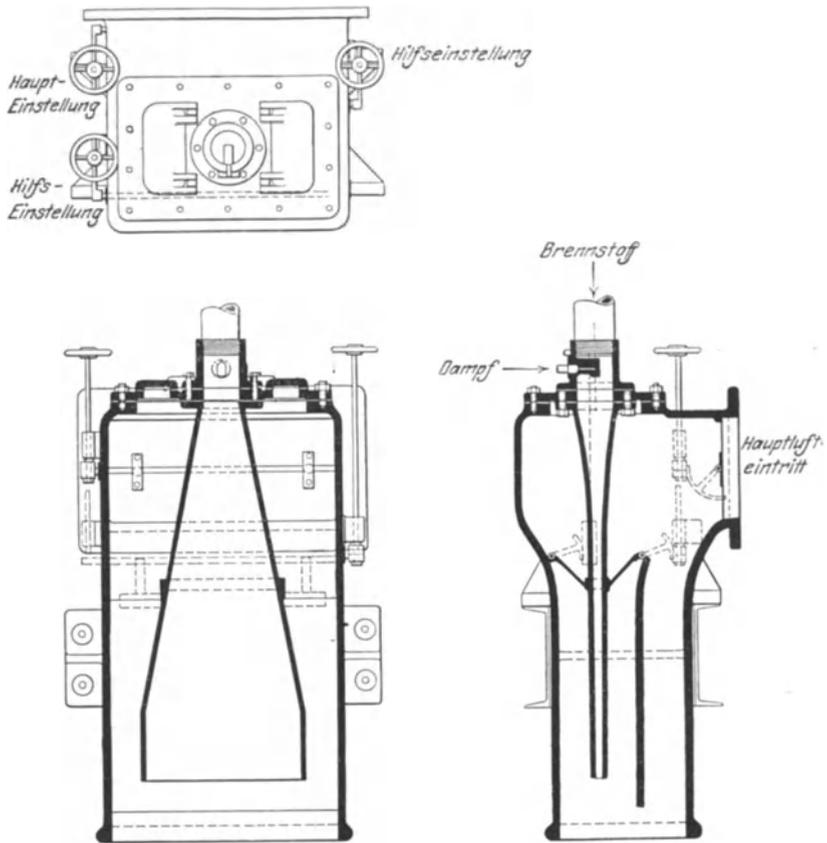
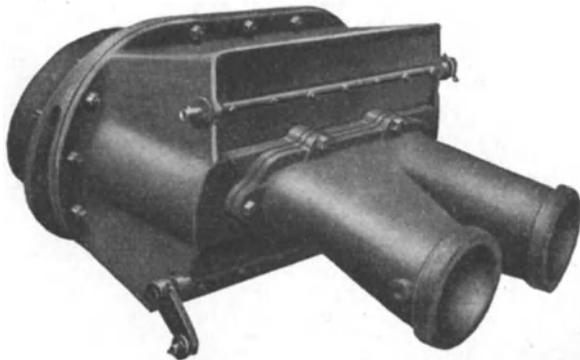
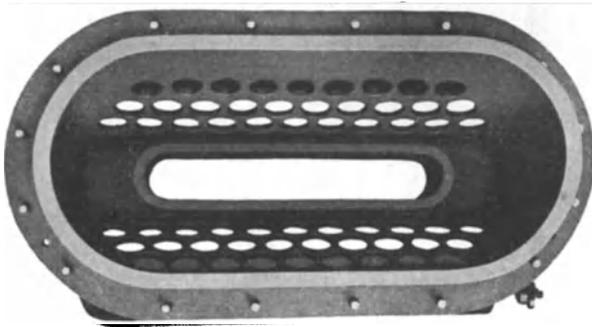
M. \sim 1:20

Abb. 28. Lopulco-Brenner für Kessel, neue Bauart.

Abb. 29a. Fuller-Brenner für Lokomotiven.
(Außenansicht.)



M. \sim 1:9.

Abb. 29b. Fuller-Brenner für Lokomotiven.
(Brennermund, von Feuerseite gesehen.)

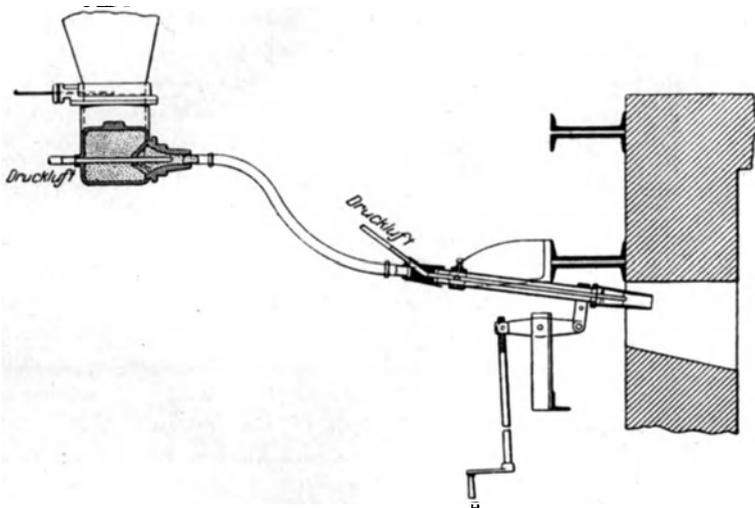


Abb. 30. Syphonspeiser und Hochdruckbrenner.

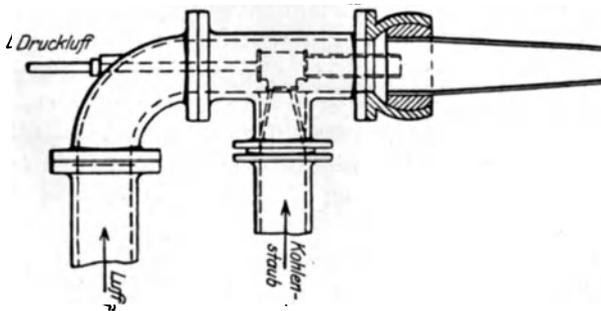


Abb. 31. Hoch- und Niederdruckbrenner.

α) Änderung der Staubmenge nach einer der auf S. 51 f. beschriebenen Methoden und gleichzeitiger Änderung der Primärluftmenge durch Drosselung oder Änderung der Ventilator Tourenzahl. Dies Verfahren gestaltet sich sehr einfach, wenn man keine Sekundärluft verwendet, weil sich dann Staub- und Primärluftmenge in gleichem Verhältnis ändern. Bei Brennern größerer Leistungen, bei denen die Beherrschung der gesamten Luftmenge im Brenner schwierig wäre, muß man dagegen mit Sekundärluft arbeiten und wird dann vielfach genötigt sein, auch diese zu regeln, soweit es nicht bereits durch den mit zunehmender Brennerleistung wachsenden Saugzug der Flamme geschieht; nur in Fällen, wo die Sekundärluftmenge einen kleinen Teil des gesamten normalen Luftbedarfs ausmacht, oder wo ein konstanter Luftfaktor unwesentlich ist, kann man auf Regelung der Sekundärluft verzichten. Beträgt, wie es vielfach der Fall ist, das Verhältnis von Primär- zur Sekundärluftmenge bei normaler Brennerleistung 1 : 1, so muß bereits bei $\frac{3}{4}$ Normalleistung die Primärluftmenge auf die Hälfte sinken und müßte bei $\frac{1}{2}$ Normalleistung theoretisch = 0 werden, wenn die Sekundärluftmenge und der Luftfaktor konstant bleiben sollen. Es kann also der Fall eintreten, daß die verminderte Primärluftmenge nicht mehr genügt, den Staub zu mischen und durch den Brenner zu tragen, und zwar tritt dieser Zustand um so eher ein, je geringer die normale Brennergeschwindigkeit ist. Nun sind aber zur Erzielung kurzer Flammen ein niedriger Primärluftdruck und damit zugleich niedrige Brennergeschwindigkeiten erwünscht, und man geht z. B. bei Kesseln mit kurzem Flammenauslauf mit dem Winddruck im Brenner so weit herunter, daß er gerade genügt, vor Flammenrückschlag zu schützen und den Staub in der Schwebe zu halten. Das obige Regelverfahren eignet sich also nicht für Feuerungen mit kurzen Flammen; es besitzt einen um so kleineren Regelbereich, je geringer der Primärluftdruck ist. Dagegen eignet es sich für Hochdruckbrenner und findet daher bei manchen hüttenmännischen Feuerungen Verwendung.

Wünscht man eine kurze Flamme von möglichst gleichbleibender Länge, so regelt man besser durch:

β) Änderung der Staubmenge wie bei α ; Menge und Druck der Primärluft bleiben konstant; bei gleichem Luftfaktor wird die Sekundärluft durch Drosselung oder durch Tourenänderung des Sekundärluftventilators geregelt. Der Grenzfall tritt ein, wenn die Sekundärluftmenge = 0 geworden ist. Da Primärluftdruck und Menge auch bei Teillast die gleichen bleiben, sind Flammenrückschlag oder Ausfallen des Staubes nicht möglich. Der Regelbereich wird um so größer, je größer das Verhältnis Sekundär- zu Primärluftmenge bei normaler Brennerleistung gewählt wird. Das

hat den weiteren Vorteil kleinerer Brennerquerschnitte und leichteren Einbaues. Das Verfahren eignet sich für Dampfkessel mit kurzen Flammen und wechselnden Beanspruchungen. Soll die Flamme so kurz wie möglich werden, so muß die Primärluftmenge so bemessen sein, daß sie gerade genügt, die der maximalen Belastung entsprechende Staubmenge durch die Brenner zu befördern und in der Schwebelage zu halten. Bei amerikanischen Versuchen hat sich z. B. ein Verhältnis von Sekundärluft zu Primärluft = 3 bis 4 : 1 als günstig herausgestellt¹⁾. Dabei darf die Geschwindigkeit nicht so niedrig werden, daß ein Zurückschlagen der Flamme eintreten kann. Als minimaler Überdruck vor dem Brenner dürften etwa 20 mm W.S. gelten.

γ) Eine weitere Regelmöglichkeit besteht in der Verwendung eines Satzes von Brennern; sie bietet den Vorteil, daß die Brenner mit ihrer günstigsten Einstellung dauernd fahren können. Die Regelung geschieht durch Zu- und Abschalten einzelner Brenner.

Der Regelbereich sämtlicher Brenner hängt von ihrer Mischfähigkeit, den Wandungstemperaturen der Verbrennungskammer und den Strahlungsverhältnissen ab (siehe Seite 62 f.); die Regelfähigkeit mancher Brenner läßt vor allem bei leichten Teillasten noch zu wünschen übrig; sie dürfte außer durch richtige Konstruktion der Mischorgane am ehesten durch Regelung nach β und γ gewährleistet werden. Die Wandungstemperaturen können bei abnehmender Leistung so stark sinken, daß die Flamme verlöscht. Wie weit man unter normale Leistungen gehen kann, hängt von der Konstruktion und Dichtheit der Kammer sowie der Zeitdauer der Teillast ab. Diesbezügliche Versuchsdaten liegen noch nicht vor.

5. Betrieb. Von dem Mischungsverhältnis der Flamme kann sich der Heizer bei einiger Übung ähnlich wie bei Öl- oder Gasfeuerungen durch den Augenschein überzeugen. Trotzdem ist es ratsam, Kohlensäure und Abgastemperaturen zu messen. Zuweilen wird die Verbrennungskontrolle zentral zusammengefaßt und zu einem Punkt geführt, von dem aus auch die Regelung der Brennstoff- und Luftmengen durch elektrische Fernübertragung erfolgt.

Bei Inbetriebnahme muß die Luft vor dem Staub angestellt werden. Die Brenner sollen häufig beobachtet werden, um Verkrustungen am Brennermund rechtzeitig feststellen zu können. Dieser wird zuweilen infolge Unterbrechung der Primärluft durch Motorstillstand rotglühend. Der Kohlenstaub beginnt dann am Brenner anzuhaften und den Querschnitt zu verstopfen. Setzt der Primärluftstrom wieder ein, so sucht er sich einen Ausweg nach der Staub-

¹⁾ Engineering and Mining Journal v. 21. Aug. 1920, S. 360.

speiseleitung und kann durch Mitreißen heißer Partikel eine Explosion hervorrufen¹⁾. Es ist daher zweckmäßig, daß bei Ausbleiben der Luft die Staubzufuhr zum Brenner selbsttätig unterbrochen wird.

c) Die Verbrennungskammer.

1. **Flammenarten.** Die Verbrennungskammer muß wärme- und durchlässig sein, d. h. die hochoverhitzten Kammerwände sollen als Strahlungsflächen dienen, welche die Zündung und Verbrennung des Kohlenstaubes beschleunigen. Bei der Betrachtung von Größe und Form der Verbrennungskammer bildet die Flamme den natürlichen Ausgangspunkt. Wir haben bereits das langflammige Hochdruckverfahren und das mit kurzer oder kugelige Flamme arbeitende Niederdruckverfahren kennen gelernt. Es wurde auch schon erwähnt, daß das Niederdruckverfahren die Hochdruckbrenner mehr und mehr verdrängt. Das ist nicht nur aus der Tatsache zu erklären, daß für viele Zwecke lange Flammen wegen mangelnden Flammenauslaufs und wegen Stichtammenwirkung zu verwerfen sind, sondern hat auch tiefere Gründe: Erstens wird beim Niederdruckbrenner dem Staub vermöge seiner geringeren Geschwindigkeit eine längere Zeitspanne zur Verbindung mit dem Luftsauerstoff innerhalb der Verbrennungskammer geboten und damit die Gewähr für vollkommene Verbrennung erhöht. Zweitens liegen die Strahlungsverhältnisse bei Niederdruckbrennern günstiger. Da es sich dabei um noch nicht völlig geklärte Vorgänge handelt, sei das Folgende zur Diskussion gestellt:

Von jedem brennenden Kohlenstaubteilchen und von jedem Flächenelement der Kammerwandungen werden Wärmestrahlen in alle Richtungen ausgesandt. Entsprechend empfängt jedes Staubteilchen und jedes Flächenelement Wärmestrahlen verschiedenster Richtung. Man kann daher zwischen 1. einer Selbstbestrahlung der Flamme und 2. einer Anstrahlung der Wandungsflächen durch die Flamme unterscheiden. Diese Anstrahlung sei im Gegensatz zur Selbstbestrahlung der Flamme Wandungsstrahlung genannt.

Die Intensität der Selbstbestrahlung wächst

α) je größer das Flammenvolumen bei gleichbleibender Staubdichte wird²⁾, d. h. je größer die Brennerleistung ist,

β) je geringer die Abstrahlung nach außen, d. h. je kugelige die Flammenform ist.

Diese erstrebt man aber durch Niederdruckbrenner;

¹⁾ Power, 3. Mai 1921, S. 718.

²⁾ Dies gilt mit der Einschränkung, daß die Strahlungsdurchlässigkeit der Staubwolke begrenzt ist.

γ) weiterhin kann die Selbstbestrahlungsintensität durch Flammenumkehr vergrößert werden; sie wird dadurch erreicht, daß der Brenner senkrecht oder schräg nach unten gerichtet ist und daß die Flamme nach einer gewissen Länge durch den Auftrieb nach oben abgelenkt wird (siehe Abb. 50). Dabei werden die aus dem Brenner gerade austretenden Kohlenstaubteilchen von den bereits umgekehrten glühenden durch Strahlung erhitzt und somit schnell entzündet. Das Mittel der Flammenumkehr wird vor allem bei gasarmen Brennstoffen (mit weniger als 20% flüchtigen Bestandteilen) angewandt. Beim langflammigen oder Hochdruckverfahren läßt sich die Flammenumkehr der hohen Geschwindigkeit wegen schwer durchführen.

Die Intensität der Wandungsstrahlung ist unter sonst gleichen Umständen um so größer, je vollkommener die Flamme das Kammer-volumen ausfüllt oder je mehr sich das Verhältnis Flammenquerschnitt zu Kammerquerschnitt dem Wert 1 nähert.

Die gesamte für die Temperatur und Zündung des Staubes maßgebende Strahlungsintensität setzt sich aus den unter 1. und 2. genannten Komponenten zusammen.

Niederdruck- und Umkehrflammen gestatten daher gegenüber Hochdruckflammen eine größere Verzichtleistung auf Wandungsstrahlung. Davon kann man folgendermaßen praktischen Nutzen ziehen:

A. Durch Einschränkung oder Fortlassung von den in den Verbrennungsraum ragenden Zündgewölben, die nicht nur kurzlebig sind, sondern auch die unmittelbare Heizflächenbestrahlung verringern. Diese ist im Interesse niedriger Wandungstemperaturen der Verbrennungskammer sowie einer guten Wärmeübertragung erwünscht und wird durch weite, nach den zu beheizenden Flächen freiliegende Verbrennungskammern erstrebt. Man findet dann auch in der modernen amerikanischen Kohlenstaubpraxis große Kessel mit Niederdruckflammen und weitgeöffneten Kammern, bei denen die früher unbedingt nötig erschienenen Zündgewölbe auf ein Mindestmaß beschränkt oder ganz fortgelassen sind.

B. Durch Vergrößerung der Verbrennungskammer über das der Flamme eigene Volumen hinaus. Auf diese Weise werden die Wandungen des Verbrennungsraumes vor den mechanischen und chemischen Einflüssen der Asche besser geschützt.

2. Sekundärluftzuführung. Man unterscheidet:

a) Zentrale Zuführung, bei der die gesamte Sekundärluft auf einmal und in unmittelbarer Nähe des Brenners in die Flamme eintritt und

β) Verteilte Zuführung, bei welcher die Sekundärluft der Flamme an verschiedenen Stellen ihres Laufes beigegeben wird.

Für die Beurteilung beider Verfahren ist folgendes maßgebend:

A. Die Zuführung nach α) ist die einfachere und daher billigere; sie ist bei kleineren Feuerungen und überall dort, wo hohe Flammentemperaturen erwünscht sind, anzuwenden.

B. Bei vielen Feuerungen ist es mit Rücksicht auf das feuerfeste Mauerwerk der Verbrennungskammer nicht möglich, von den der Staubfeuerung eigenen hohen Flammentemperaturen vollen Gebrauch zu machen; man ist gezwungen, diese zu dämpfen.

Bei zentraler Luftzuführung kann die Temperaturdämpfung nur durch Luftüberschuß bewirkt worden; im Abgas ist $\text{CO}_2 + \text{Luft} + \text{N}_2$.

Bei verteilter Luftzuführung kann die Temperaturdämpfung auch durch verzögerte oder schleppende Verbrennung bewirkt werden; im Abgas ist nur $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ ¹⁾.

Es ist anzunehmen, daß bei gleichen Anfangstemperaturen die Zuführung nach β) wärmewirtschaftlich derjenigen nach α) überlegen ist und niedrigere Abgastemperaturen im Gefolge hat. Obwohl es in der Praxis bisher nicht gelungen ist, bei verteilter Luftzufuhr hinreichende Temperaturdämpfung ganz ohne Luftzuschuß zu erzielen, wird die obige Annahme doch durch die Versuche im Lakesidekraftwerk bestätigt ²⁾ (s. Seite 128 sowie Abb. 51 und 52).

C. Verteilte Luftzuführung ermöglicht die Bildung von Luftschleiern, welche die Wandungen gegen Schlackenangriff schützen, eine gleichmäßigere Temperaturverteilung über das Mauerwerk bewirken und die aus der Flamme fallenden flüssigen Ascheteilchen abkühlen.

3. Größe der Verbrennungskammer. Diese beträgt bei modernen Kesselfeuerungen 30 bis 60 $\text{m}^3/\text{t} \times \text{Stde.}$ ³⁾. Bei hüttenmännischen Öfen dient der Einsatz kraft seiner hohen Temperatur selbst teilweise als strahlende Zündfläche. Es läßt sich daher nicht immer eine scharfe Grenze zwischen Verbrennungskammer und Ofenraum ziehen. Als erste Annäherung können bei Roll- und Stoßöfen 10, bei Schmelzöfen 6 bis 7 $\text{m}^3/\text{t} \times \text{Stde.}$ angenommen werden.

¹⁾ Schleppende Verbrennung könnte statt durch verteilte Luft- auch durch verteilte Brennstoffzufuhr erzielt werden; D. R. Patent angemeldet. Schleppende Verbrennung tritt auch bei zentraler Luftzufuhr und großen Brennerleistungen ein, was an dem schwarzen Kegel am Brennermund erkennbar ist; sie ist aber unbeabsichtigt und unkontrollierbar und ändert daher nichts an den obigen prinzipiellen Betrachtungen.

²⁾ Eine rechnerische Erfassung der Verhältnisse durch den Verfasser ist in Arbeit. Siehe auch Hudler, Die Bedeutung der Anfangstemperatur, Z. d. V. D. I. 2. Oktober 1920, S. 811.

³⁾ Näheres siehe Seite 115.

4. Konstruktive Ausbildung der Verbrennungskammer. Für die Formgebung sind außer den unter 1. genannten Richtlinien die folgenden Gesichtspunkte wesentlich:

α) Einfache Formgebung ohne scharfe Vorsprünge und Richtungswechsel, die ein Herausschleudern des Kohlenstaubes aus der beigemischten Luft zur Folge haben könnten.

β) Die Kammerquerschnitte sollen so beschaffen sein, daß sich an allen Punkten annähernd gleiche Geschwindigkeiten ergeben.

γ) Für betriebssichere Aschenentfernung ist Sorge zu tragen. Je nach Größe der Verbrennungskammer und Flammengeschwindigkeit sammeln sich 30—60% der Asche in der Kammer an.

5. Ausmauerung. Besondere Sorgfalt ist auf die Ausmauerung der Kammer zu verwenden. Die Kohlenstaubfeuerung stellt an das feuerfeste Material höhere Anforderungen als Rostfeuerungen, erstens wegen der höheren Temperaturen und zweitens wegen des Schlackenangriffes¹⁾. Von einem feuerfesten Stein ist zu fordern:

α) Hoher Schmelzpunkt.

β) Gute Raumbeständigkeit, d. h. Widerstandsfähigkeit gegen Reißen, Werfen und Schwinden.

γ) Mechanische Druckfestigkeit.

δ) Widerstandsfähigkeit gegen chemischen Angriff der Schlacke.

Die Steine müssen gut durchgebrannt werden, damit kein nachträgliches Schwinden eintritt. Poröse Steine absorbieren flüssige Schlacke schneller als solche mit festem Gefüge und werden daher der Zerstörung eher erliegen. Man verwende daher nicht handgeformte, sondern gepreßte Steine und stelle diese aus einem mittelfein gemahlten Material her. Starke mechanische Belastungen der Steine sind zu vermeiden. Die Gefahr des Schlackenangriffes steigt nicht nur mit der Porosität des Materials, sondern ist auch dann vorhanden, wenn gewisse Bestandteile des Steins mit der flüssigen Asche Lösungen mit niedrigem Schmelzpunkt bilden. (Siehe auch Seite 15; eutektische Lösungen.) Es ist schwer, allgemein gültige Regeln über die richtige Auswahl des Steines aufzustellen²⁾. Praktische Betriebserfahrungen und Schmelzproben des Steines mit der betreffenden Kohlen Schlacke sind die besten Anhaltspunkte. Zuweilen ist es zweckmäßig, bei Inbetriebnahme einer neu ausgemauerten Kammer durch geeignete Zuschläge zum Kohlenstaub einen feuerfesten Schlackenüberzug zu bilden, der die Steine vor weiteren Angriffen schützt. In

¹⁾ Näheres siehe Seite 12 f.

²⁾ Näheres ist aus dem Werk von Dr. Münzinger: „Kohlenstaubfeuerungen für ortsfeste Dampfkessel zu ersuchen. Siehe ferner: The Blast furnace and Steel Plant, Juli 1920, S. 410.

einigen neuen Anlagen ist das Mauerwerk mit einem Belage hochtemperaturbeständigen Materials versehen worden (Karborund- und Retortitausstampfung).

Zweiter Abschnitt.

I. Staubfeuerungen in der Zement-, Kalk- und Glasindustrie, sowie in chemischen Fabriken.

Kohlenstaubfeuerungen haben sich in Deutschland in Zementdrehöfen so vielfach eingebürgert, daß eine Beschreibung hier überflüssig erscheint. Ob dem Zementdrehofen in dem kontinuierlichen Schachtofen mit Stückkoksfeuerung ein Wettbewerber erstehen wird, ist schwer vorauszusagen.

Auch zum Brennen von Kalk kommen Drehöfen mit Kohlenstaubfeuerung in Betracht. Eine derartige Anlage wurde in den Stickstoffwerken in Muscle Shoals, Ala., Vereinigte Staaten, während des Krieges errichtet. Die Drehöfen sollen 100 t Kalk in 24 Stunden brennen. Das Verhältnis von Brennstoff zu gebranntem Kalk wird bei guter Kohle mit 1:3 angegeben. Eingehende Betriebsberichte stehen wegen der kurzen Betriebszeit dieser Anlage noch nicht zur Verfügung.

In der Glasindustrie dürfte die Kohlenstaubfeuerung infolge der Aschen- und Schlackenablagerung auf dem Schmelzgut der Wannen Bedenken erregen. Immerhin wäre es nicht ausgeschlossen, daß man sich die gute Temperaturregelbarkeit der Staubflamme bei Strecköfen zunutze macht. Die Verhältnisse dürften denjenigen in Glühöfen der Eisenhütten ähnlich sein¹⁾.

In der chemischen Industrie hat sich die Kohlenstaubfeuerung bereits in größerem Maßstab Eingang verschafft. Aus Fabrikationsgründen halten die Werke Einzelheiten meist noch geheim²⁾.

II. Staubfeuerungen zur Roheisenerzeugung.

a) Öfen zum Rösten von Spateisenstein.

Das Rösten kann in kohlenstaubgefeuerten Drehrohröfen vorgenommen werden. Sie sind wegen ihrer hohen Wärmeverluste unwirtschaftlich und besitzen bei hohem Schwefelgehalt der Erze kurze

¹⁾ Siehe S. 84 f. und 89 f.

²⁾ Siehe Heft 3 der Mitteilungen der Hauptstelle für Wärmewirtschaft. Siehe Harvey, Pulv. Coal systems in America, London 1919, S. 56 f.

Lebensdauer. Diesen Nachteilen steht die gute Regelbarkeit der Flammentemperatur der Kohlenstaubfeuerung als Vorteil gegenüber, da bei zu hohen Rösttemperaturen eine unerwünschte Agglomeration des Erzes eintritt. In einem Falle wird als innezuhaltende Temperatur 1190°C , als Kohlenverbrauch $7\frac{1}{2}\%$ des aufgegebenen Erzes angegeben¹⁾.

b) Öfen zum Agglomerieren von Erz- und Gichtstaub.

Ähnliche Verhältnisse wie bei Röstöfen liegen bei Agglomerieröfen vor, bei denen die Temperatur zwar hoch genug sein muß, um ein Agglomerat des Erzes bzw. Gichtstaubes bilden zu können, aber nicht so weit steigen darf, daß das Agglomerat verschlackt und an den Wänden des Drehofens festbackt.

Versuche eines deutschen Werkes mit einem kohlenstaubgefeuerten Drehrohröfen waren wegen Verschlackung der Feinerze unbefriedigend.

Auf einem andern deutschen Werke werden seit 1914 täglich etwa 300 t Gichtstaub von 36 bis 40% Fe in einem Drehrohröfen agglomeriert. Der Kohlenstaubverbrauch beträgt etwa 10 Gewichtsprozent des Agglomerats. Die Trommel des Ofens hat einen Durchmesser von 2,1 bis 2,3 m l. W. bei einer Länge von 40 m.

c) Hochöfen.

Die Verwendung von Kohlenstaub als teilweiser Ersatz der üblichen Koksbeschickung ist bei Kupferhochöfen in der Weise ausgeführt worden, daß man den Kohlenstaub unmittelbar in den Schmelzraum des Hochofens einbläst²⁾. Analog könnte man bei der Roheisenerzeugung vorgehen. Die Verbrennung des Kohlenstaubes hätte in unmittelbarer Nähe der Formen vor sich zu gehen und würde einen Verbrennungsvorraum erfordern, um eine möglichst schnelle Verbrennung bei hohen Temperaturen zu erzielen. Die zu erwartenden Vorteile sind nach Fr. Lange³⁾:

1. Geringere Brennstoffkosten, weil ein Teil des Kokses durch die billigere Kohle ersetzt wird.

2. Die Erzielung hoher Temperaturen im Schmelzraum⁴⁾; diese sind bei Roheisensorten wie Ferro-Silizium, Ferro-Mangan und Ferro-Chrom, oder, wenn aus schwefelhaltigen Erzen ein möglichst schwefelfreies Roheisen herzustellen ist, besonders erwünscht.

¹⁾ Bulletin of the Am. Inst. of Min. Eng., Oktober 1913, S. 2523 f. — Herington, Powdered Coal as a Fuel, New York 1920, S. 104 f.

²⁾ Siehe Seite 98.

³⁾ Stahl und Eisen, 11. März 1915, S. 265 u. f.

⁴⁾ Ob diese wirklich erzielt werden, erscheint zweifelhaft, da der Staub nur zu CO verbrennen kann.

3. Niedrigere Temperaturen an der Gicht des Hochofens, weil die Koksauflage geringer wird.

4. Die Verwendung kleiner Hochöfen zur Verhüttung von Feinerzen.

Die Winderhitzung in Cowpern wird wahrscheinlich beizubehalten sein. Ihre Heizung mit Kohlenstaub bei fehlendem oder mangelndem Gichtgas ist erwägenswert.

d) Koksöfen.

Kohlenstaubfeuerungen könnten 1. als Ersatz von Generatorgasbeheizung dienen, wodurch man die den Generatorgasanlagen eigenen hohen Verluste vermeiden würde, oder 2. als Ersatz von Koksofengasheizung verwandt werden, wodurch man das zur Heizung notwendige hochwertige Koksofengas für andere Zwecke frei bekommt und durch minderwertige Brennstoffe in Staubform ersetzen kann. Wahrscheinlich wird sich aber die Kohlenstaubfeuerung an alten Öfen nicht ohne mehr oder weniger umfangreiche Umbauten anbringen lassen.

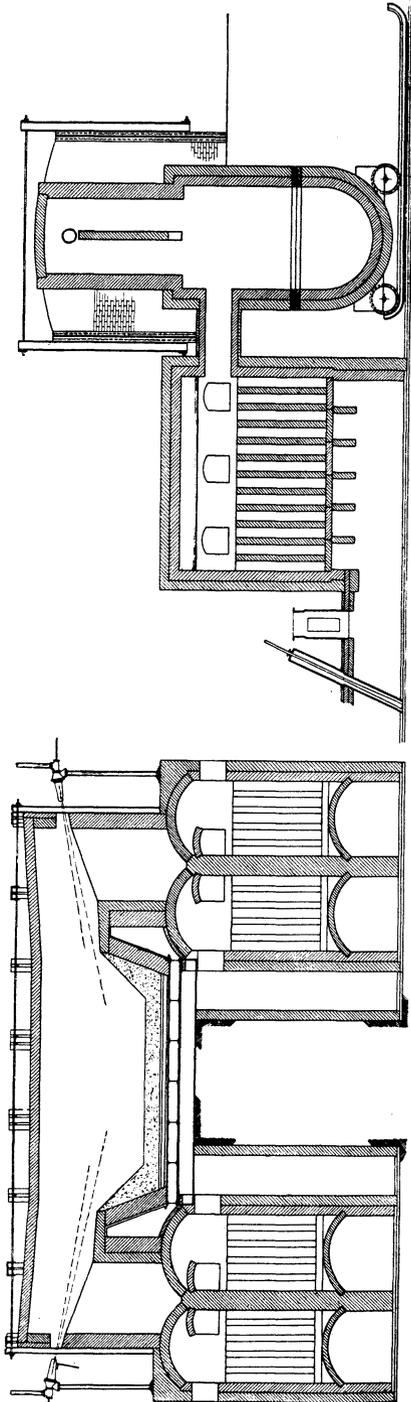
III. Staubfeuerungen in Stahlwerken.

a) Martinöfen.

1. Konstruktion. Die bei Gasfeuerungen üblichen Ofenkonstruktionen sind für Kohlenstaubbetrieb nicht ohne weiteres geeignet und erfordern gewisse Abänderungen, die im Anfang der Entwicklung außer acht gelassen wurden. Grundsätzlich ist zu bemerken, daß die Verbrennung des Kohlenstaubes beendet sein muß, bevor die Rauchgase mit dem Schmelzgut in Berührung kommen; andernfalls würde die abkühlende Wirkung des Bades vorzeitiges Verlöschen der Flamme und damit unvollkommene Verbrennung zur Folge haben. Auch hier gilt die Elementarregel: feine Ausmahlung der Kohle und großer Verbrennungsraum¹⁾. Als solcher dienen die Ofenköpfe und der über dem Bade befindliche Ofenraum. Da die Richtung der Kohlenstaubflamme lediglich durch den Brenner bestimmt wird, kann man auf die Verjüngung der Ofenköpfe, wie sie bei gasgefeuerten Öfen für den richtigen Flammenneigungswinkel nötig ist, verzichten und statt dessen flach verlaufende Decken verwenden, wie sie in Abb. 32 erkennbar sind. Die Kopflänge, die bei gasgefeuerten Öfen mit Rücksicht auf gute Flammenführung ein gewisses Maß nicht unterschreiten soll, fällt bei Kohlenstaubbetrieb kürzer aus und wird in der Regel nur durch das Ausmaß des Rauchgaskanals

¹⁾ Iron Age, 16. Okt. 1913, S. 855.

bestimmt. Über die günstigste Art und Anordnung der Brenner herrscht noch keine Klarheit. Wird der Brennstoff an den Seiten, wie in Abb. 32, eingeführt, so sind Hochdruckbrenner zu bevorzugen, weil sie ihrer großen Reichweite wegen auf das Bad brennen können, ohne die Köpfe zu überhitzen. Man könnte die Brenner auch in der Ofendecke anbringen und senkrecht oder schräg nach unten richten, wobei die Rauchgasabzüge mit den darunter befindlichen Schlackentaschen als Verbrennungskammern dienen würden. In diesem Falle würde man zweckmäßig zu Niederdruckbrennern greifen, die bekanntlich gegenüber Hochdruckbrennern den Vorteil größerer Wirtschaftlichkeit besitzen (siehe S. 55). Ferner werden auch Brenner nach Art der Abb. 31 verwandt, die eine Kombination von Hoch- und Niederdruckbrenner darstellen; zum Anheizen des Ofenkopfes und zum Einschmelzen von sperrigem Schrott ist eine kurze Flamme erwünscht, die nach Erreichung einer gewissen Temperatur durch Hinzuschaltung der Preßluft in eine lange, auf das Bad brennende ersetzt wird. Die in Abb. 32 gezeigte Rippe unter der Brenneröffnung soll die aus der Kammer kommende heiße Luft daran hindern, daß die Kohlenstaubflamme nach oben abgelenkt wird und die Decke verbrennt. Beim Umschalten der Heißwindkammern werden die Brenner zu-



M. ~ 1:155.
Abb. 32. Martinofenentwurf der Bonnot Co.

weilen selbsttätig und synchron mit den Luftventilen ab- bzw. zugeschaltet. Die abgeschalteten Brenner werden bei einer Ausföhrung aus der Ofenwand herausgezogen, um gegen Überhitzung geschützt zu werden. Bei Umstellung von Gas auf Kohlenstaub beschränken sich die Änderungen am Oberofen auf die bereits erwähnten Umbauten an Köpfen und der Decke, die beim Märzofen mit einem Luftzug am leichtesten durchzuführen sind. Immerhin ist es möglich, daß man bei neueren Öfen mit Rücksicht auf die anderen Flammenverhältnisse bei Kohlenstaubbetrieb zu anderen Größen und Proportionen der Badoberfläche kommt. Diese schwankt bei verschiedenen Ausföhrungen zwischen 0,6 und 1 qm pro 1 t Ausbringen.

Auf die konstruktive Ausbildung des Unterofens hat die Asche und Schlacke maßgebenden Einfluß. Besondere Sorgfalt muß der Ofenbauer der Konstruktion des Gitterwerkes der Regenerativkammer widmen. Um dieses vor Schlackenangriff tunlichst zu schützen, sind unterhalb der Rauchgaszüge Schlackentaschen anzubringen, in denen etwa 30 bis 40% der Schlacke und Asche durch Richtungswechsel der Rauchgase abgestoßen werden. In Abb. 32 ist die Schlackentasche als ausfahrbarer Wagen ausgebildet. Zu beachten ist die Querschnittserweiterung im Abzug; diese bezweckt, daß die flüssige Schlacke freifallend in den Wagen gelangt, ohne an den Wänden haften zu bleiben.

Die Gasvorwärmung fällt fort, und von der Verbrennungsluft läßt sich nur die Sekundärluft vorwärmen (siehe S. 54); beträgt diese 80% der gesamten Verbrennungsluft, so dürfte man gegenüber Gasfeuerung und bei Verwendung guter Steinkohle mit nur etwa 50 bis 60% der gesamten Regenerativheizfläche auskommen.

Hat ein Ofen bereits eine Schlackenkammer, so ist die Umstellung auf Kohlenstaub einfach und kann auf zweierlei Weise geschehen. Entweder benutzt man nur eine Regenerativkammer zum Heizen der Luft, während man an der andern gleichzeitig Säuberungsarbeiten vornimmt, oder man verwandelt beide Kammern in eine große Luftkammer und kann diese statt mit Gittern auch mit glatten vertikalen Wänden ausbauen.

Haben die Öfen dagegen keine Schlackenkammern, sondern nur Schlackensäcke in den Gitterkammern, so ist es ratsam, die Gaskammer zur Schlackenkammer unter Weglassung des Gitterwerkes umzubauen und mit schrägem Boden oder ausfahrbarem Schlackewagen auszurüsten.

Um Anhaften von Flugstaub in den Gitterkammern zu vermeiden, ist der Vorschlag gemacht worden, mit hohen Rauchgasgeschwindigkeiten zu arbeiten. Man müßte dann enge Gitter mit kleinen Öffnungsquerschnitten anwenden und hätte gleichzeitig wegen

des größeren Druckabfalles den Schornsteinzug zu verstärken, um übermäßiges Ausflammen des Ofens zu vermeiden. Zwar ist der Wärmeübergang an die Gitter bei hohen Geschwindigkeiten ein guter, doch ist zu befürchten, daß gleichzeitig mit dem Staub auch Schlackenpartikel mit in die Kammer gerissen werden und die Gitter beschädigen.

Besser erscheint der Vorschlag weiter Gitterdurchgänge. In der Tat sind mit Gittern aus $53 \times 23 \times 7,5$ cm-Steinen und vertikalen Öffnungen von 15×23 oder 23×28 cm Größe gute Erfahrungen gemacht worden¹⁾. Erlauben es die Raumverhältnisse, so kann man sogar, wie bereits angedeutet wurde, an glatte Wandebauten denken; der Wärmeübergang ist zwar geringer als bei Gittern, doch wäre es möglich, ihn durch erhöhte Rauchgasgeschwindigkeiten zu verbessern; diese scheinen wegen des geringeren Widerstandes glatter Wände zulässig, ohne daß der Schornsteinzug verstärkt zu werden brauchte oder ein Ausflammen des Ofens zu befürchten wäre.

Jedenfalls bedarf die Frage der konstruktiven Ausbildung der Regenerativkammern noch mancher Klärung. So gehen denn auch die Angaben über die Größe der Kammern recht weit auseinander. In einem Falle werden $1,5$ cbm/t Ausbringen als unzureichend bezeichnet, während in andern Fällen Werte von $2,5$ bis hinauf zu $4,5$ cbm/t genannt werden²⁾.

Außer Preßluftdüsen, mit denen der auf der obersten Gitterreihe angesammelte Staub in kurzen Zeitabständen (nach jeder Schmelze oder wenigstens einmal täglich) entfernt werden kann, sind an den Kammern kleine Türen anzubringen, damit die obersten zwei Gitterreihen leicht entfernt werden können, was nach etwa 150 bis 160 Schmelzen nötig sein wird.

2. Betrieb des Ofens. Ein bezeichnendes Merkmal der Kohlenstaubfeuerung sind der geringe Luftüberschuß und die erzielbaren hohen Temperaturen³⁾. Infolgedessen wird die Schmelzdauer gegenüber Generatorgasbetrieb verkürzt. Es ist auch anzunehmen, daß der Wärmeübergang bei Kohlenstaub ein besserer und die Rauchgastemperaturen niedriger als bei Generatorgas sind⁴⁾. Nach einer amerikanischen Mitteilung soll bei richtig gebautem und betriebenen Ofen die Temperatur der Rauchgase hinter den Kammern nicht über 375° liegen²⁾; sie dürfte daher den Einbau von Abhitzekesseln kaum noch

¹⁾ Herington, Powdered Coal as a Fuel, New York 1920, S. 243. ²⁾ Iron Age, 25. Dez. 1919, S. 1323 f.; Stahl u. Eisen, 16. Sept. 1920, S. 1232 f. ³⁾ Unter Annahme westfälischer Kohle von ca. 7000 WE wurde bei Generatorgasbetrieb sowie einer Gas- und Luftvorwärmung auf 1100° eine Flammentemperatur von 2200° , bei Kohlenstaubbetrieb und einer Erhitzung von 80% der Verbrennungsluft auf 1100° dagegen eine Temperatur von ca. 2600° errechnet. ⁴⁾ Siehe Seite 101.

Nr.	Anzahl der Öfen	Leistung der Öfen	Erzeugnis	Beschaffenheit der Kohle	Kohlenverbrauch in kg/t Ausbringen		Schmelzdauer in Stunden
					bei Kohlenstaubfeuerung	bei Generatorgasfeuerung	
1	3, basisch 3, sauer	30 t	Blöcke, Brammen	—	300	—	8—9
2	4, basisch 3, „	30 t 15 t	Stahlguß, „	0,5—1% Schwefel, 4—6% Asche	275	—	8 4—5
3	1, basisch	25 t	Stahl	—	350	—	—
4	1, basisch	30 t	Blöcke	1—3% Schwefel, 7—14% Asche	325	—	—
5	1, basisch	35 t	Blöcke für Draht	1% Schwefel, 6% Asche	245	—	—
6	35, basisch	45 t	Blöcke	1—3% Schwefel, 7—14% Asche	250	—	4 ÷ 11 gegen- über 5 ÷ 12 bei Naturgas
7	4, basisch	23 t	Stahlguß	3,5—5% Asche, 0,5—1% Schwefel, 35% flüchtige Bestandteile	255	400	≥ 7
8	4, basisch 2, „	50 t 80 t	Blöcke, „	—	—	—	—
9	4, basisch	25 t	—	0,5—3,7% Schwefel, 1,4—6,6% Asche	250	400	—
10	1, ?	55 t	—	6—20% Asche	250	—	12—13 bei kaltem Einsatz, 7 bei heißem Einsatz

Nr. 1—8: Stahl u. Eisen, 16. Sept. 1920, S. 1232f.; Iron Age, 25. Dez. 1919,

rechtfertigen. Bei Generatorgas beträgt die Rauchgastemperatur hinter den Kammern etwa 550%.

Aus der amerikanischen Praxis bekannte Betriebsergebnisse sind in Zahlentafel 4 zusammengestellt. Der Brennstoffverbrauch liegt bei den meisten Öfen bei 250 kg je Tonne Ausbringen und steigt in einem Fall auf 350 kg, Werte, die nicht sonderlich niedrig er-

Tafel 4.

Erneuerungen und Reinigung der Kammern	Bemerkungen
—	Öfen ursprünglich für Generatorgas; Gitterwerk durch Plattenwände ersetzt; basisches Erzeugnis bei Kohlenstaubbetrieb erstklassig, saures Erzeugnis schlecht, zur Ölfeuerung zurückgekehrt.
250—300 Hitzen ohne Gewölbeerneuerung	Öfen ursprünglich für Generatorgas gebaut; Gas- und Luftkammer vereinigt; breite Kanäle zwischen Gittern angeordnet.
162 Schmelzen ohne Störung	Versuch war ermutigend; Ofen wurde jedoch später auf Öl umgestellt, weil die andern Öfen des Betriebes damit geheizt wurden.
75—175 Schmelzen ohne Ausbesserungen	Ofen ursprünglich für Generatorgasfeuerung gebaut; Gitterwerk wurde entfernt.
4 Tage im Monat für Reinigung	Ofen für Kohlenstauffeuerung gebaut; Erzeugnis gut; Schlackenammern zu klein; neuer Ofen geplant.
150 Schmelzen ohne Reinigung der Gitter; 75 Schmelzen ohne Reinigung der Schlackentaschen	Öfen ursprünglich für Naturgasfeuerung gebaut; bei geringwertigen Kohlensorten Schwierigkeiten wegen Schwefel- und Aschegehaltes (3 bzw. 14 ⁰ / ₁₀).
100 Schmelzen ohne Aus- besserung; Kosten wie bei Generatorgasfeuerung	Öfen ursprünglich für Generatorgas gebaut; die Generator wurde abgebrochen. Gitterraum 4,5 m ³ /t Ausbringen.
—	Öfen ursprünglich für Ölfeuerung gebaut, 1913 auf Kohlenstauffeuerung umgestellt, arbeiten seitdem zufriedenstellend; große Schlackentaschen mit ausfahrbaren Bodenpfannen.
Gitter nach 100 Schmelzen erneuert	Ofenmauerung hält bei Ölfeuerung am längsten, bei Kohlenstauffeuerung ebenso lang wie bei Generatorgasbetrieb.
Gitter nach 250 Hitzen entfernt; 2 Wochen Betriebsunterbrechung	≤ 1% Schwefel und ≤ 6% Asche empfehlenswert.

1923 f. Nr. 9 und 10 aus Harvey, Pulverized Coal Systems in America, S. 28 f.

scheinen und in einem gut gepflegten Generatorgasbetrieb auch erzielbar sein sollten. Trotzdem wird für verschiedene Öfen die Kohlenersparnis gegenüber Generatorgas mit 20 bis 45⁰/₁₀ angegeben. Sie dürfte laut Berechnung auf S. 103 etwa 20⁰/₁₀ betragen, wenn der Wirkungsgrad der Flamme bei beiden Feuerungsarten der gleiche ist. Hervorgehoben wird die gute Regelbarkeit der Kohlenstauffeuerung.

flamme¹⁾, denn man kann nicht nur Brennstoff und Luft gegeneinander abstimmen und eine oxydierende oder reduzierende Flamme führen, sondern hat es auch in der Hand, jener mit fortschreitendem Schmelzprozeß verschiedene Länge und Richtung zu geben. Die Kohlenstaubfeuerung ist daher anpassungsfähiger als der Generator, bei dem bekanntlich eine gewisse Zeit notwendig ist, um gutes Gas herzustellen, wenn sich die Betriebsverhältnisse ändern. Der Fortfall der Stocherarbeit und ihr Ersatz durch maschinelle Bedienung sei nur kurz angedeutet; im übrigen sei auf das Kapitel über Anlage und Betriebskosten und den Vergleich mit Generatorgas verwiesen (S. 103 f.).

Schätzungsweise fällt bis zur Hälfte des gesamten Aschegehaltes der Kohle auf das Bad. Der schädliche Einfluß des Schwefels läßt sich durch basisches Futter und Kalkzuschläge meistern, doch sind nach amerikanischen Mitteilungen Kohlen mit mehr als 1,5% Schwefelgehalt nicht wünschenswert. Bei Angabe des Schwefelgehalts wäre es allerdings wichtig, in Zukunft zwischen Sulfat- und Sulfid-schwefel zu unterscheiden, da beide nicht gleichartig auf das Bad zu wirken scheinen. Bei saurem Futter hat sich der Kohlenstaubbetrieb offenbar bisher nicht bewährt, während sich beim basischen Prozeß Stahl guter Qualität herstellen ließ²⁾. Die Wirkung der schwefelhaltigen Gase ist bei sperrigem Schrott oder kaltem Einsatz schädlicher als bei flüssigem Einsatz, der durch eine Schlackendecke geschützt wird. Die auf das Bad fallende Kohlenasche bzw. -schlacke wirkt auf die Badschlacke als Fluß- oder Versteifungsmittel, je nachdem die letztere basisch oder sauer ist. Nach den Gesetzen der Hüttenkunde gibt es bei allen Tonerde-Kieselsäure-Kalk-Verbindungen leichtflüssige Lösungen, auf die z. B. beim Hochofen hingearbeitet wird und die in ähnlicher Weise durch geeignete Zuschläge bei kohlenstaubgefeuerten Martinöfen zu erstreben sind.

Man ist daher bei der Auswahl der Kohle an enge Grenzen gebunden und wird geringen Schwefel- und Aschegehalt fordern müssen. Es ist anzunehmen, daß sich auch mit Braunkohlenstaub hinreichende Temperaturen erzielen lassen. Bekanntlich zeichnen sich manche mitteldeutschen und niederrheinischen Braunkohlen durch niedrigen Schwefel- und Aschegehalt aus.

Mit Bezug auf Reparaturen und Unterhaltungsarbeiten an den Öfen sei folgendes bemerkt: Die bei gasgefeuerten Öfen eintretende Auswaschung der Köpfe und die dadurch bedingte Verschlechterung der Gas-Luftmischung fällt fort. Die Lebensdauer von Seitenwänden

¹⁾ Pulv. Fuel, Commission of Conservation of Canada, Ottawa 1919, S. 34.

²⁾ Journ. of the Am. Soc. of Mech. Eng., Okt. 1914.

und Decke des Oberofens scheint geringer als bei Öl und ebenso lang wie bei Generatorgas zu sein (siehe Tafel 4, Nr. 9). Ein Nachteil der Kohlenstaubfeuerung sind die häufigen Reparaturen und Reinigungsarbeiten am Gitterwerk; hier scheint in konstruktiver Hinsicht mancherlei verbessert werden zu können. Die Lebensdauer der Gitter wird für verschiedene Brennstoffe folgendermaßen angegeben¹⁾:

Naturgas	1000	Hitzen
Generatorgas oder Öl . .	350—500	„
Kohlenstaub	225—250	„

3. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen. Der kohlenstaubgefeuerte Martinofen ist konstruktiv noch verbesserungsbedürftig. Er weist gegenüber Generatorgasbetrieb

1. niedrigere Anlagekosten (siehe S. 106),
2. niedrigeren Brennstoffverbrauch,
3. einfachere Bedienung,
4. kürzere Schmelzdauer,
5. größere Anpassungsfähigkeit und
6. häufigere Gitterreparaturen und Reinigungen auf.

Die Güte des Erzeugnisses büßt bei schwefelarmen Kohlen und basischem Betrieb nichts ein; beim sauern Verfahren liegen ungünstige Erfahrungen vor. Die Tatsache, daß nach privaten Mitteilungen verschiedene amerikanische Öfen von Kohlenstaub auf Öl oder Naturgas zurückgingen, sobald diese Brennstoffe nach dem Kriege wieder in hinlänglicher Menge zur Verfügung standen, zeigt, daß die Erfolge mit Kohlenstaubfeuerung nicht derartige waren, daß man nicht lieber auf die bewährte Öl- bzw. Naturgasfeuerung zurückgriff.

In Deutschland wäre die Kohlenstaubfeuerung nur als Ersatz für Generatorgasbetrieb zu erwägen und dann auch nur in solchen Fällen, wo einem kein Koksofengas oder ein Mischgas aus Koksofengas und Gichtgas zur Verfügung steht. Das Anwendungsfeld würden daher vor allem die sog. reinen Stahlwerke sein, die von Kokereien oder Hochofenwerken räumlich getrennt sind.

Als Brennstoffe kommen asche- und schwefelarme Steinkohlen und vielleicht auch Halbkoks in Frage. Es ist anzunehmen, daß sich auch mit Braunkohlenstaub genügend hohe Flammentemperaturen erzielen lassen (bis 2000° C).

b) Einseitig gefeuerte Herdöfen.

Der in Abb. 33 gezeigte Kippherdofen wird nur von einer Seite gefeuert und arbeitet ohne Luftvorwärmung. Der Niederdruckbrenner

¹⁾ Harvey, Pulv. Coal Systems in America, London 1919, S. 30.

soll die Verbrennungskammer auf Temperatur bringen, während der Hochdruckbrenner zur Beheizung des Bades dient. Die gesamte fühlbare Wärme der Abgase kann Abhitzekesseln zugeführt werden. Auch

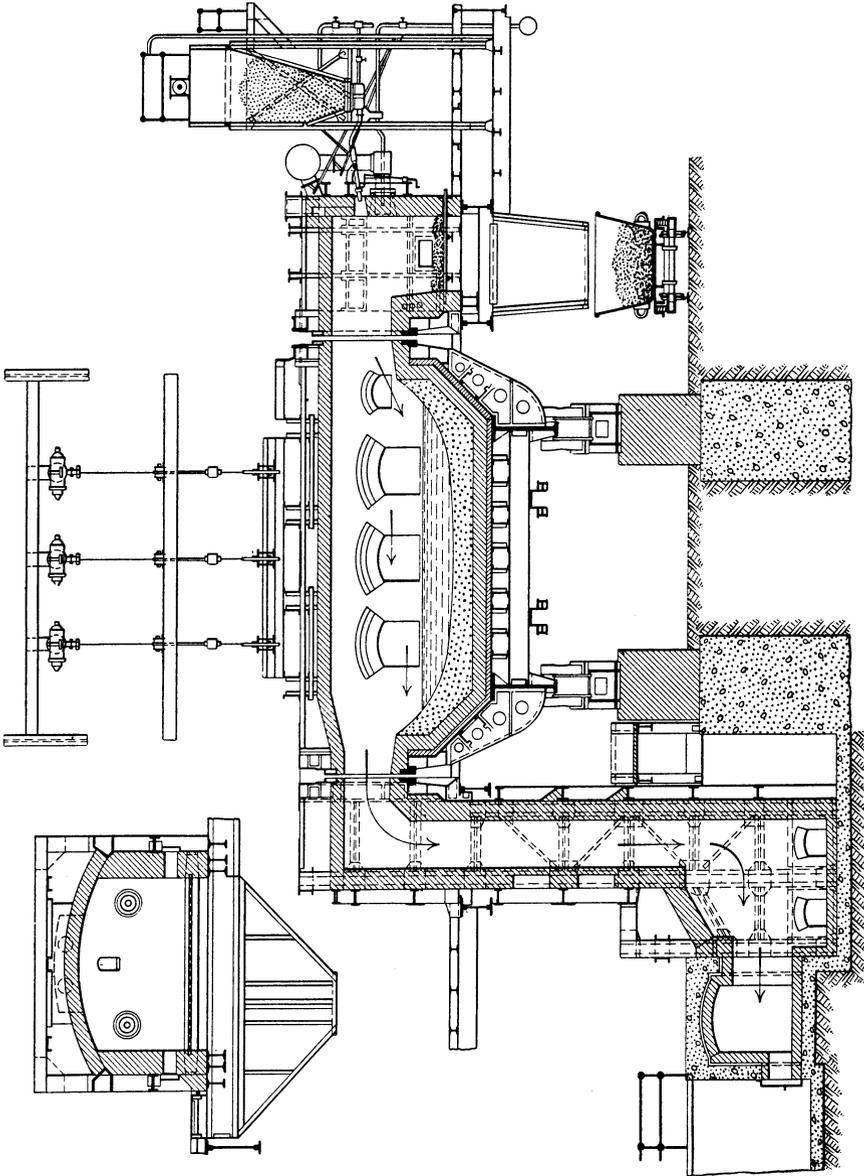


Abb 38. Kohlenstaubgefeuerter Kippherdofen¹⁾.

¹⁾ Aus Journal of the Franklin Institute, Sept. 1916, S. 349.

zur Beheizung von Eisenmischern kommen ähnliche Ausführungen in Betracht.

Es sollte auch erwogen werden, ob nicht bei kohlenstaubgefeuerten Martinöfen zur Befuerung von nur einer Seite überzugehen wäre. Die größere Lenksamkeit der Flamme gestattet eine bessere Beherrschung des Bades als bei Gasfeuerung und würde die doppelseitige Brenneranordnung vielleicht überflüssig machen. Der Schaltplan der Kammern müßte der gleiche wie bei Hochofenwinderhitzern (Cowpern) sein.

IV. Staubfeuerungen zur Schweißisenerzeugung.

a) Puddelöfen¹⁾.

Der Umstellung von Puddelöfen auf Kohlenstaubfeuerung stellen sich keine wesentlichen Schwierigkeiten entgegen. Bei Öfen mit Rostfeuerung dient die Vorkammer als Verbrennungsraum, in dem sich ein Teil der Schlacke und Asche ansammelt (30 bis 60⁰/₀) und dessen Boden aus einem Knüppelrost besteht, der von Zeit zu Zeit durch Aufheben entschlackt wird. Der Brennstoff wird zweckmäßig durch Niederdruckbrenner zugeführt. Die in den Herdraum mitgerissene Schlacke fließt aus diesem ab oder tropft beim Ausziehen von den Luppen ab. Als Vorzüge der Kohlenstaubfeuerung sind zu nennen: Kontinuierlicher Betrieb ohne häufiges Entschlacken und Abkühlen des Ofens, gute Verbrennung, geringerer Brennstoffverbrauch als bei Generatorbetrieb und Handfeuerung, Regelbarkeit der Flamme [oxydierend und reduzierend] und eine Steigerung des Ausbringens. Bei Umstellung von Hand- auf Kohlenstaubfeuerung muß man damit rechnen, daß die Leistung der Abhitzeessel sinkt, was auf den guten Wärmeübergang von der Kohlenstaubflamme an das Bad und die geringeren Abgasverluste hindeutet.

An Betriebsdaten findet man:

1. Kohlenverbrauch 600 kg/t gegen 1500 kg/t bei Rostfeuerung, Luppengewicht 300 kg²⁾.

2. Bei einer Anlage von 31 Öfen wurde bei Umstellung von Hand- auf Kohlenstaubfeuerung die Zahl der Hitzen von 4 auf 5 erhöht. Jede Hitze war weniger als zwei Stunden; Luppengewicht: 110 kg²⁾.

3. Bei Luftvorwärmung auf 280⁰ gegenüber kalter Luft von 17⁰ wurde eine Brennstoffersparnis von 10⁰/₀ erzielt³⁾.

¹⁾ Herington, Powdered Coal as a Fuel, New York 1920, S. 134.

²⁾ Harvey, Pulv. Coal Systems in America, London 1919, S. 33.

³⁾ „ The use of pulv. coal, London 1920, S. 44.

4. Brennstoffverbrauch 250 kg/t gegenüber 400 kg/t bei Generatorgas bei gleicher Kohlenart und gleicher Zusammensetzung des Stahles¹⁾).

5. Bei Umstellung von Hand- auf Kohlenstaubfeuerung sank die Leistung der Abhitzekeessel, was zum Einbau von Abhitzekeesseln bei anderen Öfen zwang. Beste Resultate bei Kohle mit 37,6% flüchtige Bestandteile, 55,3% festem C; 0,75% S; 5,63% Asche; 3,96% Feuchtigkeit und 7800 WE oberem Heizwert²⁾).

6. Kohlenstaubverbrauch bei Herstellung hochwertigen Materials aus grauem Roheisen 550 bis 740 kg/t bei 260° Lufterhitzung in schmiedeeisernen Rohren vor dem Abhitzekeessel gegen 1000 bis 1500 kg bei Handfeuerung³⁾).

Nach privaten Mitteilungen sollen kürzlich in Schottland Puddelwerke auf Kohlenstaub umgestellt worden sein.

b) Schweiß- und Paketöfen.

Zweck dieser Öfen ist, Schrottpakete auf Schweißhitze zu bringen, damit sie unter Hämmern zu Luppen geschlagen werden können.

Die Anordnung der Verbrennungskammern, die Aschenentfernung und die auftretenden Temperaturen sind ähnlich wie bei Puddelöfen.

An Betriebsdaten findet man:

1. 3% Ersparnis an Abbrand (Zunder) gegenüber Gasöfen⁴⁾.
2. Schweißöfen mit vorgebauter Aero-Mühle und Ventilator (siehe Seite 27) von Handfeuerung auf Kohlenstaub umgestellt; der Rost verblieb im Ofen; zweiteiliger Ofen, 1100° im Vorwärmeherd und 1450° im Schweißherd; über Ofen Babcock & Wilcox-Abhitzekeessel. Während einer fünfmonatigen Betriebszeit kam Grus- und Staubkohle mit 10% flüchtigen Bestandteilen und 25% Asche zur Verwendung an Stelle langflammiger Schmiedekohle bei Handfeuerung. Ersparnis an Brennstoff ca. 35 Gewichtsprozent. In 9 Stunden 72 Schweißungen gegenüber 55 in 10 Stunden bei Handfeuerung. Hervorgehoben wird gute Regelbarkeit der Flamme (oxydierend, neutral oder reduzierend), gleichmäßige Hitze, Fortfall geübter Stocher und Verbesserung des Erzeugnisses. Bei Anthrazit trat keine Schwierigkeit der Zündung ein; die Temperaturen hielten sich auf 1480°. Bei Torfstaub sank die Temperatur auf 1200⁵⁾).

¹⁾ Harvey, The use of pulv. coal, London 1920, S. 56.

²⁾ Pulv. fuel, Comm. of Conservation, Ottawa, Can. 1919, S. 28, 29 u. 33.

³⁾ Proceedings of the Eng. Soc. of Western Penna, Oct. 1913.

⁴⁾ Harvey, Pulverized Coal Systems in America, London 1919, S. 32.

⁵⁾ Technique moderne, Februar 1920, S. 81 f.

V. Staubfeuerungen in Walzwerken.

a) Stoß- und Rollöfen.

Zweck: Die vom Stahlwerk kommenden Blöcke, Platinen oder Barren werden am Ofenende eingeführt und den heißen Rauchgasen entgegen nach dem Flammende des Ofens bewegt und auf Schweißhitze gebracht.

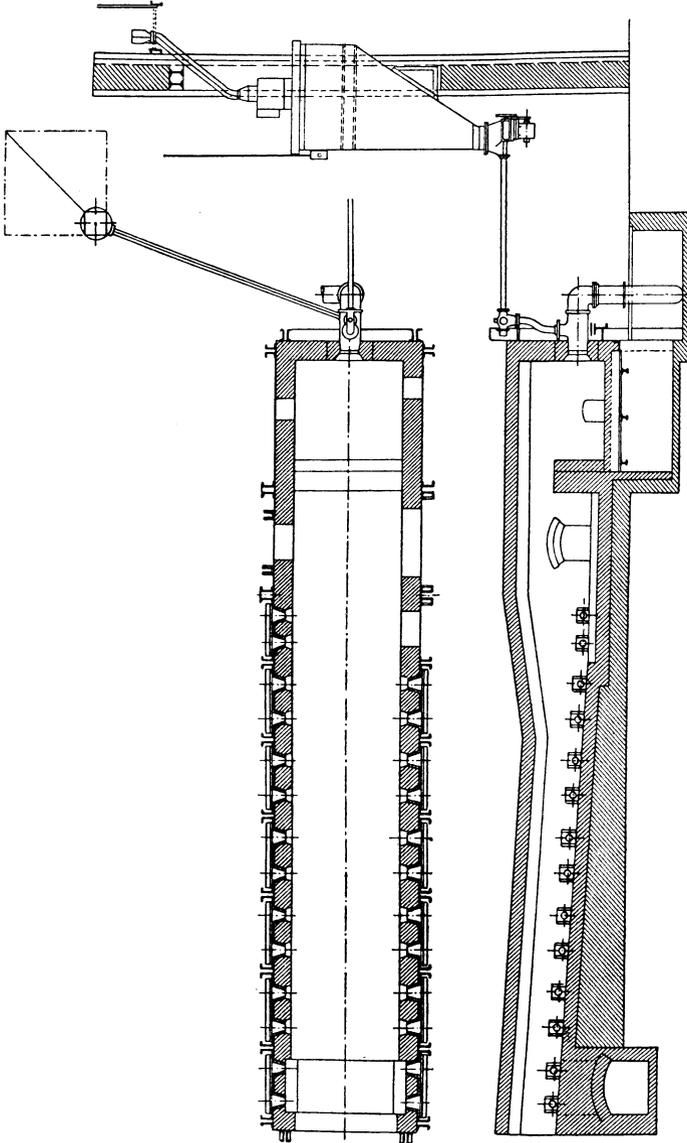


Abb. 34. Kohlenstaubgefeuerter Rollofen.

Soweit bekannt, befinden sich in Amerika zur Zeit etwa 45 kohlenstaubgefeuerte Stoß- und Rollöfen in Betrieb.

Ist der Ofen mit einer gewöhnlichen Rost- oder Halbgasfeuerung oder einer Regenerativgasfeuerung versehen, so ist die Umstellung auf Kohlenstaub einfach, weil die zur Verbrennung und Schlackenabsonderung nötigen Volumina bereits vorhanden sind. Dagegen muß bei Übergang von einfachen Generator- oder Koksgasfeuerungen zu Kohlenstaubbetrieb bisweilen erst eine Vorkammer geschaffen werden, die als Verbrennungsraum und Schlackentasche dienen soll.

Wegen der hohen Flammentemperaturen der Staubfeuerung werden Regenerativkammern oder Rekuperatoren überflüssig. Die fühlbare Wärme der Abgase kann daher ausschließlich in Abhitzeesseln verwertet werden.. (Siehe Seite 100 f.).

Vorteile der Kohlenstaubfeuerung:

1. Brennstoffersparnis gegenüber Generator- und Halbgasbetrieb mindestens 15⁰/₀, bei langen Warmhaltepausen noch mehr.
2. Keine Stocharbeit, keine Entschlackungsperioden; kontinuierlicher und maschineller Betrieb.
3. Leichtere Regelbarkeit der Flamme als bei Rost-, Halbgas- und Generatorgasfeuerungen.
4. Niedrigere Anlagekosten als bei Generatorgasbetrieb (siehe Seite 106).
5. Geringerer Abbrand wegen des kleineren Luftüberschusses der Kohlenstaubflamme.

Bei richtiger Konstruktion wird ein großer Teil (ca. 40⁰/₀) der flüssigen Schlacke in der Verbrennungskammer abgeschieden (durch Flammenumkehr oder eine Feuerbrücke), während sich der kleinere Teil (ca. 20⁰/₀) als Tropf Schlacke am Gewölbe des vorderen Ofens festsetzt. Der Rest dürfte erstarren und durch die Züge entweichen. Die Flugasche, die auf dem Herde niederfällt, bereitet in der Regel keine Schwierigkeit. Bei zwei auf Braunkohlenstaub umgestellten Stoßöfen niederrheinischer Hüttenwerke konnten keine nachteiligen Wirkungen von Schlacke oder Flugstaub festgestellt werden.

Betriebsdaten:

1. Stoßofen ermöglichte bei Umstellung von Handfeuerung auf Kohlenstaub eine Verringerung der Arbeiter von 36 auf 7 Mann pro 24 Stunden; der Brennstoffverbrauch sank von 225 auf ca. 80 kg pro t¹).
2. Stoßofen I für 200 × 200 × 3000 mm Blöcke; Durchsatz 310 t in 12 Stunden bei heißem Einsatz.

¹) The Blast Furnace and Steel Plant, Sept. 1920, S. 531.

Stoßofen II für $200 \times 200 \times 3000$ mm Blöcke; Durchsatz 200 t in 12 Stunden bei kaltem Einsatz.

Stoßofen III für $100 \times 100 \times 1400$ mm Blöcke; Durchsatz 91 t in 12 Stunden bei kaltem Einsatz.

Öfen I bis III setzten bei kaltem Einsatz und einwöchigem ununterbrochenem Betriebe in 12 Stunden 485 t mit 22,7 t Kohlenverbrauch durch; das entspricht 47 kg/t. Jeder Ofen hat sechs vierzöllige wassergekühlte Brenner¹⁾.

3. Kohlenverbrauch eines Stoßofens = 70 kg/t; Spitzenverbrauch = 62,5 kg/t²⁾.

4. Stoßofen für $125 \times 175 \times 4200$ mm Blöcke; Kohlenverbrauch bei Handfeuerung = 100 kg/t, bei Kohlenstaubfeuerung = 76 kg/t³⁾.

5. Stoßofen für 660 mm Straße; Kohlenverbrauch bei kaltem Blockeinsatz 50 bis 60 kg/t. Kohle hat 32% flüchtige Bestandteile, 56% festen C, 11% Asche; Kraftverbrauch zum Mahlen = 11 kwst/t; wenn Brenner nicht gut ausgerichtet sind, ist Verschleiß der Ofenausmauerung größer als bei Rostfeuerung⁴⁾.

b) Wärmöfen (Schweiß- oder Flammöfen).

Zweck: Erwärmen von Blöcken oder Platinen auf Schweißhitze. Die Öfen ähneln in ihrem Aufbau bis auf den flachen Herd den Puddelöfen. Für die Umstellung auf Kohlenstaub und die dabei zu

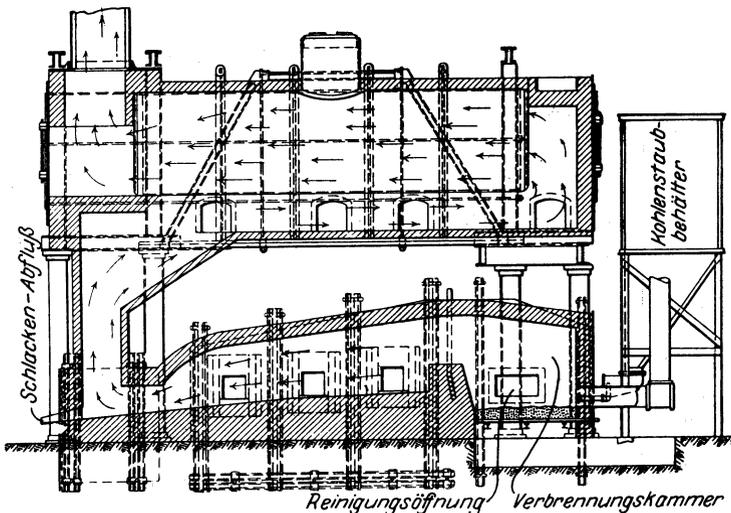


Abb. 35. Kohlenstaubgefeuerter Wärmofen.

¹⁾ Herington, Powdered Coal as a Fuel, New York 1920, S. 208.

²⁾ Harvey, Pulverized Coal Systems in America, London 1919, S. 31.

³⁾ Bansen, St. & E., 16. Sept. 1920, S. 1230.

⁴⁾ Pulverized Fuel, Commission of Conservation, Canada, S. 31 u. 32.

erzielenden Vorteile gilt das bei Puddel- sowie bei Stoß- und Rollöfen Gesagte.

In Amerika werden zur Zeit etwa 70 Wärmöfen mit Kohlenstaub beheizt.

Betriebsdaten.

1. Wärmofen; Kohlenverbrauch = 225 kg/t gegenüber 450 kg bei Rostbefeuerung von Hand¹⁾.

2. Wärmofen für 300 mm Walzenstraße: Kohlenverbrauch 270 kg/t.

Wärmofen für 400 mm Walzenstraße: Kohlenverbrauch 260 kg/t²⁾.

3. Acht große Wärmöfen brauchen 320 t Kohlenstaub pro Woche; Asche einmal wöchentlich durch Kippwagen aus Rauchgaskanal von $1,8 \times 1,8$ m Querschnitt und 90 m Länge entfernt. Kohlenersparnis gegenüber Handfeuerung = 30 bis 40⁰/₀; Niederdruckflamme und guter Kaminzug vorteilhaft³⁾.

c) Durchweichungsgruben und Tieföfen.

Zweck: Erwärmung von Blöcken oder Brammen, die zu kalt vom Stahlwerk kommen, um ausgewalzt zu werden.

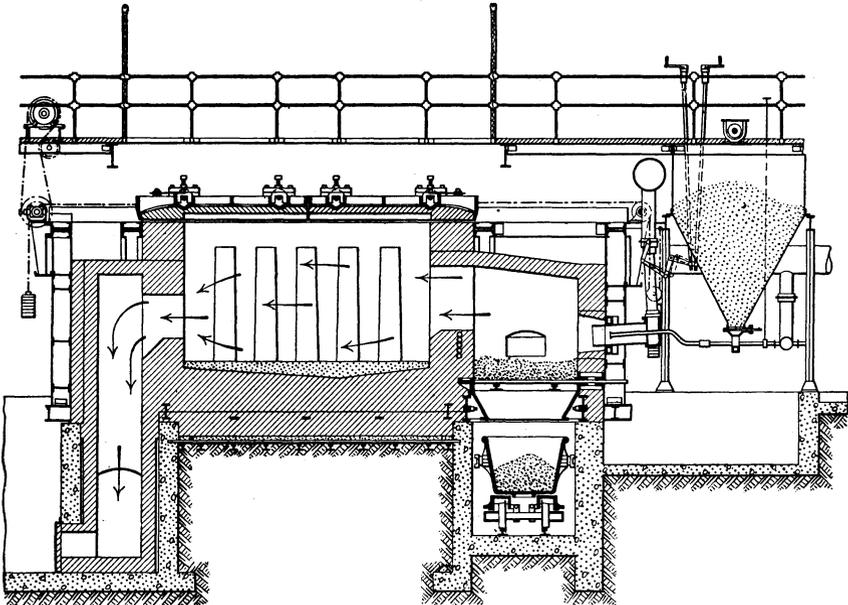


Abb. 36. Kohlenstaubgefeuerter Blockwärmofen⁴⁾.

¹⁾ Harvey, The use of pulverized coal, London 1919, S. 57.

²⁾ Proceedings of the Engineering Society of Western Pennsylvania, Okt. 1913, S. 387 f. ³⁾ The Blast Furnace & Steel Plant, Juli 1920, S. 417 f.

⁴⁾ Journal of the Franklin Institute, Philadelphia, Pa., Sept. 1916, S. 345.

Bezüglich Umstellung und der dabei zu erzielenden Vorteile gilt das für Stoß- und Rollöfen Gesagte.

Ein Blockwärmofen mit verfahrbaren Deckeln ist in Abb. 36 gezeigt, aus der die Konstruktion und Arbeitsweise ohne weiteres hervorgeht¹⁾.

Betriebsdaten:

1. Als Brennstoffverbrauch werden 95 kg/t Stahl bei Blöcken von 1450 kg Gewicht angegeben¹⁾. Die Durchweichung soll gleichmäßiger, der Abbrand geringer als bei Öl oder Gasfeuerung sein.

VI. Staubfeuerungen in Blechwalzwerken.

a) Blechwärm- und Doppelöfen.

Zweck der Öfen ist Erhitzung von Blechen auf Schweißhitze zur Verarbeitung zwischen den Walzen.

Schätzungsweise werden in Amerika 350 Öfen mit Kohlenstaub befeuert. Bezüglich des Ofenumbaues bei Umstellung auf Kohlenstaub ist das bei Stoß- und Rollöfen Gesagte sinngemäß zu berücksichtigen. Abb. 37 zeigt einen kohlenstaubgefeuerten Wärmofen.

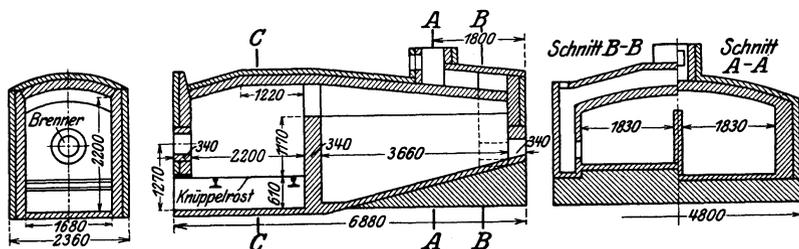


Abb. 37. Kohlenstaubgefeuerter Blechwärmofen

Als wesentliche Vorteile gegenüber anderen Feuerungsarten werden angegeben²⁾:

1. Eine wesentliche Brennstoffersparnis.
2. Eine gleichmäßigere Temperatur.
3. Die Bleche werden weicher und vertragen eine größere Anzahl Stiche, bevor sie wieder erhitzt werden müssen.

¹⁾ Harvey, Pulverized Coal Systems in America, London 1919, S. 30.

²⁾ Herington, Powdered Coal as a Fuel, New-York 1920, S. 249. — Harvey, Pulverized Coal Systems in America, London 1919, S. 34. — Iron Age, 11. Dez. 1919, S. 1167f.

4. Es läßt sich mit reduzierender Flamme arbeiten; daraus folgt

5. daß die Walzen nicht so häufig poliert zu werden brauchen und

6. die Bleche weniger leicht verbrennen.

7. Die Zahl der „Kleber“ nimmt um etwa 60% ab, so daß infolge geringeren Ausschusses die Leistung zunimmt.

Betriebsdaten¹⁾:

1) Es betrug der Brennstoffverbrauch bei

Kohlenstaubfeuerung	130 bis 150 kg/t	Bleche
selbsttätiger Rostbeschickung . .	200 „ 225 „	„
Handfeuerung	225 „ 300 „	„
Generatorgas	ca. 300 „	„ ²⁾ .

2. Nach einer Angabe ist Kohle mit 22% Asche ohne schädliche Einflüsse auf Blechgut und Walzen verwandt worden.

3. Kohlenverbrauch 145 kg gegenüber 175 bis 225 kg/t bei Rostbetrieb.

4. Blechwärmofen für 25 mm-Bleche von 480 kg Gewicht; Kohlenstaub 72 kg gegenüber 130 kg/t.

b) Glühöfen.

Diese haben den Zweck, dem fertigen Blecherzeugnis die gewünschte Zähigkeit wiederzugeben, die im Laufe der Herstellung durch Bearbeitung und schroffen Temperaturwechsel verloren gegangen ist. In den Ver. Staaten sind etwa 160 Blechglühöfen mit Staubfeuerungen in Betrieb.

Abb. 38 zeigt den Querschnitt durch die Mitte eines Kasten-glühofens mit Unterfeuerung und fahrbarem Herd. Die Verbrennungskammer ist gegen das Blechgut fast gänzlich abgeschlossen, so daß dieses den hohen Verbrennungstemperaturen nicht unmittelbar ausgesetzt ist. Die Wärmeübertragung geht vornehmlich durch Leitung und Berührung, weniger durch Strahlung, vor sich. Durch zusätzliche Luftöffnungen im Herdraum läßt sich die gewünschte Glüh-temperatur von 700 bis 900° erzielen. Die Schlacke und ein Teil der Asche wird am tiefsten Punkt der Verbrennungskammer abge-

¹⁾ Herington, Powdered Coal as a Fuel, New-York 1920, S. 249. — Harvey, Pulverized Coal Systems in America, London 1919, S. 34. — Iron Age, 11. Dez. 1919, S. 1167f.

²⁾ Der Brennstoffverbrauch bei Generatorgasbetrieb erscheint im Vergleich zu den anderen Feuerungsarten auffällig hoch und deutet auf schlechte Pflege der Generatoren hin.

zogen, während sich der feine Flugstaub auf den Kästen und in den Abgaszügen ablagert und leicht entfernt werden kann¹⁾.

In einem Ofen können mehrere derartige Verbrennungskammern nebeneinander angeordnet und durch vertikale Wandungen voneinander getrennt werden; die fühlbare Rauchgaswärme kann durch eisernen Rekuperatoren, die sich ebenfalls unter dem Glühraum befinden, zur Vorwärmung der Sekundärluft verwandt werden.

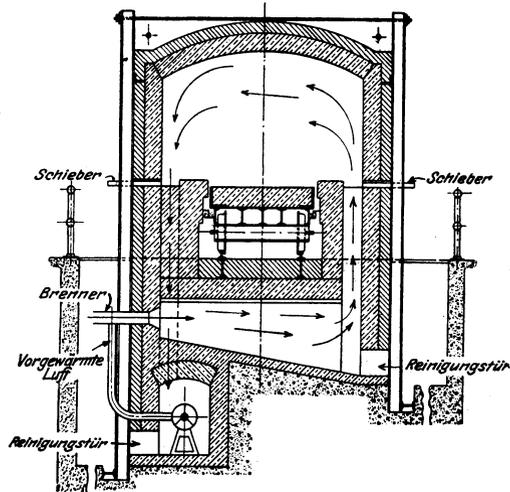


Abb. 38. Kohlenstaubgefeuerter Blechglühofen mit fahrbarem Herd. (Fuller).

Als wesentliche Vorteile der Kohlenstaubfeuerung bei diesen Öfen sind zu nennen:

1. Die Aufrechterhaltung gleichmäßiger Temperaturen über lange Zeitspannen und dadurch
2. längere Lebensdauer der Kästen, sowie Ersparnis an Metall der Packung und des Glühgutes.
3. Weniger Bedienungspersonal.

Betriebsdaten:

1. Die Zahl der Reisen der Glühkästen wird in einem Falle mit 40 bis 50 angegeben²⁾.
2. Auf einem Blechwalzwerk wurden als Brennstoffverbrauch 85 kg pro 1000 kg geglühte Bleche gefunden³⁾. (Diese Ziffer schwankt natürlich mit Dicke und Art der Bleche.)

c) Verzinkungswannen.

Für diese wird der Kohlenverbrauch in einem Feinblechwalzwerk mit 55 kg und weniger pro 1 t Blech angegeben³⁾.

¹⁾ Harvey, Pulv. Fuel Systems in America, London 1919, S. 34.

²⁾ Herington, Powdered Coal as a Fuel, New York 1920, S. 195 f.

³⁾ Iron Age, 11. Dez. 1919, S. 1167f.

VII. Staubfeuerungen in Eisen- und Stahlgiebereien.

a) Kern- und Sandtrockenöfen.

Abb. 39 zeigt die Ausführung eines amerikanischen Kerntrockenofens¹⁾, der ursprünglich für Ölfeuerung gebaut worden war. Die Verbrennungskammer unter dem Trockenraum war in ihrer alten Form nichts wie ein kastenförmiger Raum, in den die Ölbrenner in

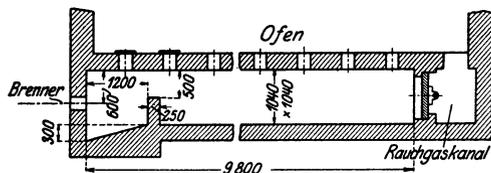


Abb. 39. Kohlenstaubgefeuerter Kerntrockenofen.¹⁾

halber Höhe einmündeten. Bei der Umstellung auf Kohlenstaub mußte die Verbrennungskammer jedoch wegen unvollkommener Verbrennung mehrfachen Veränderungen am linken (Brenner-)Ende unterzogen werden, und erhielt schließlich die auf der Abbildung gezeigte Form mit Feuerbrücke und schrägem Boden für Schlackenentfernung; auf diese Weise gelang es, die Hitze zusammenzuhalten und genügend hohe Kammertemperaturen zu erhalten. Außerdem mußte ein besonderer Rauchgasabzug vorgesehen werden, der unter Umgehung des Trockenraumes unmittelbar zum Schornstein führt und beim Anheizen benutzt wird, damit keine unverbrannten Teile (Ruß) zum Trockengut gelangen. Erst wenn genügend hohe Kammertemperaturen erreicht sind, kann der Abgasstrom umgeschaltet und über das Trockengut geleitet werden. Die dabei auf den Formkästen abgelagerte Aschenstaubdecke war ungefähr $\frac{1}{2}$ mm dick.

Die Brenner im Trockenraum selbst anzubringen ist untunlich, nicht nur wegen der heißen und langen Flamme, sowie der unumgänglichen Vorheizung durch ein Lockfeuer, sondern auch wegen der zu erwartenden Beschädigung des Trockengutes durch Asche und Schlacke.

Man gewinnt den Eindruck, daß sich eine ausgesprochene Hochtemperaturbeheizung wie die Kohlenstaubfeuerung für einen periodisch arbeitenden Trockenprozeß mit verhältnismäßig niedrigen Temperaturen nicht sonderlich eignet, und wenn überhaupt, vielleicht noch am ehesten zum Trocknen von Kernen für Stahlgußformstücke in Frage kommt.

¹⁾ Herington, Powdered Coal as a Fuel, New York 1920, S. 204f.

b). Gießereien [Herdschmelzöfen]¹⁾.

Abb. 40 zeigt einen Herdofen für Gußeisen in einer Tempergießerei. Der Schmelzprozeß läßt sich durch die leichte Regelbarkeit der Flamme, gut führen. Da man bei Kohlenstaubbetrieb mit niedrigem Luftüberschuß arbeiten kann, läßt sich der Abbrand von

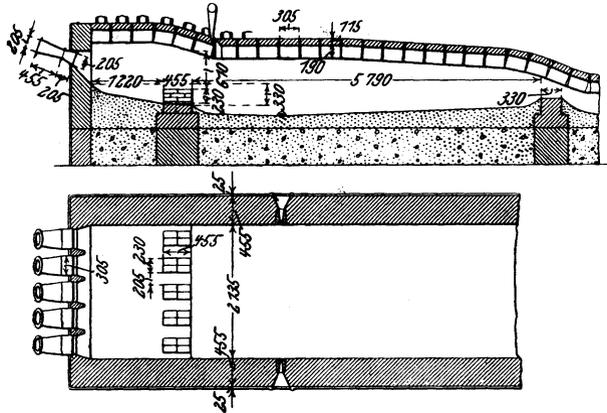


Abb. 40. Kohlenstaubgefeuerter Herdofen.

Silizium und Kohlenstoff niedrig halten. Die Flamme kann auf das Bad gerichtet werden, so daß die bei Handfeuerung üblichen Luftlöcher an der Decke, durch welche die heißen Gase vom Gewölbe weg und auf das Bad gerichtet werden sollen, hinfällig werden. Kohlen mit niedrigem Asche- und Schwefelgehalt sind erwünscht [Asche $\leq 10\%$; Schwefel $\leq 1,5\%$]. Die Vorteile der Kohlenstaubfeuerung gegenüber der Generatorgasfeuerung sind ähnliche wie bei Martin- sowie Roll- und Stoßöfen (siehe S. 80). Gegenüber Handfeuerungen bietet die Kohlenstaubfeuerung den Vorteil kontinuierlichen Betriebs ohne Entschlackungsperioden.

Ob Kohlenstaubfeuerungen oder den neuerdings in Amerika bei Schmelzöfen mehrfach verwandten Unterschubfeuerungen mit Unterwind der Vorzug zu geben sein wird, bleibt abzuwarten.

Betriebsdaten:

1. Herdofen für Tempergießerei³⁾.

Umstellung von Hand- auf Kohlenstaubfeuerung durch Höherziehen des Verbrennungskammergewölbes um 7,6 cm; fünf

¹⁾ The foundry, Dezember 1916, S. 499 f.

²⁾ The foundry, November 1917, S. 487 f.

³⁾ The foundry, 15. Februar 1920, S. 136 f.

Brenner, davon drei im Betrieb; Fassungsraum: 9 t; Länge zwischen Feuer- und Fuchsbrücke: 4,72 m; Breite zwischen den Stichlöchern: 1,68 m; Verbrennungskammer $1,00 \times 1,5$ m; Höhe der Wände an Stichlöchern: 0,8 m; Tiefe des Bades: 0,23 m.

	1. Schmelze	2. Schmelze	3. Schmelze
Durchschnittl. Schmelzdauer . Std.	6,25	4,25	4,08
Leistung t	8,38	8,4	8,36
Leistung je Stunde (Gesamtofenzeit) t	1,34	1,97	2,1
Leistung je Stunde reine Schmelzzeit t	2,24	2,34	2,44
Kohlenverbrauch t	3,28	2,26	2,17
Kohlenverbrauch pro t kg	392	269	259
Roheisen in Einsatz %	42,7	40,8	41,24
Silizium in Einsatz %	0,985	0,976	0,976
Mangan „ „ %	0,46	0,58	0,58
Silizium in Erzeugnis %	0,82	0,83	0,85
Schwefel „ „ %	0,07	0,068	0,076
Mangan „ „ %	0,33	0,37	0,44
Kohlenstoff in „ %	2,00	2,58	2,66
ZerreiBfestigkeit kg/qcm	3760	3960	3730

Der Kohlenstaub hatte folgende Zusammensetzung:

Feuchtigkeit	1,64 ^{0/0}
Fester Kohlenstoff . . .	54,98 ^{0/0}
Schwefel	0,76 ^{0/0}
Flüchtige Bestandteile .	37,43 ^{0/0}
Asche	5,95 ^{0/0}
Heizwert (oberer) . . .	7560 WE/kg.

Die Siebprobe ergab:

24 ^{0/0}	Rückstand auf 6200 Maschen/qcm
28 ^{0/0}	„ „ 8900 „ „
44 ^{0/0}	„ „ 14000 „ „

Es bildete sich weniger Erzschlacke auf dem Bad als bei Handfeuerung. Dies wird mit der Annahme erklärt, daß bei der Kohlenstaubflamme ein geringerer Betrag an Silizium, Mangan und Kohlenstoff aus dem Bad oxydiert. Die gesamte Aschen- und Schlackenmenge auf dem Bad war geringer als bei Handfeuerung, weil das Minus an Erzschlacke das Plus an Kohlenasche und -schlacke überwog.

2. Herdofen für TempergieBerei¹⁾.

Länge zwischen Feuer- und Fuchsbrücke: 7,54 m; Breite des Herdes = 2,14 m; Einsatzgewicht: 9000 bis 11000 kg; Kohlenstaub-

¹⁾ The foundry, Nov. 1917, S. 487 f.

verbrauch: 310 bis 460 kg/1000 kg Eisen; Schmelzdauer 3,6 bis 4,7 Stunden, entsprechend 18 bis 26 Min./t Einsatz; Verlust an Silizium: 0,26 bis 0,46⁰/_o. Anfänglich betrug der Kohlenverbrauch bei 50 bis 70 Minuten Betriebszeit bis 800 kg/t und wurde durch richtige Einstellung der Brenner erniedrigt.

c) Glühöfen.

Zweck: Glühen zur Darstellung von schmiedbarem Guß im Temperverfahren oder Glühen von Stahlguß zur Beseitigung von Materialspannungen.

In den Vereinigten Staaten sind etwa 250 kohlenstaubgefeuerte Glühöfen in Tempergiebereien und Stahlgiebereien im Betrieb¹⁾.

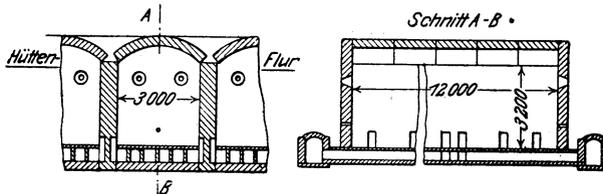


Abb. 41. Kohlenstaubgefeuerter Tiefofen als Glühofen¹⁾.

Den wesentlichen Erfordernissen, nämlich gleichförmige Temperaturen, sowohl örtlich wie zeitlich, kann bei zweckmäßiger Brenneranordnung bei Kohlenstaubbetrieb besonders gut Rechnung getragen werden. Ein leichter Überdruck im Ofen hat sich im Interesse einer gleichmäßigen, über den ganzen Glühräum ausgedehnten Temperatur als wünschenswert ergeben, — eine Bedingung, die bei Kohlenstaubfeuerung gut, bei Handfeuerung wegen des häufigen Öffnens der Feuerungstür kaum zu erfüllen ist.

Die gleichförmigere Durchglühung bei Kohlenstaubbetrieb hat eine beträchtliche Ersparnis an Glühzeit zur Folge²⁾.

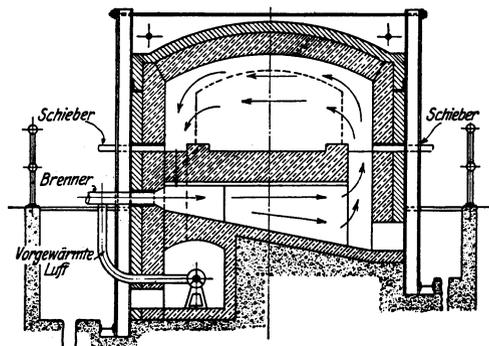


Abb. 42. Kohlenstaubgefeuerter Kasten-
glühofen (Fuller).

Abb. 41 zeigt einen als Tiefofen ausgebildeten amerikanischen Temperglühofen mit vier Brennern von etwa 50 t Gußeinsatz.

¹⁾ Herington, Powdered Coal as a Fuel. New-York 1920, S. 195.

²⁾ Siehe Tafel 5 und The Blast Furnace and Steel Plant, Juli 1920, S. 417.

Die mit diesem Ofen erzielten Betriebsergebnisse sind unter Nr. 1 der folgenden Tafel angegeben.

Ein kontinuierlich arbeitender amerikanischer Glühofen mit fahrbarem Herd ist in Abb. 42 dargestellt. Für die Ofenkonstruktion gilt das gleiche wie für den auf S. 84 f. beschriebenen Kasten-glühofen.

Betriebsdaten:

Einige amerikanische Betriebsergebnisse sind in Zahlentafel 5 zusammengestellt. Ein Werk hat seine Glühöfen 10 Jahre lang mit Kohlenstaub der folgenden Zusammensetzung erfolgreich betrieben: Asche: 19,5⁰/₀; Schwefel: 3,53⁰/₀; flüchtige Bestandteile: 24,62⁰/₀; Heizwert: 6120 WE.; später ging man mit Rücksicht auf seltenere Reinigung des Ofens zu hochwertigeren aschearmen Kohlen über¹⁾. Ein anderes Werk berichtet eine Ersparnis an Glühzeit von 50⁰/₀ und bessere Qualität als bei Handfeuerung²⁾.

Zahlentafel 5.

Nr.	Anheizzeit	Temp. im Ofen ° C	Brennstoff- verbrauch	Bemerkungen
1	14—18 Std. bei Kohlenstaub 22—24 " " Öl 26 " " Naturgas	870	—	Ofentemper. wurde 5 Tage lang auf 870 ⁰ gehalten; größte Temperaturabweichung = 22 ⁰ C ³⁾ .
2	11—14 Std. bei Kohlenstaub 24—36 " " Hand- feuerung	—	225 kg/t Guß bei Kohlenstaub 450—560 kg/t Guß bei Handfeuerung	Bei Kohlenstaubfeuerung wurden gleichmäßigere Temperaturen als bei Handfeuerung erzielt ³⁾ .
3	—	—	170 kg/t Guß bei Kohlenstaub ca. 500 kg/t bei Handfeuerung	Bei Kohlenstaubfeuerung ließ sich gleichmäßigeres Glühen als bei Handfeuerung erzielen ⁴⁾ .
4	72 Stunden	870	335 kg/t Guß bei Kohlenstaub	Kohlenstaubfeuerung an 13 Öfen seit 14 Jahren in Betrieb; keine Explosionen während dieser Zeit ⁴⁾ .

¹⁾ Journ. of the Am. Soc. of Mech. Eng., Okt. 1914, S. 359.

²⁾ The Blast Furnace and Steel Plant, Juli 1920, S. 417f.

³⁾ Herington, Powdered Coal as a Fuel, New York 1920, S. 195.

⁴⁾ Harvey, Pulverized Fuel Systems in America, London 1919, S. 34.

VIII. Staubgefeuerte Schmiedeöfen.

Gegenwärtig befinden sich in Amerika schätzungsweise etwa 690 kohlenstaubgefeuerte Schmiedeöfen verschiedenster Größe und Bauart in Betrieb¹⁾. Zu einer Umstellung größeren Umfanges ist u. a. die Baldwin-Lokomotivfabrik geschritten, die in ihrem Werk Eddystone neuerdings etwa 150 Schmiedeöfen mit Kohlenstaub befeuert.

Für den Bau bzw. Umbau der Öfen gelten die gleichen Richtlinien wie bei Stoß- und Rollöfen (siehe S. 79). Bei Rost- und Halbgasfeuerungen steht in der Regel der für die Verbrennungs- und Schlackenammer notwendige Raum bereits zur Verfügung; das gleiche gilt bei Gasfeuerungen mit vor den Ofen gesetzten Siemens-Regenerativkammern; diese werden bei Kohlenstaubfeuerung wegen der hohen Flammentemperaturen überflüssig und lassen sich unschwer in eine Verbrennungs- und Schlackenammer umbauen. Hat dagegen der umzustellende Ofen Gas- oder Ölfeuerung ohne vorgebaute Regenerativkammern, so ist meist ein Vorbau für den Verbrennungsraum vorzusehen, — eine Forderung, die bei alten, zusammengedrängten Betrieben nicht immer leicht zu erfüllen ist.

Als wesentliche Vorteile der Kohlenstaubfeuerung sind anzuführen:

1. Brennstoffersparnis gegenüber Rost- und Generatorgasfeuerungen infolge vollkommenerer Verbrennung (geringere Verluste von Verbrennlichem in Asche und keine Vergasungsverluste) und geringerer Leerlaufverluste²⁾.

2. Ersparnis an Arbeitskräften (Stochern und Aschefahrern)³⁾.

3. Niedrigere Anlagekosten als bei Generatorgasbetrieb³⁾, Fortfall von Rekuperatoren oder Regenerativkammern.

4. Schnellere Hitzen infolge höherer Temperaturen⁴⁾.

5. Gleichmäßigere, weichere Hitze und bessere Schweißverbände⁵⁾.

6. Geringerer Abbrand.

Als Nachteile sind zu berücksichtigen:

1. Bei Preßstahl und Gesenkschmiedewerk greift der am Werkstück haftende Flugstaub zuweilen Stempel und Matrizen an⁶⁾.

2. Bei Kleinschmiedeöfen mit Öl- oder Teerfeuerung erfordert die Umstellung auf Kohlenstaub Absaugvorrichtungen für den Flugstaub. Dadurch wird bei fahrbaren Öfen die Bewegungsfreiheit erschwert.

¹⁾ The American Drop Forger, Juni 1920, S. 300f. ²⁾ Siehe S. 103.
³⁾ Siehe S. 106. ⁴⁾ Railway Age Gazette, 31. Okt. 1913, S. 820. ⁵⁾ Her-
 rington, Powdered Coal as a Fuel, New York 1920, S. 125. ⁶⁾ Harvey, Pulv.
 Coal systems in America, London 1919, S. 31.

Bezüglich der Umstellung ölgefeuerter Öfen sei ferner auf Absatz 1 der Betriebsdaten verwiesen.

Betriebsdaten:

1. Versuch an Schmiedeöfen; erhitzt wurden abwechselnd fünf und sechs Knüppel von $10,2 \times 10,2$ cm Querschnitt, 51 cm Länge und 41 kg Gewicht.

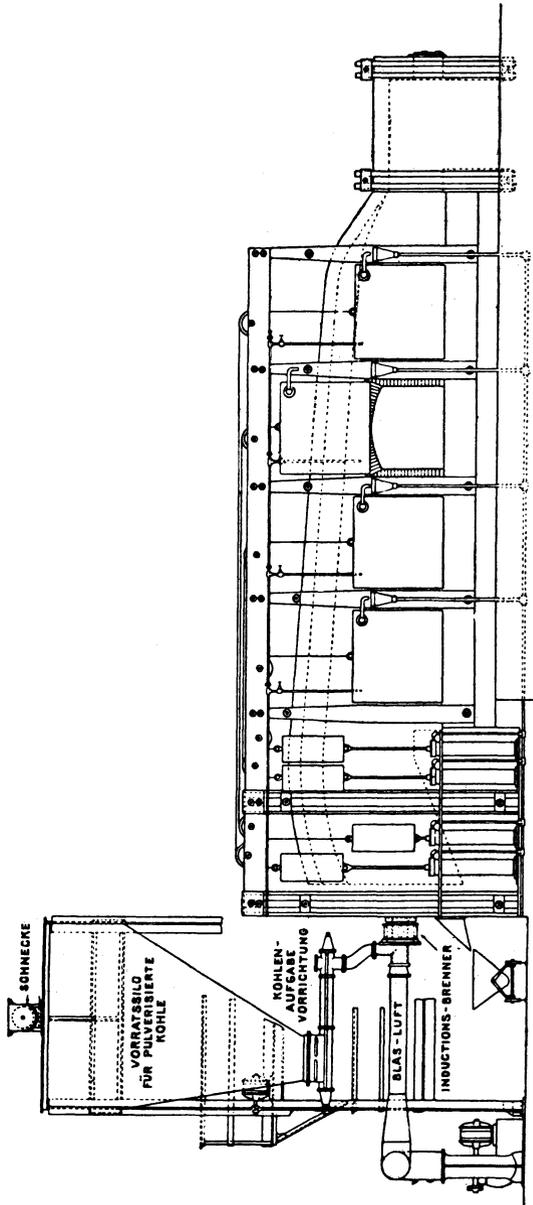


Abb. 43. Kohlenstaubgefeuerter Wärmeofen einer Schmiede (Fuller).

Zahlentafel 6.

	Ofen I	Ofen II	Ofen III
1. Brennstoff	Kohlenstaub	Kohlenstaub	Öl
2. Heizwert (oberer) . . . WE/kg	7800	7800	10800
3. Temperatur der Verbrennungsluft °C	16	334	240
4. Versuchsdauer Std.	60	60	60
5. Zustand des Ofens zu Beginn	kalt	kalt	kalt
6. Durchschnittl. Herdtemperatur °C	1300	1300	1270
7. Zeit pro Hitze einschl. Anheizen Min.	94	85	98
8. Anzahl der Hitzen	8	10	9
9. Zeit pro Hitze ausschl. Anheizen Min.	51	41	44
10. Gesamter Brennstoffverbrauch einschl. Anheizen . . . kg	473	359	235
11. Durchsatz insgesamt . . . kg	1947	2277	2072
12. Brennstoffverbrauch: Durchsatz %	24,3	15,8	11,3
13. WE pro 1 kg Durchsatz . WE	1895	1230	1220

Ein Vergleich der ersten und zweiten Spalte läßt den Kohlenstaubfeuerungen eigenen großen Einfluß einer verhältnismäßig niedrigen Luftvorwärmung auf den Brennstoffverbrauch erkennen¹⁾. Die zweite und dritte Spalte erlaubt einen Vergleich zwischen Kohlenstaub- und Ölfeuerung. In beiden Fällen wurde der gleiche Luftvorwärmer gebraucht; bei Öl wurde die gesamte Luft, bei Kohlenstaub nur die Sekundärluft = 75⁰/₁₀ des gesamten Luftbedarfs erhitzt. Die Wärmeausnutzung ist bei beiden Feuerungsarten die gleiche, während der Durchsatz bei Kohlenstaub 10⁰/₁₀ größer ist. Die Knüppel kamen bei Kohlenstaub weißer und weicher vom Ofen²⁾.

2. 10 Flammöfen mit 5 Abhitzekesteln von je rd. 250 qm Heizfläche; Herdtemperatur = 1300⁰; größerer Teil der Asche sammelt sich im Rauchgaskanal, der täglich gereinigt werden muß. Gegenüber handgefeuerten Rosten ist die Kohlenersparnis 40⁰/₁₀, die Verkürzung der Hitzen = 10⁰/₁₀; geringerer Abbrand; Material kommt fast ohne Asche und Oxydationskruste vom Ziehherd³⁾.

3. viertüriger Schmiedeofen für Lokomotiv-Barrenrahmen, Herd: 1,8 × 5,5 m; Kohlenverbrauch = 175 kg/t gegenüber 325 kg bei Handfeuerung; Zeitersparnis = 20⁰/₁₀⁴⁾.

¹⁾ Siehe Seite 101. ²⁾ Versuch der General Electric Co. Schenectady, N. Y. ³⁾ Herington, Pulv. Coal as a Fuel, New York 1920, S. 235. ⁴⁾ Railway Age Gazette, 31. Oktober, 1913, S. 820.

4. Kohlenverbrauch: 75 kg/t einschließlich Aufbereitung gegenüber 133 kg bei Handfeuerung¹⁾.

5. Ofen für Nietenfabrikation; Herd $0,6 \times 9,1$ m; Ofen leistete in 4 bis 6 Stunden soviel wie bei Naturgas in 10 Stunden²⁾.

6. Ofen zum Schmieden von Schnelldrehstahl unter 1 t-Hammer. Leistung: 1350 kg/12 Std.; Blöcke von $7,6 \times 7,6$ cm auf $3,8 \times 3,8$ cm heruntergeschmiedet; ein Brenner am Ofen; Kohlenverbrauch rd. 45 kg/Std.; Asche bereitete keine Schwierigkeiten³⁾.

7. Ofen zum Schmieden von Elektrokohlenstoffstahl unter 3 t Hammer; Leistung in 12 Stunden:

3800 kg bei Schmieden von 11×11 cm auf 6×6 cm

4400 " " " " 9×9 " " 6×6 "

5500 " " " " 6×6 " " $4,5 \times 4,5$ "

Kohlenverbrauch rd. 45 kg/Std.³⁾

IX. Staubfeuerungen in Metallhütten.

a) Röst- und Muffelöfen.

Auf einer amerikanischen Zinkhütte sollen Röst- und Siemens-Regenerativ-Muffelöfen seit Jahren erfolgreich mit Kohlenstaub geheizt werden. Bei Verwendung einer Kohle von 6400 WE/kg wird der Brennstoffverbrauch des Röstofens bei Rostfeuerung mit 3,25 t, bei Kohlenstaubfeuerung mit nur 2,0 t pro Tonne zu rösten des Zinkerz angegeben. Die Brennstoffersparnis beträgt daher rd. 38⁰/₀⁴⁾.

Bei modernen Siemens-Generativ-Muffelöfen mit 8 Retortenmaß man bei Generatorgasbetrieb und einer Kohle von 6400 WE/kg einen Verbrauch von 800 kg/t Zinkerz und hofft bei Kohlenstaubbetrieb nur 560 kg Kohle zu benötigen⁴⁾. Das würde einer Ersparnis von 30⁰/₀ gleichkommen. Dieser Wert scheint nicht zu hoch gegriffen, wenn man bedenkt, daß bei der Kohlenstaubfeuerung die hohen Vergasungsverluste der Generatoren fortfallen und die Leerlaufverluste geringer sind.

b) Flammöfen.

Flammöfen⁵⁾ werden zum Schmelzen von geröstetem Kupfererz und zur Erzeugung des sog. „Rohsteins“ verwendet. Seine Daseinsberechtigung neben dem Hoch- oder Schachtofen erhielt der

¹⁾ Harvey, Pulverized Coal systems in America, S. 32. ²⁾ Herington, Pulv. Coal as a Fuel, New York 1920, S. 242 u. 247. ³⁾ Iron Age, 24. April, 1919, S. 1068. ⁴⁾ Nach Mitteilungen der Fuller Engeneering Co. ⁵⁾ Pulverized Fuel, Commission of Conservation, Canada, 1919, S. 24f.; Am. Inst. of Mining Eng., Jan./Feb. 1915.

Flammofen dadurch, daß bei ersterem mit Einführung höherer Gebläsedrücke zuweilen übermäßige Flugstaubmengen anfielen, und daß die Erze selbst mit zunehmender Einführung der Erzaufbereitung oft zu feinkörnig wurden, um im Schachtofen verhüttet zu werden. Die Umstellung von Rost-, Öl- oder Generatorgasfeuerung erfordert

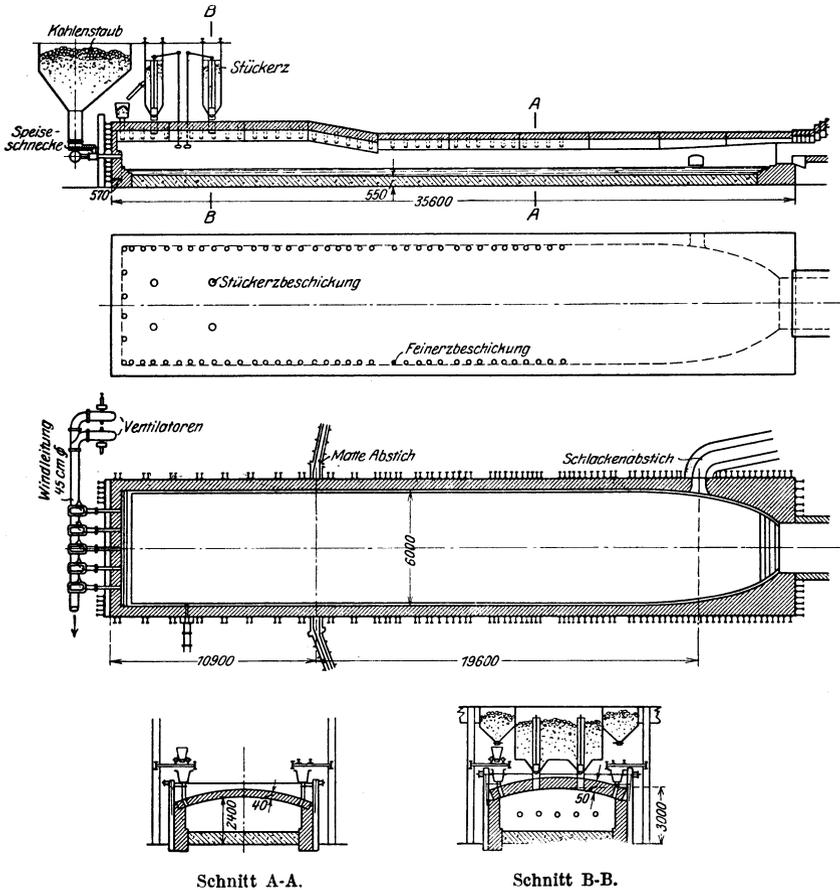


Abb. 44. Kohlenstaubgefeuerter Flammofen einer Kupferhütte.

beim Flammofen keine einschneidenden Umbauten, weil der zur Verbrennung erwünschte große Raum ohne weiteres vorhanden ist; die große Ofenlänge und der annähernd geradlinige Verlauf der Ofendecke gestatten der Flamme freien Auslauf ohne jähe Richtungswechsel und lassen den Flammofen von vornherein für die Kohlenstaubfeuerung besonders geeignet erscheinen. Als ihre Vorzüge sind zu nennen:

1. Kontinuierlicher Betrieb; keine Entschlackung wie bei Rostfeuerung;

2. gleichmäßige Hitze und leichte Regelbarkeit der Ofentemperaturen;

3. Regelung der Flammenlänge je nach den Erfordernissen des Schmelzprozesses;

4. vollkommene Verbrennung und hohe Temperaturen;

5. Ersparnis an Brennstoff und an Arbeitskräften gegenüber Rost- und Generatorgasfeuerung;

6. niedrigere Anlagekosten als bei Generatorgasbetrieb.

Einige Schwierigkeiten machten im Anfang der Entwicklung silikatreiche Schlacken¹⁾; diese setzten sich im Fuchs und im anschließenden Rauchkanal fest und drosselten dadurch den Zug in unzulässiger Weise. Man gibt daher bei verschiedenen amerikanischen Ausführungen dem Fuchs die in Abb. 44 gezeigte Form mit sanfter Deckenneigung und großem lichten Querschnitt und läßt die Abgase ohne jähen Richtungswechsel abziehen. Infolgedessen mußte das Abstichloch vom Ofenende nach einer Seite verlegt werden. Der Fuchs selbst soll leicht zugänglich sein und zwecks Reinigung mit einer Einsteigtür versehen werden. Von der früher üblichen Beschickungsweise abweichend, befinden sich über dem Ofen zwei Reihen Seitenbunker, die sich über etwa $\frac{2}{3}$ der Ofenlänge erstrecken. Aus diesen tritt das Feinerz durch eine Anzahl von sechszölligen Röhren durch die Ofendecke an den Seitenwänden ein. Die Röhren sind in die Decken gut eingepaßt, damit keine Luft mit den Erzen in den Ofen eintreten kann. Durch die Einführung des Feinerzes an den Seiten werden diese gegen Flamme und Bad abgedeckt und vor Schlackenangriff wirksam geschützt. Gleichzeitig wird die Ausstrahlung nach außen verringert. Stückige Erze, Zuschläge und Konverterschlacke werden durch vier weiter nach der Ofenmittellinie gerückte und im vorderen Teil des Ofens befindliche Löcher eingesetzt. Die Brenner liegen in der Stirnwand des Ofens. Abb. 44 zeigt deren fünf mit je 130 mm Mündungsdurchmesser und einem statischen Primärluftdruck von 250 bis 400 mm WS. Die Sekundärluft tritt durch besondere ringförmig um die Brenner angeordnete verstellbare Schlitze oder durch zwischen den Brennern befindliche Öffnungen ein, die durch Ziegelsteine mehr oder weniger geschlossen werden können. Der Ofen steht unter geringem Unterdruck.

Von zwei verschiedenen Werken, die je einen Ofen der obigen Ausführung besitzen, stammen die folgenden Daten²⁾:

1. Größe des Herdes: rd. $34 \times 5,8$ m; Herd aus gestampftem Quarzsand, Seiten und Decke aus saurem Material; normale Einsatz-

¹⁾ Siehe Seite 15.

²⁾ Am. Inst. of Mining Eng., Januar/Februar 1915.

menge 400 bis 450 t/24 Std.; Zug an Stirnwand: 6,5 mm, an Fuchs: 30 mm WS.;

	Februar 1914	März 1914
Ofen im Betrieb	28 Tage	31 Tage
Geröstete Erze	8580 t	9850 t
Schachtofenflugstaub	894 t	768 t
Röstofenflugstaub	175 t	163 t
Konverterschlacke	217 t	— t
Feinerz	1203 t	2093 t
Gesamter Einsatz	11069 t	12874 t
Kohle	1950 t	1899 t
Einsatz pro 24 Stunden	395 t	414 t
Kohle pro 24 Stunden	70 t	61 t
Einsatz : Kohle	5,65	6,77

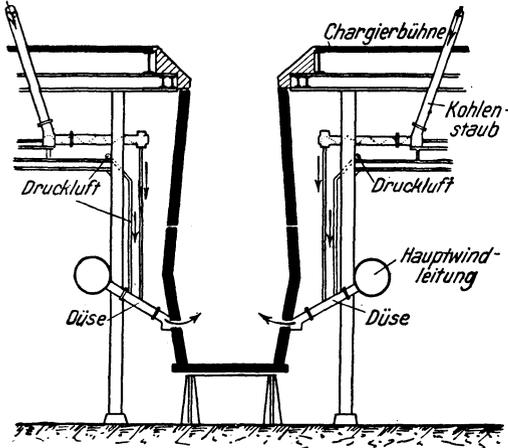
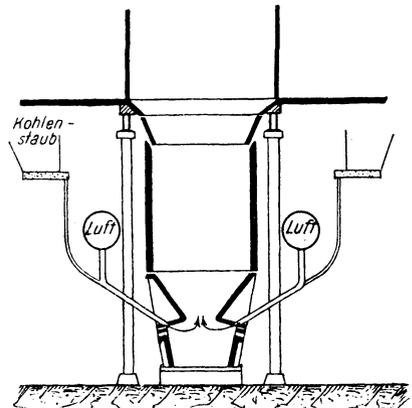
Bei Rostfeuerung betrug der Wert Einsatz : Kohle 4 bis 4,5. Die Brennstoffersparnis bei Kohlenstaubbetrieb beträgt daher etwa 32^o/_o. Kohle mit einem Aschegehalt von 17 bis 22^o/_o konnte in der Staubfeuerung anstandslos verarbeitet werden. Die niedrigeren Rauchgastemperaturen am Fuchs bei Kohlenstaubfeuerung (922^o) gegenüber Rostfeuerung (1200 bis 1300^o) lassen auf einen besseren Wärmeübergang und eine vollkommeneren Verbrennung schließen¹⁾ Die Ofendecke muß nach ungefähr 2 Jahren ganz, und gewisse Teile nach 6 bis 8 Monaten erneuert werden. Der Verlauf der Ofentemperaturen ist eine gerade Linie, die genau mit der Tourenzahl der Speiseschnecken steigt oder fällt.

2. Größe des Herdes: rd. 38 × 6,4 m; Höhe 2,6 m vorne, 0,7 m hinten; Bau und Beschickung des Ofens wie bei 1. (Abb. 44.) Der Aschegehalt der verwendeten Kohle lag zwischen 8,1 und 20,9^o/_o, das Verhältnis von Einsatz zu Kohle betrug bei einer Einsatzmenge von 400 bis 450 t/24 Std. 5,4 bis 7,2. Für Rostfeuerung wird dieses Verhältnis mit 3,9 angegeben. Wo keine Beschickung von der Seite stattfand, wurden die Seitenwände angefressen. Die Ofendecke war nach dreimonatigem Betrieb im vorderen Teil etwa 5 cm tief ausgewaschen. Die Abgase werden Abhitze-Stirlingkesseln zugeführt, die stündlich etwa 11 t Wasser verdampfen. Reinigung der Kessel findet einmal im Monat statt und erfordert jedesmal 3 Tage; daher ist ein Umgehungszug nötig. Der Querschnitt des Haupt-Rauchgaskanals ist wegen Schlackenansatzes groß gewählt und beträgt 3,7 qm.

¹⁾ Dasselbe gilt von kohlenstaubgefeuerten Martin-, Gießereischmelz- und Puddelöfen, bei denen ebenfalls niedrigere Abgastemperaturen festgestellt wurden. Siehe Seite 101.

c) Schachtöfen.

Auffallenderweise ist in Amerika auch die Beheizung von Hoch- oder Schachtöfen (Abb. 45 u. 46) mit Kohlenstaub versucht worden, obwohl sie keine nennenswerten leeren Verbrennungsräume aufweisen; es kann daher auch nicht verwundern, daß der gemöllerte

Abb. 45. Kohlenstaubgefeuerter Schachtofen¹⁾.Abb. 46. Kohlenstaubgefeuerter Schachtofen¹⁾.

Brennstoff bisher nur teilweise durch Kohlenstaub ersetzt werden konnte. Offenbar verspricht man sich von der Einführung von Kohlenstaub durch die Formen ähnliche Vorteile, wie sie Fr. Lange bei Hochöfen für Eisenerze vorschweben (s. S. 67). Über das Versuchsstadium ist man scheinbar noch nicht gekommen. Um eine möglichst vollkommene Verbrennung zu erzielen, ist ein besonderer Ofenmantel mit einer kleinen Verbrennungskammer vorgeschlagen worden. Wegen des häufig eintretenden Verstopfens ist der in Abb. 47⁴⁾ dargestellte Brenner mit einer Stocheröffnung versehen, die gegen Rückschlagen des Kohlenstaubes durch eine Kugel gesichert ist.

An Betriebsergebnissen liegt vor:

1. Von einem Kupferhochofen wird berichtet, daß statt 5,7⁰/₀ Koks nur 3,8⁰/₀, später nur 3,6⁰/₀ Kohlenstaub erforderlich war²⁾.

2. In einem Kupfer-Nickelhochofen ließen sich von 12⁰/₀ Koks 1,5⁰/₀ bis 2⁰/₀ durch Kohlenstaub ersetzen; als dieser auf die Hälfte des erforderlichen Brennstoffes gesteigert wurde, verstopften sich die Düsen³⁾.

3. Bei der Reduktion von Bleierzen wurden 30⁰/₀ Koks durch Kohlenstaub ersetzt⁴⁾.

¹⁾ Aus „Feuerungstechnik“. ²⁾ La Technique moderne, 20. Dez. 1920, S. 538.

³⁾ Mechanical Engineering, April 1920, S. 225.

⁴⁾ Engineering & Mining Journal, 3. April 1920, S. 803 f.

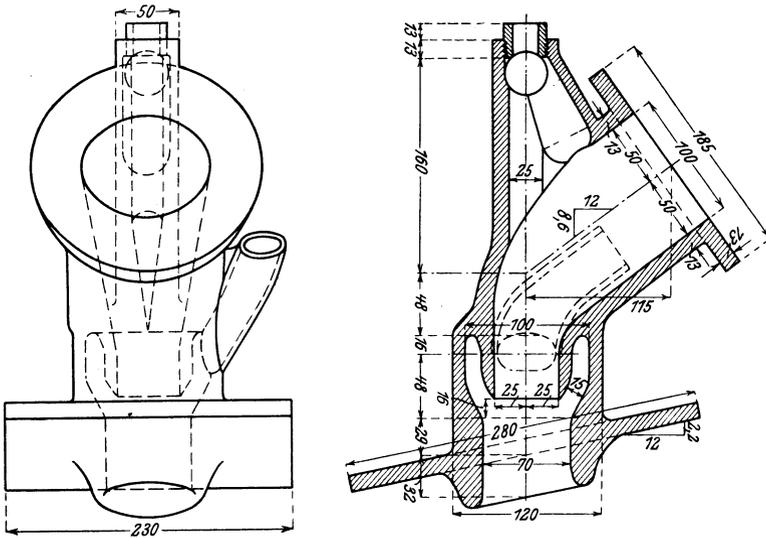


Abb. 47. Brenner mit Stoßeröffnung.

d) Spezialöfen.

Ferner sei erwähnt, daß in Amerika Anodenöfen, welche Rohkupfer einschmelzen, bevor es zwecks Herstellung von Elektrolytkupfer zu Anoden gegossen wird, seit einiger Zeit erfolgreich mit

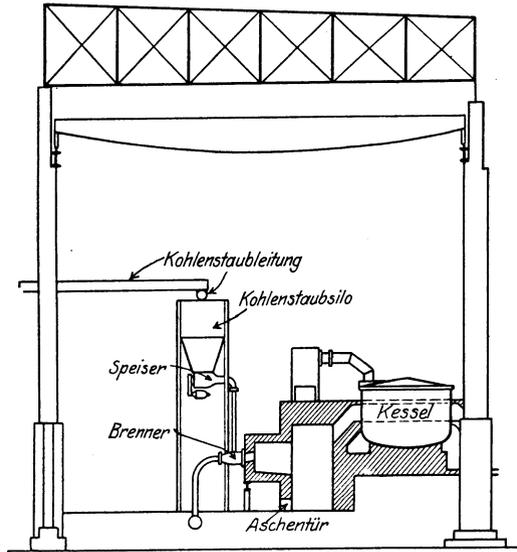


Abb. 48. Zinnotpfen. (Copolco)

Kohlenstaubfeuerungen arbeiten. Der Kohlenverbrauch wird mit rd. 85 kg pro Tonne raffiniertes Kupfer angegeben¹⁾.

Der gleiche Verbrauch wird von Kathodenöfen berichtet, die Elektrolytkupfer zum Gießen von marktfähigen Barren umschmelzen. Das Endprodukt soll 99,94⁰/₁₀₀ Cu enthalten¹⁾.

Einen kohlenstaubgefeuerten Zinntopffofen zeigt Abb. 48; im ganzen befinden sich in Amerika rd. 170 Öfen dieser oder äh-

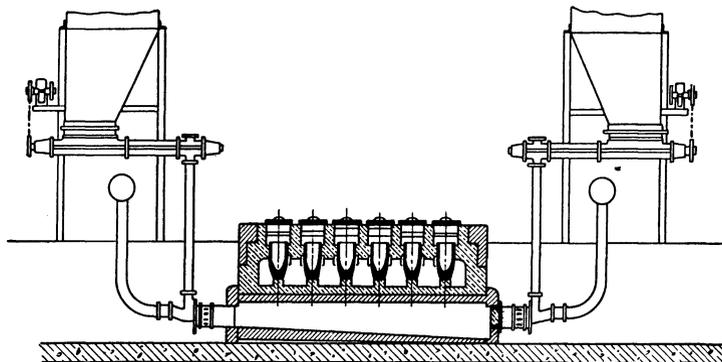


Abb. 49. Tiegelschmelzofen. (Fuller.)

licher Bauart. Nach einer Mitteilung ließ sich die Temperatur des Zinnbades auf 316⁰ halten, wobei die größten Abweichungen $\pm 6^{\circ}$ betragen²⁾. Abb. 49 zeigt einen Tiegelschmelzofen. Der für Kohlenstaub wesentliche große Verbrennungsraum ist in Abb. 48 u. 49 ersichtlich.

X. Abhitzeverwertung bei hüttenmännischen Staubfeuerungen.

a) Allgemeines.

Die Bedeutung der Abhitzeverwertung wird bei den bisher üblichen Feuerungsarten mehr und mehr erkannt und muß auch bei Kohlenstaubfeuerungen sorgfältig berücksichtigt werden. Wenn auch zur Zeit noch keine genauen Versuchsergebnisse vorliegen, welche die aus den Verbrennungsgasen wiedergewinnbaren Wärmemengen zahlenmäßig erfassen, so lassen sich doch für die einzelnen Ofengattungen die wesentlichsten Richtlinien festlegen, nach denen die Abhitzeverwertung zu erfolgen hat.

¹⁾ Herington, Powdered Coal as a Fuel, New York 1920, S. 202.

²⁾ Herington, Powdered Coal as a Fuel, New York 1920, S. 251.

b) Regenerativkammern

werden bei Wärmöfen mit Schweißhitze wegen der hohen Temperaturen der Kohlenstaubflamme entbehrlich; die auftretende Abhitze steht daher zur Verwertung in Abhitzeesseln voll zur Verfügung. Die Abhitzetemperaturen dieser Öfen betragen in der Regel zwischen 700 und 1000^oC. Durch Ausnutzung der Abgaswärme in Abhitzeesseln können bis zu 50^o/_o der dem Ofen zugeführten Kohlenwärme in Dampfform wiedergewonnen werden.

c) Abhitzeessel

sind, wie bereits oben erwähnt wurde, bei Wärmöfen mit Schweißhitze zu empfehlen und dürften auch bei gewissen Glühöfen angebracht sein; sie kommen ferner bei Schmelzöfen, wie Gießereiofen und Herdflämmöfen der Kupferhütten, zur Verwendung. Bei kohlenstaubgefeuerten Martinöfen scheint es fraglich, ob die hinter den Kammern auftretende Abgastemperatur den Einbau von Abhitzeesseln rechtfertigt (siehe S. 71). Bei allen bereits mit Abhitzeesseln ausgerüsteten Öfen, die von Rost-, Halbgas oder Generatorgas auf Kohlenstaubfeuerung umgestellt werden sollen, ist wegen der höheren Anfangstemperatur der Staubflamme bei gleicher Ofenleistung eine Abnahme der in den Abgasen befindlichen Wärmemengen und damit ein Sinken der Kesselleistung zu erwarten¹⁾.

Ist zu befürchten, daß aus der Feuerung flüssige Schlackenpartikel mitgerissen werden, die an den Kesselheizflächen anhaften, so sind Dampfdufen anzubringen, die ähnlich wie bei Gasgeneratoren eine Lockerung und Lösung der Schlacke bewirken. In gleicher Weise lassen sich Flugstaubablagerungen vermeiden; gegen diese lassen sich statt Dampf- auch Preßluftdufen verwenden. Die Düfenanordnung ähnelt den in vielen amerikanischen rostgefeuerten Kesseln üblichen Rußbläsern.

d) Rekuperatoren,

die aus Formsteinen aufgebaut sind und vor allem bei Wärmöfen vielfach Verwendung gefunden haben, werden bei langen Betriebspausen fast immer undicht und sollten, wenn irgend möglich, bei allen Feuerungsarten endgültig zugunsten von Abhitzeesseln verlassen werden. Eiserne Rekuperatoren sind zwar dicht, vertragen aber keine hohen Temperaturen und kommen daher für Rost- und Gasfeuerungen kaum in Frage. Dagegen werden sie bei Ölfeuerungen verwendet und sind auch bei Kohlenstaubfeuerungen zu empfehlen, weil eine geringe

¹⁾ Siehe Aufsatz von Hudler in Z. d. V. D. I., 2. Oktober 1920, S. 810f; Siehe ferner S. 77, 78, 97.

Luftvorwärmung eine verhältnismäßig große Kohlenersparnis einträgt; der Grund dafür dürfte u. a. in der besseren Durchmischung von Luft und Brennstoff liegen. Bei dem auf S. 92 unter 1 angezogenen Versuch wurden durch Vorwärmung der Sekundärluft (= 75⁰/₀ des gesamten Luftbedarfes) auf ca. 334⁰ C etwa 35⁰/₀ weniger Kohle gebraucht, wobei die der Verbrennungsluft zugeführte Wärme nur 16⁰/₀ des Brennwertes der Kohle betrug. Man baut daher zweckmäßig einen eisernen Rekuperator in den Rauchgaskanal ein oder benutzt das bei manchen Wärmeöfen vorhandene Doppelgewölbe zur Vorwärmung der Sekundärluft. Eine Vorwärmung der Primärluft ist unratsam, erstens weil sie in der Regel den kleineren Teil des gesamten Luftbedarfs ausmacht und weil zweitens eine Erwärmung des Kohlenstaubes über 150⁰ zu Krustenansätzen an den Brennern führen kann und diese überhitzt. In jenen verhältnismäßig seltenen Fällen, wo man nur mit Primärluft arbeitet oder wo diese den größeren Teil der gesamten Verbrennungsluft ausmacht muß man daher bei Luftvorwärmung wassergekühlte Brenner anwenden. Da in eisernen Rekuperatoren immer nur ein kleiner Teil der ausnutzbaren Abhitze ausgenutzt werden kann, können außerdem noch Abhitzekessel am Platze sein.

XI. Die Wirtschaftlichkeit der Staubfeuerung in hüttenmännischen Öfen.

Eingehende Wirtschaftlichkeitsberechnungen für deutsche Verhältnisse liegen noch nicht vor und würden sich bei den abnormen Geldverhältnissen kaum in einer allgemein gültigen Form aufstellen lassen. Es seien daher im folgenden nur die wesentlichen Gesichtspunkte aufgezählt, an Hand derer sich von Fall zu Fall die Vor- und Nachteile der Staubfeuerung gegenüber anderen Feuerungsarten abschätzen lassen.

Die Wirtschaftlichkeit der Staubfeuerung wird bedingt durch:

1. Menge des Brennstoffes,
2. Preis des Brennstoffes,
3. Anlagekosten,
4. Reparaturen,
5. Löhne,
6. Einfluß der Feuerung auf den Einsatz,
7. Anpassungsfähigkeit an verschiedenartige Brennstoffe,
8. Eignung für wechselweise Verwendung neben anderen Feuerungsarten (Zusatzfeuerung).

a) Gegenüber Generatorgasfeuerung.

1. Menge des Brennstoffes. Diese wird bestimmt durch
 α) den Wirkungsgrad der Umsetzung (Verstaubung bzw. Vergasung),
 β) die Wärmeausnutzung im Ofen und der Abhitzeverwertung und
 γ) den Wärmeverbrauch während der Warmhaltezeiten.

α) Wirkungsgrad der Umsetzung. Dieser geht aus der Zahlentafel 7 für beide Feuerungsverfahren hervor; die Ersparnis der Staubfeuerung beläuft sich bei Steinkohle auf $\frac{91 - 75}{91} \cdot 100 = \text{rd. } 17,5\%$; bei Braunkohle ergibt sich in gleicher Weise ein Gewinn von 24% gegenüber Brikettierung und Vergasung, und von nur $2,5\%$ gegenüber Rohkohlenvergasung¹⁾. Diese Beträge erhöhen sich weiterhin bei:

Belastungsschwankungen; diesen kommt der Generator erst allmählich und nur mit einem zusätzlichen Vergasungsverlust nach, während sie der Staubaufbereitungsanlage infolge Speicherwirkung der Zwischenbunker gänzlich ferngehalten werden.

Leerlaufperioden; während dieser muß das Feuer in den Generatoren unterhalten werden; dagegen kann die Staubaufbereitungsanlage entweder ganz abgestellt werden, oder dank der Zwischenbunker gleichmäßig weiterlaufen.

β) Wärmeausnutzung im Ofen und der Abhitzeverwertung. Diese ist infolge des größeren pyrometrischen Wirkungsgrades der Staubfeuerung (höhere Anfangstemperaturen²⁾) besser als bei Generatorgas. Eine weitere Erhöhung des Wärmeüberganges an den Einsatz kann ferner infolge der besseren Lenkbarkeit der Staubflamme eintreten.

γ) Wärmeverbrauch während der Warmhaltezeiten³⁾. Dieser wird bedingt: Entweder durch die Rücksicht auf Regenerativ- oder Rekuperativkammern; werden diese bei Übergang zu Staubbetrieb überflüssig, so kann die Brennstoffersparnis beträchtlich sein⁴⁾.

Oder durch die Aufheizzeiten; diese fallen bei Staubbetrieb kürzer aus.

Oder durch die zulässige Auskühlung des Ofens. Diese darf wegen der größeren Anstrengung des Mauerwerkes infolge Schlacken-

¹⁾ Die Rohkohlenvergasung hat trotz ihres hohen Wirkungsgrades für hüttenmännische Zwecke wegen der niedrigen erzielbaren Flammentemperaturen bisher keine große Bedeutung erlangt. ²⁾ Siehe S. 6.

³⁾ Nach Feststellungen der Wärmestelle Düsseldorf des Vereins deutscher Eisenhüttenleute werden bei vielen Generatorgasanlagen mit 8—10 stündigem Betrieb in der Warmhaltezeit 60—100% der in der Produktionsschicht verbrauchten Kohle verfeuert. ⁴⁾ Siehe S. 80.

Zahlentafel 7.

Wirkungsgrade der Umsetzung, bezogen auf den gesamten Rohkohlenaufwand.

A. Steinkohle von 6500 WE/kg.

Staubaufbereitung	10 ⁶ WE	%	Vergasung in Generatoren	10 ⁶ WE	%
Heizwert von 1 t Staub ¹⁾	6,83	100	Heizwert von 1 t Generatorkohle	6,5	100
Wärmeeinnahmen pro 1 t Staub:			Wärmeeinnahmen pro 1 t Generatorkohle:		
a) Aufbereitete Rohkohle = $\frac{1000}{0,955}$ kg	6,81	99,7	ratorkohle:		
b) Trocknung: 2300×45 WE ²⁾	0,103	1,5	a) Durchgesetzte Rohkohle	6,5	100
c) Mahlung: 25 KWst/t ³⁾	0,162	2,4	b) Dampfzusatz: 250 kg/t ⁶⁾		4,0
d) Staubtransport zum Brenner:			c) Kraftbedarf des Generators: 2 KWst/t	0,013	0,2
10 KWst/t ³⁾ ⁵⁾	0,065	1,0	d) Kraftbedarf an Ofen (Ventilatoren):		
			2 KWst/t	0,013	0,2
	Insgesamt:	104,6		Insgesamt:	104,4
Verluste pro 1 t Staub:			Verluste pro 1 t Generatorkohle:		
Staubverlust an den Zyklonen		5,0	Vergasungsverluste im Generator ⁷⁾		rd. 22,0
Wärmeabgabe pro 1 t Staub:			Wärmeabgabe pro 1 t Generatorkohle:		
An Brenner in Staubform abgegeben		95,0	An Brenner in Gasform abgegeben		rd. 78,0
Wirkungsgrad der Umsetzung: $\frac{95}{104,6}$		rd. 91	Wirkungsgrad der Umsetzung: $\frac{78}{104,4}$		rd. 75

¹⁾ Trocknung von 5 auf 0,5% Feuchtigkeit.

²⁾ Siehe S. 31.

³⁾ Erzeugungswärme von 1 KWst = 6500 WE.

⁴⁾ Ist meistens 300—400 kg/t.

⁵⁾ Einschließlich fühlbarer Gaswärme.

⁶⁾ Siehe S. 20.

⁷⁾ Erzeugungswärme von 1 KWst = 6500 WE.

B. Rohbraunkohle von 2000 WE/kg.

Staubaufbereitung	10 ⁶ WE	%	Brikettierung mit nachfolgender Vergasung	10 ⁶ WE	%	Rohkohlenvergasung	10 ⁶ WE	%
Heizwert von 1 t Staub ¹⁾	4,7	100	Heizwert von 1 t Brikett ¹⁾	4,7	100	Heizwert von 1 t Rohkohle	2,9	100
Wärmeeinnahmen pro 1 t Staub:			Wärmeeinnahmen pro 1 t Brikett:			Wärmeeinnahmen pro 1 t Generatorkohle:		
a) Aufbereitete Rohkohle = 2045 kg ²⁾	4,09	87,0	a) In Brikettfabrik durchgesetzte Rohkohle = 2045 kg ²⁾	4,09	87,0	a) In Generator durchgesetzte Rohkohle . .	2,0	100
b) Trocknung ²⁾	1,07	22,8	b) Wärmebedarf der Brikettfabrik ²⁾	2,0	42,5	b) Kraftbedarf für Gru- benförderung:	0,04	2
c) Mahlung ²⁾	0,32	6,8	c) Dampfzusatz im Generator: 100 kg/t	0,1	2,1	c) Kraftbedarf an Generator und Ofen:	0,01	0,5
d) Staubtransport zum Brenner: 10 KWst/t ³⁾ 4)	0,08	1,7	d) Kraftbedarf an Generator und Ofen:	0,01	0,2			
Insgesamt:	118,3		Insgesamt:	131,8		Insgesamt:	102,5	
Verluste pro 1 t Staub:			Verluste pro 1 t Brikett:			Verluste pro 1 t Generator-		
Staubverlust an den Zyklonen .	5,0		Vergasungsverluste im Generator ⁵⁾	rd. 20,0		kohle:		
Wärmeabgabe pro 1 t Staub:			Wärmeabgabe pro 1 t Brikett:			Vergasungsverluste im Generator ⁵⁾		
An Brenner in Staubform abgegeben	95,0		An Brenner in Gasform abgegeben	rd. 80,0		Wärmeabgabe pro 1 t Generatorkohle:	rd. 20	
Wirkungsgrad der Umsetzungen: $\frac{95}{118,3}$	rd. 80		Wirkungsgrad der Umsetzungen: $\frac{80}{131,8}$	rd. 61		An Brenner in Gasform abgegeben	rd. 80	
						Wirkungsgrad der Umsetzungen: $\frac{80}{102,5}$	rd. 78	

¹⁾ Trocknung von 60 auf 18% Feuchtigkeit. ²⁾ Siehe S. 39 f. ³⁾ Erzeugungswärme von 1 KWst = 8000 WE bei Braunkohle. ⁴⁾ Siehe S. 48 und 57. ⁵⁾ Einschließlich fühlbarer Gaswärme.

angriffes und wegen der geringeren Zündfähigkeit des Kohlenstaubes nicht so weit wie bei Generatorgas getrieben werden; trotzdem braucht der Wärmeverbrauch der Staubfeuerung nicht notwendigerweise höher zu sein, weil man im Gegensatz zu Generatorgasfeuerungen den Kaminschieber vollständig schließen kann, da keine Gasexplosionen zu befürchten sind.

2. Preis des Brennstoffes. Bei Staubbetrieb ist man von der Stückgröße und dem Gasgehalt unabhängiger und kann daher billigere, d. h. feinkörnige und vielfach auch gasärmere und aschenreichere Kohlen als bei Generatoren verwenden¹⁾.

Die Posten 1. und 2. machen das Brennstoffkonto aus. Dies wird sich laut vorstehendem bei Staubbetrieb und Steinkohle um mindestens 15—20⁰/₀, bei Braunkohle um mindestens 20—25⁰/₀ gegenüber Brikettverwendung senken; allerdings kann dieser Gewinn durch die höheren Transportkosten der Rohbraunkohle im Falle von Werksaufbereitung geschmälert werden.

3. Anlagekosten. *α*) Aufbereitungsanlage. Bei kleinen Leistungen sind Generatorgas-, bei größeren dagegen Staubaufbereitungsanlagen die billigeren²⁾. Die Kostengleichheit dürfte gegenüber Steinkohlen- oder Braunkohlenbrikettvergasung bei etwa 30 t/24 Std., gegenüber Rohbraunkohlenversorgung schon früher eintreten, wenn dreischichtig gearbeitet wird. Allgemein tritt die Kostengleichheit bei um so geringeren Leistungen ein, je niedriger die durch die Produktion bedingten Belastungsfaktoren (lange Betriebspausen, einschichtiger Arbeitstag) sind. In solchen Fällen bestimmt sich die Größe der Staubaufbereitungsanlage nach dem gesamten durchschnittlichen Tagesverbrauch (Speicherung), während die Generatorenanlage nach der größten auftretenden Belastung dimensioniert werden muß.

β) Ofenanlage. Diese fällt bei Staubbetrieb durch Hinzutritt der Zwischenbunker und Speisevorrichtungen (Motor und Schnecke) teurer als bei Generatorgas aus, es sei denn, daß bei Staubfeuerung Rekuperatoren oder Regeneratoren entbehrlich werden³⁾.

4. Reparaturen. Diese sind bei Staubaufbereitungsanlagen infolge des Mühlenverschleißes und der Korrosion an den Trocknern vermutlich höher als bei Generatorgasbetrieben. In den Öfen stellen sich die Reparaturen infolge Schlackenangriffs ebenfalls höher⁴⁾, sofern nicht die durch die gute Lenkbarkeit der Staubflamme bedingte geringere Auswaschung der Gewölbe und Ofenköpfe einen Ausgleich schafft.

5. Löhne. Da Stocher wegfallen und durch die kleinere Beleg-

¹⁾ Siehe S. 10, 17, 78, 84, 90, 97.

²⁾ Siehe S. 107.

³⁾ Siehe S. 80.

⁴⁾ Siehe S. 75, 81, 97.

schaft der Aufbereitungsanlage ersetzt werden, muß das Lohnkonto bei Staubbetrieb sinken¹⁾).

3. Einfluß der Feuerung auf den Einsatz. Zwecks näherer Einzelheiten sei auf die in den Kapiteln II bis IX dieses Abschnittes wiedergegebenen Betriebsdaten verwiesen.

7. Anpassungsfähigkeit an verschiedenartige Brennstoffe. Dieser Punkt spielt bei der Unsicherheit auf dem deutschen Kohlenmarkt eine große Rolle. Innerhalb derselben Kohलगattung besitzt die Staubfeuerung einen größeren Spielraum in der Sortenauswahl. Anders bei Umstellungen auf andere Kohलगattungen: Eine Generatorenlage läßt sich ohne weiteres den Übergang von Steinkohle zu Braunkohlenbriketts gefallen, während bei der Staubfeuerung grundlegende Änderungen der Trockenanlage erforderlich würden²⁾

8. Eignung für wechselweise Verwendung neben andern Feuerungsarten. Gemischte Hüttenwerke stellen ihre Öfen zwecks Verbesserung der Wärmewirtschaft mehr und mehr auf Koksofen- und Hochofengas um. Dabei entsteht die Forderung einer Zusatzfeuerung, welche bei Spitzenleistungen oder auftretenden „Gas-tälern“ einspringt. Bei einfachen Öfen kommt Kohlenstaubzusatz wohl in Frage und kann dann gegenüber Generatorgas die unter 1., 2., 3. und 5. beschriebenen Vorteile bieten. Sind die Öfen dagegen mit Regenerativ- oder Rekuperativkammern ausgerüstet, so ist an eine wahlweise Befuerung mit Staub im Hinblick auf die Verschlackungsfahr mit Vorsicht heranzutreten; der Staubfeuerung sind daher als Zusatzfeuerung sehr viel engere Grenzen als dem Generatorgas gezogen. Bei gasgefeuerten Kesseln kommt die Staubzusatzfeuerung bei dem jetzigen Stand der Technik nur bei Schräg- und Steilrohrtypen in Frage³⁾).

Zahlenbeispiel.

Als Vergleichsbasis sei angenommen, daß die den Brenner verlassenden und in den Ofen gelangenden WE in Kohlenstaub bzw. im Generatorgas die gleichen seien. Man rechnet dann allerdings zuungunsten der Kohlenstaubfeuerung, weil man ihren besseren Verbrennungswirkungsgrad und ihre mit größerer Anpassungsfähigkeit verbundenen geringeren Leerlaufverluste unberücksichtigt läßt. Es bietet sich jedoch vorläufig kein Mittel, auch diese Eigenschaften in allgemeingültiger Form zahlenmäßig zu erfassen.

I. Steinkohle. Die Kohlenstaub-Aufbereitungsanlage trockne Kohle mit einem Heizwert von 6500 WE von 5 auf 0,5⁰/₀ Feuchtig-

¹⁾ Siehe Zahlentafel 3, S. 38.

²⁾ Siehe S. 18 f.

³⁾ Siehe Abb. 57.

keit und habe eine Leistung von 2 t Kohlenstaub stündlich. Der Heizwert des Kohlenstaubes beträgt

$$\frac{6500 + 0,045 \times 600}{0,955} = \text{rd. } 6830 \text{ WE/kg};$$

unter Berücksichtigung eines Staubverlustes von 5⁰/₀ ist die den Brennern zugeführte Wärmemenge

$$0,95 \times 2 \times 6,83 \times 10^6 = \text{rd. } 13 \cdot 10^6 \text{ WE/st.}$$

Will man die gleiche Wärmemenge in Form von Generatorgas in die Feuerungen einführen, so sind bei dem oben angenommenen Vergasungsverlust von 22⁰/₀ und einer Kohle von 6500 WE/kg in

den Generatoren durchzusetzen: $\frac{13 \cdot 10^6}{0,78 \cdot 6,5 \cdot 10^6} = 2,57 \text{ t stündlich}$; hier-

zu dienen 4 Generatoren von je $\frac{2,57}{4} = 0,64 \text{ t Stunden- oder rd. } 15 \text{ t}$

Tagesleistung.

Eine Kohlenstaub-Aufbereitungsanlage von 2 t Stundenleistung kostet gemäß Tafel 3 Spalte b einschließlich Fundamente, Gebäude, Trockner, Mahlanlage, Motoren, Riemen und Aufstellung rd. 1,2 Mill. M.

Eine Generatorgasanlage, bestehend aus 4 Generatoren von je rd. 0,7 t Stundenleistung kostet einschließlich Fundamente, Gebäude, Motoren und Aufstellung rd. 1,8 Mill. M.

Die Anlagekosten für die Leitungen zu den Öfen mögen in beiden Fällen 100000 M. sein, wozu bei der Kohlenstaubanlage noch die Kosten für Zwischenbunker, Speiseschnecken und Ventilatoren nebst Antrieb in Höhe von 300000 M. kommen¹⁾.

Es kostet daher die Beschaffung einer

Kohlenstaubanlage 1,6 Mill. M.

Generatorenanlage 1,9 „ „

Kostenrechnung für 1 Million WE frei Ofen.

a) Bei Kohlenstaub:

Laut Tafel 3 Spalte n kosten 1 Mill. WE ab Aufbereitungsanlage bei 350 M./t Kohle frei Werk und 16stündigem Betrieb = 63,4 M.

Kraft für Transport, Ventilatoren und Speiseschnecken = 10 KWst/t zu 0,80 M, die KWst kostet $\frac{10 \cdot 0,80 \cdot 2}{13} \text{ M./1 Mill. WE} = 1,2 \text{ „}$

15⁰/₀ Amortisation und Verzinsung für Transportleitung, Zwischenbunker, Speiseschnecken, Ventilatoren und

¹⁾ Dieser Wert schwankt je nach Zahl und Größe der Öfen.

Antriebe kosten bei 16 stündigem Betrieb	
$\frac{0,15 \cdot 400000}{300 \cdot 16 \cdot 13}$ M./1 Mill. WE	= 1,0 M.
<hr/>	
1 Mill. WE frei Ofen kostet	65,6 M.

b) Bei Generatorgas.

Preis für 1 t Kohle frei Werk	= 350,— M./t Durchsatz
Dampfzusatz (25 ⁰ / ₁₀₀ pro t Kohle; Dampfpreis	
= 70 M./t) = 0,25 · 70	= 17,5 „
Löhne (1 Mann pro Generator, 7,— M.	
Stundenlohn) $\frac{7,—}{0,64}$	= 10,9 „
Reparaturen	= 2,— „
Kraft (3 KWst/t zu 0,80 M.) = 3 · 0,80	= 2,4 „
15 ⁰ / ₁₀₀ Amortisation und Verzinsung bei	
16 stündigem Betrieb $\frac{0,15 \cdot 1,9 \cdot 10^6}{300 \cdot 16 \cdot 2,57}$	= 23,2 „
<hr/>	
Preis pro 1 t Durchsatz	= 406,0 M.
1 Mill. WE frei Ofen kostet $\frac{406,0 \cdot 2,57}{13}$	= 80,3 „

Die geldliche Ersparnis bei Kohlenstaubbetrieb ist daher

$$\frac{80,3 - 65,6}{80,3} = \text{rd. } 18\%.$$

II. Braunkohle. Die Kohlenstaub-Aufbereitungsanlage trockne Rohkohle von 2000 WE/kg von 60 auf 18⁰/₁₀₀ Feuchtigkeit und habe eine Leistung von 2 t Kohlenstaub stündlich. Der Heizwert des Kohlenstaubes ist alsdann $4,7 \cdot 10^3$ WE/kg. Unter Berücksichtigung eines Staubverlustes von 5⁰/₁₀₀ ist die dem Brenner zugeführte Wärmemenge $0,95 \cdot 2 \cdot 4,7 \cdot 10^6 = \text{rd. } 8,9 \cdot 10^6$ WE stündlich.

Will man die gleiche Wärmemenge in Form von Generatorgas aus Braunkohlenbriketten der gleichen Herkunft einführen, so sind bei 20⁰/₁₀₀ Vergasungsverlust und $4,7 \cdot 10^3$ WE/kg Brikett in den Generatoren durchzusetzen $\frac{8,9 \cdot 10^6}{0,8 \cdot 4,7 \cdot 10^6} = \text{rd. } 2,37$ t stündlich; hierzu dienen 4 Generatoren von je 0,59 t Stunden- oder rd. 14 t Tagesleistung.

Die Beschaffungskosten der Kohlenstaubanlage seien die gleichen wie bei I. Die Generatorenanlage ist jedoch durch Fortfall des Drehrostes um 0,2 Mill. Mk. billiger.

Kohlenstaubanlage	1,6 Mill. M.
Generatorenanlage	1,7 „ „

Kostenberechnung für 1 Mill. WE frei Ofen.

a) Bei Kohlenstaub.

Auf Grund von S. 41 kosten 1 Mill. WE ab Aufbereitungs-
anlage bei 50,— M./t Rohkohle frei Werk und
24stündigem Betrieb = 38,4 M.
Kraft für Transport, Ventilator und Speiseschnecke
 $(10 \text{ KWst/t zu } 0,80 \text{ M.} = \frac{10 \cdot 0,8 \cdot 2}{8,9} \text{ Mill. WE} = 1,8 \text{ ,,}$
15 %/o Amortisation und Verzinsung für Transportleitung,
Zwischenbunker, Speiseschnecken, Ventilatoren
und Antriebe kosten bei 24 stündigem Betrieb
 $\frac{0,15 \cdot 400000}{300 \cdot 24 \cdot 8,9} \text{ M./1 Mill. WE} = 0,9 \text{ ,,}$

1 Mill. WE frei Ofen kosten **41,1 M.**

b) Bei Generatorgas.

Preis für 1 t Brikett frei Werk = 170,— M./t Durchsatz
Dampfzusatz 100 kg/t = 3,5 ,,
Löhne (1 Mann pro Generator, 7,— M.
Stundenlohn) = $\frac{7 \cdot}{0,59} = 11,9 \text{ ,,}$
Reparaturen = 2,— ,,
15 %/o Amortisation und Verzinsung bei
24 stündigem Betrieb kosten
 $\frac{0,15 \cdot 1,7 \cdot 10^6}{300 \cdot 24 \cdot 2,37} = 14,9 \text{ ,,}$

Preis pro 1 t Durchsatz 202,3 M./t
1 Mill. WE frei Ofen kosten $\frac{202,3 \cdot 2,37}{8,9} = 53,9 \text{ M.}$

Die geldliche Ersparnis bei Kohlenstaubbetrieb (bei Rohkohlen-
bezug) beträgt daher gegenüber Brikettvergasung:

$$\frac{53,9 - 41,1}{53,9} = \text{rd. } 24\%.$$

b) Gegenüber Halbgasfeuerungen.

Diese sind nur in kleineren Betrieben oder auf Hütten mit
einzelnen, weit voneinander liegenden Öfen daseinsberechtigt. Sie
kommen daher nur als Wettbewerber mit kleinen Staubfeuerungs-
anlagen in Betracht, die ohne Trocknung und mit individuellen, vor
die Öfen gesetzten Mühlen arbeiten¹⁾. Eine wirtschaftliche Über-

¹⁾ Siehe Seite 27.

legenheit der Staubfeuerung dürfte sich in der Regel nur dann ergeben, wenn verhältnismäßig trocken angelieferte Abfallkohlen, wie etwa der Abrieb von Braunkohlenbriketten, zur Verfügung stehen; ob sich jedoch bei Steinkohlenabfällen die für hohe Temperaturen nötigen Mahlfeinheiten mit diesen Mühlen erzielen lassen, ist zweifelhaft¹⁾.

c) Gegenüber Teerölfeuerungen.

Da sich bei diesen die Vorbereitungen lediglich auf Vorwärmung und Zerstäubung des Teeröls beziehen, ist der Wirkungsgrad der Umsetzung höher als bei Staubfeuerungen. Die Wärmeausnutzung im Ofen dürfte bei beiden Brennstoffen ungefähr die gleiche sein. Bezüglich des Wärmeverbrauchs bei Warmhaltezeiten schneiden Teerölfeuerungen günstiger ab, weil die leichtere Zündfähigkeit des Öles und die geringere Anstrengung des Mauerwerkes eine stärkere Auskühlung des Ofens als bei Staubbetrieb gestatten. Fast immer aber geht das, was die Teerölfeuerung in thermischer Beziehung der Staubfeuerung voraus haben mag, durch den beträchtlichen Preisunterschied beider Brennstoffe mehr wie verloren. Die Anlagekosten der Teerölfeuerung werden vor allem durch die Größe der Ölbehälter bestimmt; diese ist bei großen Anlagen recht bedeutend, so daß sich die Gesamtanlagekosten nach amerikanischen Angaben nicht viel niedriger als bei Staubfeuerungen stellen. Bei kleinen Öfen ist vielfach die von keinem anderen Feuerungssystem erreichte Einfachheit, Sauberkeit und Handlichkeit der Ölfeuerung für die Wahl entscheidend; daran wird auch die Staubfeuerung nichts ändern²⁾. Auch als Zusatz zu Hochofengas- oder Koksofengasfeuerungen wird der Teerölfeuerung wegen der geringeren Verschlackung der Ofenkammern häufig der Vorzug vor Staubfeuerungen zu geben sein.

d) Zusammenfassung.

Zusammenfassend kann man sagen, daß die Kohlenstaubfeuerung in Hüttenwerken aussichtsreiche Anwendungsmöglichkeiten findet und vor allem berufen erscheint, mit der Generatorgasfeuerung in erfolgreichen Wettbewerb zu treten. Als umstellungsfähig sind Wärmöfen mit Schweißhitze und unter diesen vor allem Roll- und Stoßöfen zu bezeichnen; ferner kommen Glühöfen und Schmelzöfen und unter diesen wieder Martinöfen am letzten in Betracht.

Das Anwendungsfeld der Kohlenstaubfeuerung sind daher vor allem solche Betriebe, die von Kokereien und Hochofenwerken räumlich

¹⁾ Siehe Seite 28.

²⁾ Siehe Seite 12, 91.

getrennt sind, wie etwa die reinen Stahl- und Walzwerke. Doch auch auf gemischten Werken kann sich die Kohlenstaubfeuerung mit den auf Seite 107 beschriebenen Einschränkungen als Zusatz- oder Bereitschaftsfeuerung einbürgern. Sie würde dann nur periodenweise arbeiten, während die Aufbereitungsanlage dauernd im Betrieb sein könnte und daher klein und billig ausfallen würde. Die Kleineisenindustrie kann von der Staubfeuerung durch Errichtung gemeinsamer, verschiedene benachbarte Werke versorgender Zentralaufbereitungsanlagen Nutzen ziehen. Von individuellen, an jeden Ofen gesetzten Mühlen ohne Trockner wird man sich nur in Ausnahmefällen Vorteile versprechen können.

Dritter Abschnitt.

I. Staubfeuerungen unter ortsfesten Dampfkesseln.

a) Geschichtliches.

Bei Dampfkesseln hat die Kohlenstaubfeuerung erst in den letzten Jahren Bedeutung erlangt. Die meisten Ausführungen befinden sich in den Vereinigten Staaten; aber auch dort bleiben sie sowohl der Zahl wie der verfeuerten Kohlenmenge nach weit hinter Staubfeuerungen der Zement- und eisenhüttenmännischen Öfen zurück. Frühere Versuche, die bis in die 60er Jahre des vorigen Jahrhunderts zurückreichen, krankten ausnahmslos daran, daß die damals üblichen langen Flammen entweder das Mauerwerk der Verbrennungskammer angriffen oder bei Berührung mit den Kesselheizflächen verlöschten und daher unvollständige Verbrennung im Gefolge hatten¹⁾. Die Verbesserung der Mahltechnik mit gut einhaltbaren Feinheitsgraden des Staubes sowie die Einführung des kurzflämmigen Niederdruckverfahrens und der großräumigen Verbrennungskammer waren zwar Stufen zum Erfolge, genügten aber nicht, das infolge der früheren Fehlschläge verständliche Mißtrauen zu überwinden und die Staubfeuerung gegenüber der siegreich vorwärts dringenden mechanischen Rostfeuerung aus dem Schatten zu rücken. Erst der Wunsch, sich von den starken Schwankungen des Ölmarktes unabhängig zu machen und das immer teurer werdende Öl durch einen billigen, aber in betriebstechnischer Hinsicht ähnlichen Brennstoff zu ersetzen, wirkte durchschlagend.

¹⁾ Engineering and Mining Journal 1876, Bd. 21, S. 12 f.

Unabhängig davon wurde die Staubfeuerung in Amerika durch das Bestreben gefördert, die „mittelwestlichen“ aschereichen Steinkohlen an Stelle der oft auf große Entfernungen herangeholten östlichen hochwertigen und teuren Kohlen zu verfeuern.

Man kann heute sagen, daß das Versuchsstadium überwunden ist, und wenn auch noch mancherlei verbesserungswürdig erscheint, so lassen sich doch die Anwendungsmöglichkeiten der Staubfeuerung unter Kesseln mit einiger Sicherheit umgrenzen.

In Nordamerika werden zur Zeit etwa 140 Kessel in 37 verschiedenen Betrieben mit Staubfeuerung geheizt. Darunter befinden sich 9 größere Anlagen mit 2000 bis 10000 qm, und 15 Betriebe mit 1000 bis 2000 qm eingebauter Heizfläche. Die gesamte Heizfläche dürfte etwa 50000 qm betragen; dazu kommen weitere 25000 qm im Bau befindlicher Anlagen¹⁾. Die wichtigsten sind auf Zahlentafel 8 zusammengestellt. Unter diesen ist das Lakesidekraftwerk in Milwaukee mit 10000 qm Heizfläche das größte.

b) Die Konstruktionen der Feuerungen.

1. Größe der Verbrennungskammer. In ihr soll der schwebende Staub verbrennen, ohne daß unverbrannte Teilchen entweichen und an den Heizflächen verlöschen. Von maßgebendem Einfluß sind daher

Zahlentafel 8.

Nr.	Besitzer der Anlage	Bauart des Kessels	Zahl der Kessel	Heizfläche je Kessel qm	In Betrieb	Art des Brennstoffes	
1	Milwaukee Electr. Light and Railway Co., Oneida-Street-Kraftwerk	Schrägröhrkessel	5	435	3½ Jahre	Steinkohle	Abb. 50
2	Allegheny Steel Co., Brackensridge, Pa.	Steilrohrkessel (Wickes)	9	310	} 3 Jahre	—	
		Steilrohrkessel (Stirling)	2	560			
3	Puget Sound Traction Co., Seattle, Wash.	Schrägröhrkessel	2	280	} 2½ Jahr	Lignit	
		Desgl.	2	560			
		Desgl.	3	370			
		Desgl.	1	465			
4	Lima Locomotive Works, Lima, O.	Steilrohrkessel (Wickes)	6	370	} 2 Jahre	Anthrazit	
		Schrägröhrkessel	1	452			

¹⁾ Angaben der Fuller Engineering Co.

Zahlentafel 8 (Fortsetzung).

Nr.	Besitzer der Anlage	Bauart des Kessels	Zahl der Kessel	Heizfläche je Kessel qm	In Betrieb	Art des Brennstoffes	
5	British Columbia Sugar Refinery, Vancouver, Canada	Steilrohrkessel	2	465	} $\frac{3}{4}$ Jahre	Asche-reiche Steinkohle und Lignit	
		Desgl.	2	470			
		Schrägrohrkessel	2	230	} $1\frac{3}{4}$ Jahre		
		Zylinderkessel	9	100			
6	Bethlehem Steel Co., Lebanon, Pa.	Schrägrohrkessel	4	484	$1\frac{1}{2}$ Jahre	Steinkohle	
7	Morris & Co., Oklahoma City	Schrägrohrkessel	5	rd. 280	} $1\frac{1}{2}$ Jahre	Lignit	
		Desgl.	2				
8	St. Joseph Lead Co., Rivermines, Mo.	Steilrohrkessel	2	768	8 Monate	—	Abb. 53
9	Milwaukee Electr. Light and Railway Co., Lakeside-Kraftwerk	Schrägrohrkessel	8	1210	5 Monate	Steinkohle	Abb. 51
10	Philadelphia Rapid Transit Co., Mt. Vernon-Street-Bahnkraftwerk	Schrägrohrkessel	20	348	im Bau oder vollendet kürzlich	Anthrazit-schlamm	
11	Henry Ford Motor Co., Hochofenwerk River Rouge	Doppelsteilrohrkessel	4	2460	kürzlich vollendet	Hochofen-gas und Kohlen-staub	Abb. 57

die Länge des Flammenweges und das Volumen des Feuerraumes. Die Flammenlänge hängt vom Brennerdruck, der Art des Brennstoffes, der Mahlfeinheit, der Luftzufuhr sowie der jeweiligen Belastung ab und fällt ferner verschieden aus, je nachdem der gesamte Brennstoff in einem oder mehreren nebeneinanderliegenden Brennern verfeuert wird. In der Regel dürfte ein freier, innerhalb des Feuerraumes befindlicher Flammenweg von 7 bis 10 m genügen. Bei Bemessung des Inhalts der Verbrennungskammer ist es am zweckmäßigsten, den spezifischen Inhalt in cbm pro Tonne stündlich verfeuerten Staubes als Anhaltszahl zu wählen. Dieser Wert schwankt natürlich bei verschiedenen Brennstoffen und ist durch Versuche zu ermitteln. Zum Vergleich des Raumbedarfs bei Kohlenstaubfeuerungen einerseits und einigen neuzeitlichen mechanischen Rostfeuerungen andererseits diene die aus amerikanischen Angaben zusammengestellte Zahlentafel.

Zahlentafel 9.

Art der Feuerung	Name der Anlage	Kohlenart	Spez. Rauminhalt bei Höchstlast = cbm/1 t _{max} × st
Kohlenstaubfeuerung ¹⁾	Lakside-Kraftwerk	Steinkohle	32
" ²⁾	Oneida-Kraftwerk	"	31
" ³⁾	St. Joseph Lead Co.	"	34
" ⁴⁾	Morris Co.	Lignit	26
Unterschubfeuerung ⁵⁾	Seward-Kraftwerk	Steinkohle	24
" ⁶⁾	Colfax-Kraftwerk	"	25
" ⁷⁾	Philadelphia El. Co.	"	23
Wanderrostfeuerung ⁸⁾	Calumet-Kraftwerk	"	23

Die Verbrennungskammer ausgeführter amerikanischer Kesselfeuerungen ist daher bei Kohlenstaubbetrieb etwa 35⁰/₀ größer als bei Rostfeuerungen, bezogen auf die maximale stündlich verfeuerte Brennstoffmenge und bei ähnlichen Kohlenarten⁹⁾. Bei normaler Kesselbelastung (Vollast im Dauerbetrieb) dürfte bei Steinkohle mit einer Feuerraumanstrengung von 40 bis 60 cbm pro Tonne stündlich verfeuertem Staube zu rechnen sein. Die großen Verbrennungskammern mögen auf den ersten Blick konstruktiv unerwünscht erscheinen. Es ist aber zu beachten, daß bei Wasserrohr- und Steilrohrkesseln der erforderliche Raum vor allem durch vertikale Ausdehnung gewonnen werden kann, wobei der bei mechanischen Rostfeuerungen übliche horizontale Platzbedarf nicht überschritten wird. Ferner kommt der unter dem Rost befindliche Aschenraum bei Umstellung auf Staubfeuerung dem Feuerraum zugute. Bei Flammrohrkesseln ist es allerdings fraglich, ob man ohne einen Vorbau auskommen wird.

Hat man die Größe der Verbrennungskammer festgelegt, so ist auf die konstruktiven Einzelheiten einzugehen. Die wesentlichsten Richtlinien sind folgende:

2. Form der Verbrennungskammer. Diese soll möglichst einfach sein: komplizierte Formen sind teuer und kurzlebig. Vorspringende Zündgewölbe und geschlossene Feuerräume sind tunlichst zu vermeiden¹⁰⁾. Als mittlere Geschwindigkeit der heißen Verbrennungsgase am Austritt aus dem Feuerraum werden in amerikanischen Mitteilungen 2 m/sec genannt¹¹⁾.

¹⁾ „Power“, 7. Sept. 1920, S. 358 f.; ebenda, 7. Juni 1921, S. 946 f. ²⁾ „Power“, 2. März 1920, S. 341 f.; ebenda, 19. Okt. 1920, S. 638 f.; ebenda, 12. Juli 1921, S. 74 f. ³⁾ American Iron and Steel Institute, 27. Mai 1921. ⁴⁾ American Iron and Steel Institute, 27. Mai 1921. ⁵⁾ „Power“, 23. Aug. 1921, S. 285 f. ⁶⁾ „Power“, 3. Mai 1921, S. 688 f. ⁷⁾ „Power“, 24. Mai 1921, S. 811 f. ⁸⁾ „Power“, 3. Mai 1921, S. 700 f. ⁹⁾ Versuche im Oneida-Kraftwerk haben gezeigt, daß von 30 cbm pro Tonne und Stunde abwärts unvollkommene Verbrennung und Schlackenangriff eintrat (Power, 19. Aug. 1919, S. 288; ebenda, 4. Jan. 1921, S. 8). ¹⁰⁾ Siehe S. 63. ¹¹⁾ Nach Angaben der Fuller Engineering Co.

3. Brenneranordnung. Diese ist so zu treffen, daß sich die Flamme frei auslaufen kann, ohne das Mauerwerk zu berühren. Bei gasarmen Brennstoffen sind senkrechte oder schräg nach unten wirkende Niederdruckbrenner mit Umkehrflammen zu wählen¹⁾.

4. Sekundärluftzuführung. Diese kann am Brennerumfang oder durch besondere Öffnungen bewerkstelligt werden. Ob die Sekundärluft an einer Stelle auf einmal (zentrale Zuführung)²⁾ oder allmählich an verschiedenen Punkten des Flammweges (verteilte Zuführung)²⁾ eingeführt werden soll, ist eine Streitfrage. Die letztere Methode ermöglicht jedenfalls eine gleichmäßigere Temperaturverteilung über das Mauerwerk; ferner kann die Sekundärluft zur Kühlung der Wandungsoberfläche des Feuerraumes herangezogen werden³⁾. Mit Rücksicht auf möglichst gleichbleibende Flammenslängen und großen Regelbereich soll sich die Luftregelung tunlichst auf den Sekundäranteil beschränken⁴⁾. Die Sekundärluft soll nach Möglichkeit durch den natürlichen Zug angesogen und durch Klappen gedrosselt werden; bei Vorwärmung in Rekuperatoren oder im Mauerwerk des Feuerraumes kann ein Ventilator nötig werden.

5. Schlackenführung. Auf die vorwiegenden Formen der Asche und Schlacke wurde bereits hingewiesen⁵⁾. Bei flüssigen Schlacken ist folgendes zu erwägen:

- a) Möglichstes Abschleudern der Schlackentropfen zum Boden des Feuerraumes (Umkehrflamme).
- β) Schutz der Wandungen vor Schlackenangriff durch geeignete Sekundärluftzuführung.
- γ) Erstarrung der Schlacke durch geeignete Sekundärluftzuführung.
- δ) Kontinuierlicher Schlackenabzug.
- ε) Dampfdüsen gegen Anhaften dünnflüssiger (eisen- oder schwefelhaltiger) Schlacken an den Heizflächen.

6. Ausführungen. Abb. 50 stellt einen der im Oneida-Kraftwerk in Milwaukee befindlichen, ursprünglich mit Rostfeuerungen arbeitenden Kessel dar; an diesem wurden die in Zahlentafel 10 wiedergegebenen Versuche 3, 4 und 5 angestellt. Der Kessel hat 3 Brenner nach Abb. 27. Die Regelung der durch die Öffnungen *c* eintretenden Sekundärluft geschieht mittels ausschwingbarer Drosselklappen, die durch Drahtseile *e* von dem Handrad *d* aus eingestellt werden. Die an diesen Kesseln gemachten Erfahrungen sind bei Bau der 8, von vornherein auf Kohlenstaub eingestellten Kessel der neuen Lakeside-Anlage verwertet worden. Um den Einfluß der Brenneranordnung und Sekun-

¹⁾ Siehe S. 63. ²⁾ Siehe S. 63 und 64. ³⁾ Siehe S. 64. ⁴⁾ Siehe S. 60f.

⁵⁾ Siehe S. 12f.

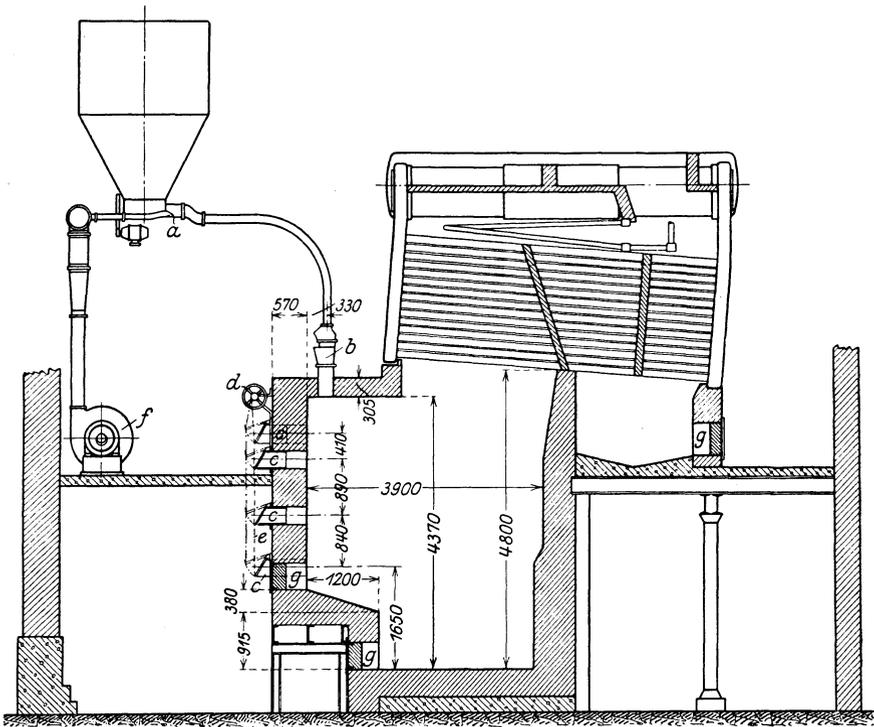


Abb. 50. Schrärohrkessel des Oneida-Kraftwerkes mit Lopulco-Staubfeuerung.

Heizfläche des Kessels	435 qm.
„ „ Überhitzers	55 „
Inhalt der Verbrennungskammer	47 cbm.
a = Speiseschnecke nach Abb. 27; b = Brenner nach Abb. 27;	
c = Sekundärluftöffnungen; d = Handrad; e = Drahtseil; f = Ven-	
tilator; g = Reinigun gstüren.	

därluftzuführung zu ergründen, wurden 4 Kessel nach Abb. 51 mit senkrechten Brennern und verteilter Sekundärluftzuführung versehen (Versuche 7 und 8 derTafel 10), während die anderen 4 Kessel nach Abb. 52 wagerecht angeordnete Brenner erhielten, an deren Umfang die Sekundärluft zentral durch Schlitz einströmt (Versuch 6 derTafel10). Bei der Anordnung nach Abb. 51 liegt der Scheitel der Umkehrflamme mindestens 1 m über der Sohle. Um eine wirksame Erstarrung der abgeschleuderten Schlackentröpfchen zu bewirken, ist die unterste Heizrohrreihe in die Verbrennungskammer heruntergezogen und gitterförmig über die Sohle geführt. Diese Anordnung war bereits bei den Versuchen 4 und 5 der Tafel 10 in den Kesseln des Oneida-Kraftwerkes erfolgreich verwendet worden. Auf Abb. 51 ist ferner die zur Aufnahme von Dehnungsspannungen dienende Wölbung der Vorder- und Rück-

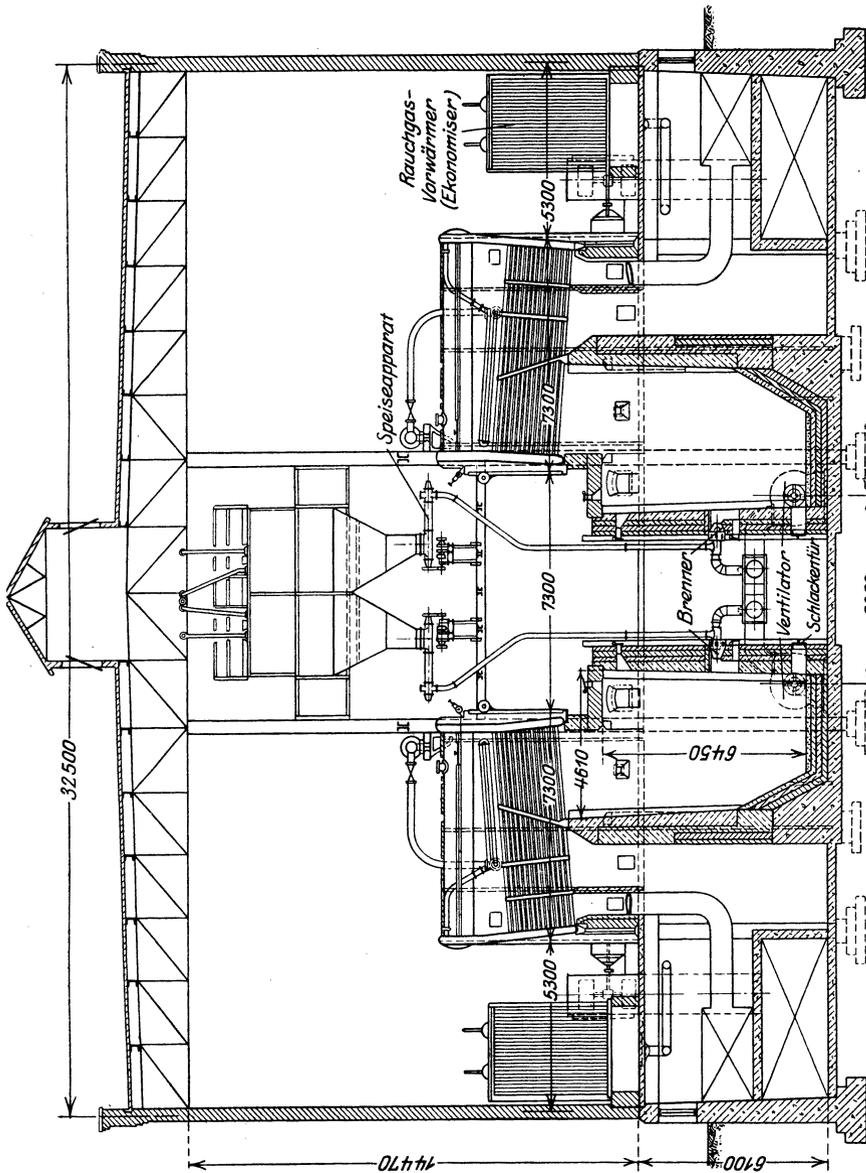


Abb. 52. Fuller-Staubfeuerung unter Schrägröhrekessel des Lakeside-Kraftwerkes.
 Heizfläche der Kessel je 1210 qm Inhalt der Verbrennungskammern . . . 256 cbm.
 " Überhitzer " 374 "

wand zu beachten; um Einstürze zu vermeiden, sind sämtliche Wände leicht zurückgelehnt. Der Feuerraum ist mit einem Luftmantel umgeben, der die kalte Sekundärluft hinten aufnimmt und durch regelbare Schlitze in der vorderen Wand an die Flamme abgibt. Zweck dieses Luftpanzers ist neben Vorwärmung der Luft eine Verringerung

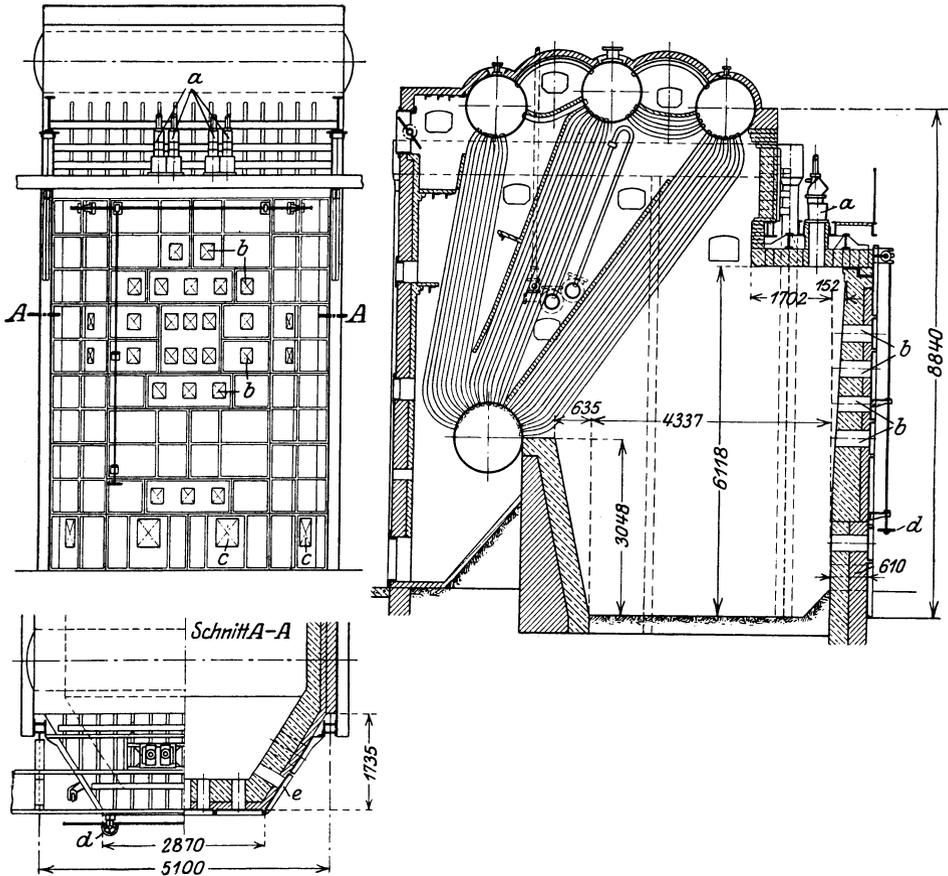


Abb. 53. Stirlingkessel mit Lopulco-Staubfeuerung.

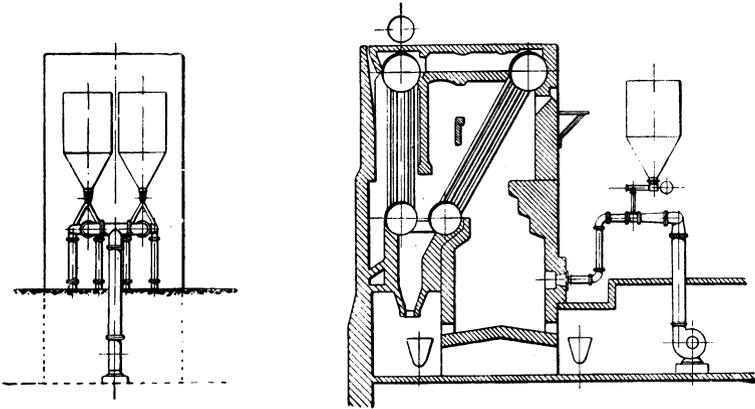
Heizfläche des Kessels rd. 710 qm

Inhalt der Verbrennungskammer 99 cbm.

a = Brenner nach Abb. 27; b = Sekundärluftöffnungen; c = Asche-
türen; d = Handrad für Sekundärluftregelung; e = eiserne Verschalung.

der Wandungsstrahlung¹⁾. Eine ähnliche Feuerung ist in Abb. 53 dargestellt. Beachtenswert ist die Verteilung der Sekundärluftöffnungen, von denen die 3 untersten gleichzeitig zur Kühlung der Schlacke dienen. Bezeichnend ist ferner der „offene“ Feuerraum. Als Gegenstück diene der deutsche Entwurf eines Steilrohrkessels

¹⁾ Diese betrug bei den Kesseln im Oneida-Kraftwerk bei 14 und 28 kg Heizflächenverdampfung 680 und 970 WE/qm \times st; durch den Luftpanzer hofft man diese Werte auf 270 bzw. 340 WE/qm \times st erniedrigen zu können („Power“, 31. V. und 5. VII. 1921).



M. \sim 1:250.

Abb. 54. Garbekessel von 400 qm Heizfläche mit Staubfeuerung von Fellner & Ziegler (Entwurf).

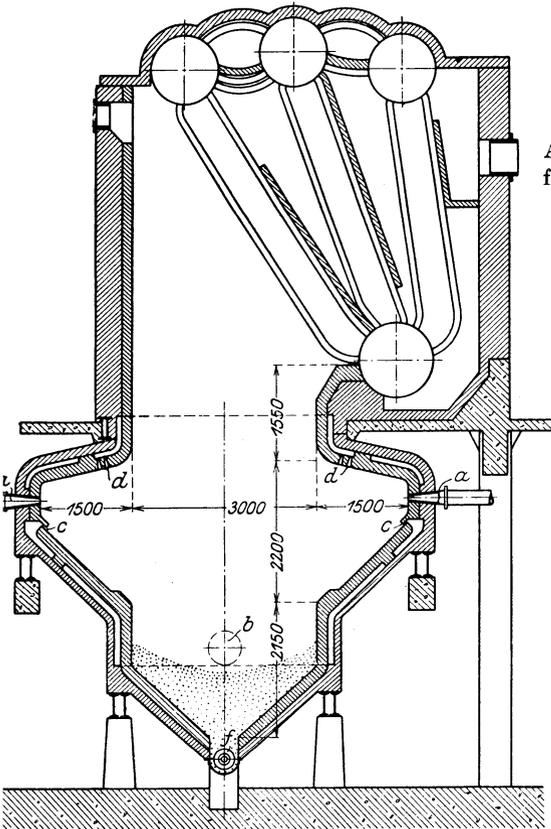
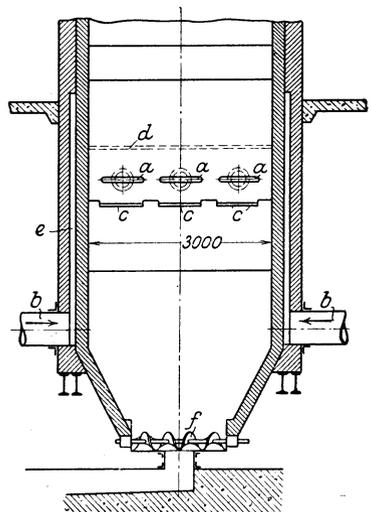


Abb. 55. Entwurf einer Staubfeuerung für Stirlingkessel von 500 qm Heizfläche.
a = Flachbrenner; *b* = Sekundärlufteinlaß; *c* = Sekundärluftdüse;
d = desgl.; *e* = Sekundärluftpanzer; *f* = Schlackenabzug.



(Abb. 54). Der Feuerraum schließt mit der Kesselstirnwand geradlinig ab. Den dadurch bedingten Vorsprung des Zündgewölbes gegen das Kesselinnere hat man in geschickter Weise durch treppenförmige Unterteilung der Zündfläche zu kürzen getrachtet. Einen weiteren (amerikanischen) Entwurf zeigt Abb. 55. Die leitenden Gesichtspunkte dabei sind: Erzielung einer Prallwirkung der Flammen mit darauffolgender intensiver Staub-Luftmischung; Ausweitung des Feuerraumes nach der Mitte zu nach Maßgabe der Ausdehnung der erhitzten Verbrennungsgase; zwangsläufige Führung der flachen Flamme zwischen den bei *c* und *d* austretenden Sekundärluftschleiern, infolgedessen intensive Mischung und kurze Flamme; Schutz der Decken vor Flammenangriff durch Luftdüsen *d*; Abschrecken der ausfallenden Schlacke durch Luftdüsen *c*; Sekundärluftvorwärmung und

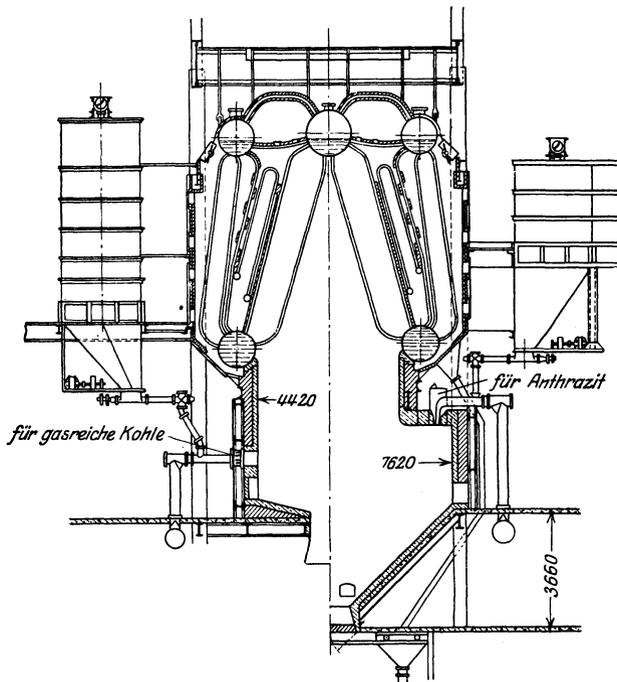
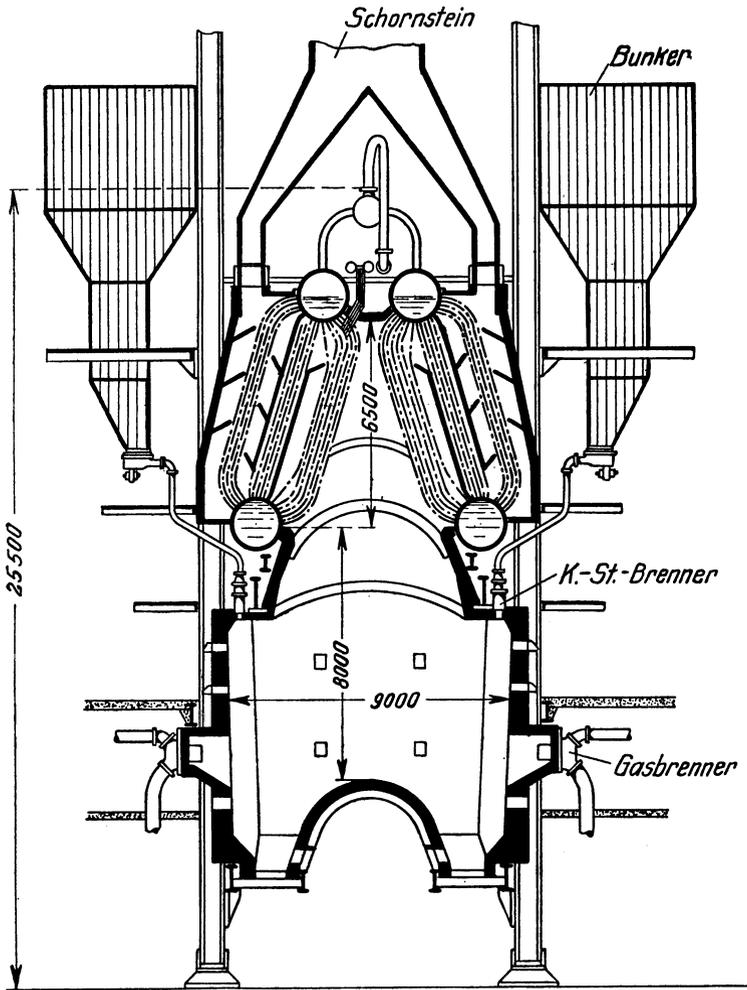


Abb. 56. Fuller-Staubfeuerung für Doppel-Stirlingkessel
 linke Seite: Ausführung für gasreiche Kohle
 rechte " : " " Anthrazit.

Verringerung der Strahlungsverluste durch Luftpanzer *e*; kontinuierlicher Schlackenabzug *f*. Bei den in Abb. 56 und 57 dargestellten Kesseln ist ebenfalls doppelseitige Befuerung vorgesehen. In zwangloser Weise ergeben sich ohne platzraubende Vorbauten große Verbrennungs-



M. \sim 1:250.

Abb. 57. Doppel-Stirlingkessel von rd. 2500 qm Heizfläche mit Feuerung für Kohlenstaub und Hochofengas in der River-Rouge-Anlage der Ford Motor Company.

kammern mit langen Flammenwegen und unmittelbarer Heizflächenbestrahlung. Abb. 57 zeigt einen der 4 auf einem amerikanischen Hochofenwerk errichteten Kohlenstaub-Gichtgaskessel. Das Hochofengas tritt beiderseits durch vertikale Brenner ein, während der

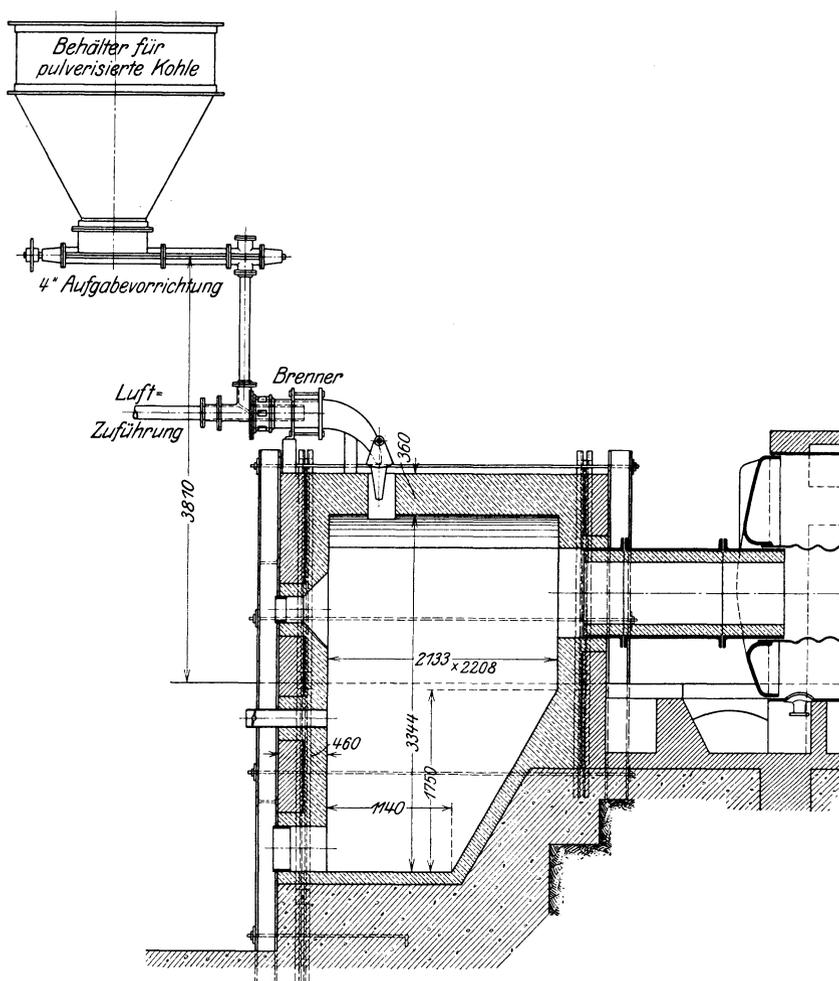


Abb. 58. Fuller-Staubfeuerung für einen Flammrohrkessel von 100 qm Heizfläche.

Kohlenstaub bei auftretenden „Gastälern“ durch die senkrechten Brenner eingeblasen wird¹⁾).

Flammrohrkessel, die in Amerika bekanntlich kaum vertreten sind, wurden erst ganz vereinzelt auf Kohlenstaub umgestellt. Abb. 58

¹⁾ Betriebsergebnisse liegen noch nicht vor. Es muß immerhin fraglich erscheinen, ob sich bei dem Mangel an Steineinbauten eine gute Verbrennung bei ausschließlicher Gichtgasbeheizung ergibt. Dagegen dürfte bei gleichzeitiger Verfeuerung beider Brennstoffe die Kohlenstaubflamme die Rolle von Steineinbauten übernehmen.

zeigt eine Ausführung an einem Piedboeuf-Kessel von 100 qm Heizfläche. Befolgt man die bei Wasserrohr- und Steilrohrkesseln geltenden Richtlinien, so wird man ohne umfangreiche Vorbauten nicht auskommen. Bestrebungen, diese zu vermeiden und die Verbrennung möglichst in das Flammrohr zu verlegen, haben bisher infolge der zerstörenden Wirkung der Flamme auf die Auskleidung keinen Erfolg gehabt. Es ist aber immerhin denkbar, daß sich bei Auswahl hochwertiger feuerfester Materials ein zuverlässiger Betrieb ermöglichen läßt, und es wäre von Fall zu Fall zu berechnen, ob die Vorteile der Staubfeuerung so groß sind, daß sie die häufige periodische Auswechslung des Flammrohrfutters rechtfertigen.

Schließlich sei noch eine Sonderbauart, der Bettington-Kessel, erwähnt, der im Hinblick auf Staubfeuerungen gebaut wurde¹⁾.

c) Versuchsergebnisse.

1. Kesselgattung. Leider stehen bisher nur wenige unter betriebsmäßigen Bedingungen angestellte Verdampfungsversuche zur Verfügung, und diese beziehen sich ausschließlich auf amerikanische Anlagen. Es ist daher schwierig, sich ein völlig klares Bild über das Verhalten der Staubfeuerung in Dauerbetriebe zu machen. Immerhin geben die im Laufe des letzten Jahres in dem Oneida- und Lakeside-Kraftwerk planmäßig durchgeführten Dauerversuche einen tieferen Einblick²⁾. Allerdings beziehen sich diese ausschließlich auf Schrägrohrkessel, lassen aber doch eine Anzahl allgemein gültiger Merkmale erkennen, die auch auf andre Kesselbauarten zutreffen werden. In Zahlentafel 10 sind eine Anzahl Versuchsergebnisse wiedergegeben, von denen sich Nr. 3, 4 und 5 auf den in Abb. 50 dargestellten Kessel des Oneida-Kraftwerkes, Versuch 6 auf die in Abb. 52 gezeigten Kessel des Lakeside-Kraftwerkes und 7 und 8 auf den in Abb. 51 gezeigten Kessel des gleichen Kraftwerkes beziehen.

2. Wirkungsgrade. Die Zahlentafel bestätigt die bereits früher gemachte Erfahrung, daß die Wirkungsgrade nicht höher als bei gut gewarteten mechanischen Rostfeuerungen und guter Kohle sind. Auf Abb. 59 sind die Wirkungsgrade der Kessel des Lakeside-Kraftwerkes aus 7 Dauerversuchen in Abhängigkeit der Heizflächenbelastung dargestellt; sie erreichen in einem Falle den Höchstwert von 90⁰/₀ unter Einschluß von Überhitzer und Rauchgasvorwärmer. Bezeichnend ist

¹⁾ Eine eingehende Beschreibung von Konstruktion und Versuchen findet sich in dem Werk von Dr. Fr. Münzinger, Kohlenstaubfeuerungen für ortsfeste Kessel, S. 60. 1921. Verlag von Jul. Springer, Berlin.

²⁾ Ferner sei auf die in dem gleichen Werke wiedergegebenen Versuche hingewiesen.

Zahlentafel 10.

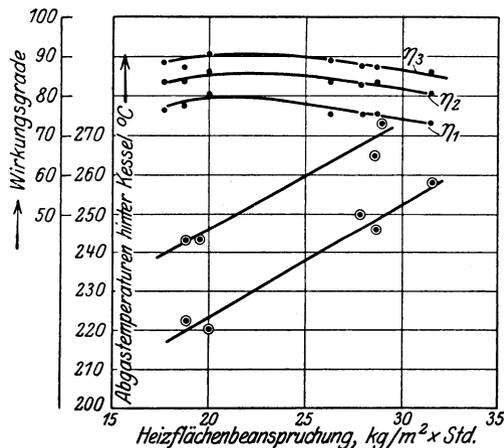
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1. Nummer des Versuches	Lima Loco-	Morris & Co.,	Oneida-Kraftwerk,	Oneida-Kraftwerk,	Lakeside-Kraftwerk,	Lakeside-Kraftwerk,	Lakeside-Kraftwerk,	Lakeside-Kraftwerk,	
2. Name der Anlage	Motive Works	Oklahoma	Milwaukee	Milwaukee	Milwaukee	Milwaukee	Milwaukee	Milwaukee	
3. Datum des Versuches	19. XI. 1919	1./2. III. 1920	Herbst 1920 u. Frühj. 1921	Herbst 1920 u. Frühj. 1921	Sommer 1921	Sommer 1921	Sommer 1921	Sommer 1921	
4. Dauer des Versuches	6	9,97	18,17	22,47	23,38	48,13	19,92	24,17	
5. Feuerungssystem	← Lopulco		← Lopulco		← Lopulco		← Lopulco		
6. Kesselbauart	← Lopulco		← Lopulco		← Lopulco		← Lopulco		
	← Schrägröhrenkessel		← Schrägröhrenkessel		← Schrägröhrenkessel		← Schrägröhrenkessel		
Abmessungen der Kessel:									
7. Heizfläche des Kessels	452	485	485	485	485	1210	1210	1210	
8. Heizfläche der Kühlröhren in der Verbrennungskammer	—	—	—	4,5	4,5	—	~30	~30	
9. Heizfläche des Überhitzers	—	—	55	55	55	374	374	374	
10. Heizfläche des Rauchgasvorwärmers (Economiser)	—	—	—	—	—	706	706	706	
11. Gesamte Heizfläche	452	485	490	494,5	494,5	2290	2320	2320	
12. Volumen der Verbrennungskammer	?	42	47	47	47	256	196	196	
13. Volumen der Verbrennungskammer: Heizfläche des Kessels (12:7)	?	0,097	0,108	0,108	0,108	0,212	0,162	0,162	
14. Herkunft der Kohle	Anthrazit von Korea	Lignit von Texas	Steinkohle von Illinois	Steinkohle von Illinois	Steinkohle von Illinois	Steinkohle von Illinois	Steinkohle von Illinois	Steinkohle von Illinois	
Eigenschaften der verbrannten Kohle:									
15. Heizwert (unterer)	7190	4291	6586	6753	6349	6300	6604	6450	
16. Rückstand auf 1550 er Sieb	—	—	—	6,9	5,6	—	9,5	9,5	
17. " " 6200 er Sieb	—	—	—	29,9	—	—	30,9	33,3	
18. Flüchtige Bestandteile	10,39	30,11	37,45	36,29	34,42	~34	35,66	35,85	
19. Fixer Kohlenstoff	74,45	37,6	46,08	49,01	46,39	~45	48,70	47,16	
20. Feuchtigkeit	2,15	19,6	8,23	3,07	8,23	4,55	3,59	5,61	
21. Asche	13,01	12,7	13,72	11,63	10,96	13,26	12,05	11,38	
22. Schwefel (besonders bestimmt)	0,88	—	3,49	2,66	2,21	4,03	2,28	3,39	
Ablesungen während des Versuches:									
23. Speisewassertemperatur vor Rauchgasvorwärmer	—	—	—	—	—	55	51,1	52,8	
24. Speisewassertemperatur vor Kühlröhren (siehe Abb. 51)	—	—	—	11,1	7,8	—	—	—	
25. Speisewassertemperatur hinter Kühlröhren	—	—	—	62,8	54,4	—	—	—	
26. Speisewassertemperatur, Kesseleintritt	57,6	43	37,2	37,8	37,8	93,7	86,7	90,8	
27. Dampfdruck	11,1	10,6	13,8	13,2	12,8	19,0	19,0	19,1	
28. Dampftemperatur	183,4	181,4	237,4	224,9	227,9	305,8	312,9	308,7	

29. Lufttemperatur im Kesselhaus	°C	15,6	26,4	26,7	21,7	22,2	—	—	32,8	33,9
30. Temperatur der Verbrennungskammer	°C	1330	1060	—	—	—	—	—	—	—
31. Rauchgastemperatur hinter Kessel	°C	230,7	337,4	321,1	244,4	241,2	242,8	250,0	257,8	257,8
32. Rauchgastemperatur hinter Rauchgasvorwärmer	°C	—	—	—	—	—	110,0	96,1	121,7	121,7
33. Verbrennliches in v. H. der Asche und Schlacke	v. H.	7,9	—	4,5	5,2	2,0	—	3,3	6,5	—
34. Schmelztemperatur der Schlacke	°C	1140	—	1210	1155	—	—	—	—	—
Zusammensetzung der Rauchgase:										
35. CO ₂ (Kesselende)	v. H.	14,34	14,55	15,4	15,8	15,8	13,7	14,7	14,1	14,1
36. CO (")	v. H.	0,0	0,0	0,26	0,1	0,0	0,0	0,03	0,09	0,09
37. O (")	v. H.	4,81	4,55	2,9	2,4	2,9	5,1	4,6	5,2	5,2
Unterdruck der Rauchgase:										
38. In der Verbrennungskammer	mm WS	1	0,8	0,0	0,0	0,76	0,5	4,1	5,2	5,2
39. Am Kesselende	mm WS	3,8	4,1	6,9	2,04	1,27	12,0	30,2	35,6	35,6
Rechnerische Ergebnisse:										
40. Stündlich verbrannte Kohlenstaubmenge	kg/st	827,9	1602	1316,6	917,9	809,5	2845	4336	5147,4	5147,4
41. Volumen d. Verbrennungskammer: stündlich verbrannte Kohle (12:40)	cbm/t × st	—	26,2	35,7	51,2	58,2	90,0	45,2	38,1	38,1
42. Heizflächenbeanspruchung (Kessel allein), bezogen auf Normaldampf von 639,7 WE/kg	kg/qm × st	16,4	20,1	23,6	16,0	13,6	17,7	27,9	31,5	31,5
Wärmebilanz.										
Aufgenommene Wärme:										
43. Von Kessel	v. H.	79,6	81,5	75,9	71,7	73,6	76,4	75,3	73,3	73,3
44. Von Kühlröhren	v. H.	—	—	—	8,1	4,9	—	—	—	—
45. Von Überhitzer	v. H.	—	—	3,2	2,1	2,7	7,3	7,6	7,2	7,2
Verluste:										
46. Durch fühlbare Wärme der trockenen Rauchgase	v. H.	8,9	—	11,4	8,6	8,6	~ 9,0	9,1	9,8	9,8
47. Durch den Dampf aus der Wasserstoffverbrennung	v. H.	2,8	—	4,2	4,2	4,1	3,5	4,3	4,2	4,2
48. Durch den Dampf aus der Luftfeuchtigkeit	v. H.	0,1	—	0,1	0,1	0,1	—	0,1	0,2	0,2
49. Durch Kohlenoxydgas	v. H.	0,0	—	1,0	0,2	0,0	—	0,1	0,4	0,4
50. Verluste in Asche und Schlacke	v. H.	1,3	—	0,7	0,7	0,3	—	0,5	0,9	0,9
51. Durch Strahlung	v. H.	7,3	—	2,6	2,1	2,5	—	1,1	1,0	1,0
52. Restglied	v. H.	—	—	0,9	2,2	3,2	—	1,9	3,0	3,0
Summe 43 bis 52 einschl.	v. H.	100,0	—	100,0	100,0	100,0	—	100,0	100,0	100,0
53. In Rauchgasvorwärmer wiedergewonnen	v. H.	—	—	—	—	—	5,1	4,6	4,8	4,8
54. Gesamter Wirkungsgrad (ohne Aufbereitung) (Summe 43, 44, 45 und 53)	v. H.	79,6	81,5	79,1	81,9	81,2	88,8	87,5	85,3	85,3

der flache und daher günstige Verlauf der Kurven, ein Merkmal, das Kesseln mit großen, nach den Heizflächen zu freiliegenden Verbrennungskammern schlechthin eigen ist, und daher bei großräumigen, offenen Kohlenstaubfeuerungen nach Abb. 51 bis 53 und 55 bis 57 eher in die Erscheinung treten dürfte, als bei vorgebauten, durch Zündgewölbe von den Heizflächen abgeschnürten Verbrennungskammern¹⁾.

3. Kohlendioxid und Luftüberschuß. Wie aus der Zahlentafel 10 ersichtlich ist, ist man auch bei den neuen Anlagen mit dem Kohlendioxidgehalt im Dauerbetrieb nicht über 14 bis 16 % hinausgegangen. Bei einem Sauerstoffgehalt der Abgase von 3 bis 5 % betrug der Luftüberschuß 15 bis 25 %, ein Wert, der auch bei neuzeitlichen mechanischen Rostfeuerungen und vorzüglicher Kohle zu erreichen ist.

4. Abgastemperaturen. In Abb. 59 sind die aus 9 Einzelversuchen ermittelten Rauchgastemperaturen der Lakeside-Kessel in 2 Kurven dargestellt. Dabei zeigt sich, daß bei der Feuerungs-



Ab. 59. Wirkungsgrade und Abgastemperaturen hinter dem Kessel (4. Zug) in Abhängigkeit der Heizflächenbelastung.

- η_1 = Wirkungsgrad des Kessels.
 η_2 = " " von Kessel und Überhitzer.
 η_3 = " " Kessel, Überhitzer u. Rauchgasvorwärmer (Economiser).

anordnung nach Abb. 52 etwas höhere Temperaturen auftreten als bei der Anordnung nach Abb. 51. Wahrscheinlich ist die Brenneranordnung und Sekundärluftzuführung für diesen Unterschied verantwortlich zu machen²⁾. Auffallend niedrig sind die Temperaturen hinter den Rauchgasvorwärmern (Tafel 10, Zeile 32).

¹⁾ „Archiv für Wärmewirtschaft“, Nov. 1921, S. 158. ²⁾ Siehe S. 63 u. 64.

5. Heizflächenbeanspruchung. Die Abhängigkeit der Heizflächenbeanspruchung von der Größe der Verbrennungskammer geht aus Abb. 60 hervor. Für die obere Kurve ist der Wert Q um etwa 50% größer als bei der unteren; dementsprechend sind bei gleichartiger Kohle und gleichen Beanspruchungen des Feuerraumes die erzielten Heizflächenbeanspruchungen um rund 50% höher.

6. Brennstoffe. Außer mit den auf der Tafel 10, Zeile 14 f. bezeichneten Brennstoffen sind Versuche mit Schlammkohle und dem im Windsichtungsverfahren der Kohlenwäschen abgesogenen Staube gemacht worden bzw. im Gang. U. a. ist in einem Bahnkraftwerk in Philadelphia (Tafel 8, Zeile 10) kürzlich ein Kessel auf Staub aus anthrazitischem Kohlenschlamm umgestellt worden¹⁾.

7. Trocknung. Bei Versuch 5 und 8 wurde Steinkohle mit einer Feuchtigkeit von 8,2 bzw. 5,6% verfeuert, ohne daß sich irgendwelche Anstände ergeben hätten. Die Feuchtigkeit des Lignitstaubes bei Versuch 2 der Tafel 10 betrug über 19%.

8. Mahlfeinheit. Für diese wurde bisher als Regel ein Rückstand von 8 bis 15% auf einem 4900er oder von 10 bis 20% auf einem 6200er Sieb gefordert. Wie die Versuchsreihen 4, 7 und 8 der Tafel 10 zeigen, traten bei der geringeren Mahlfeinheit von etwa 30% Rückstand auf einem 6200er Sieb (Zeile 17) keine merklich niedrigeren Wirkungsgrade ein. Man gewinnt den Eindruck, daß die Güte der Verbrennung eher eine Funktion richtiger Feuerungskonstruktion als der Mahlfeinheit ist. Gelingt es, gröberen Kohlenstaub zu verbrennen, oder dem feingemahlten gröbere Bestandteile zuzusetzen, so würde die Wirtschaftlichkeit der Aufbereitung und damit der Staubfeuerung überhaupt vergrößert werden können. Bei bösarartigen Schlacken ist allerdings Vorsicht geboten.

9. Asche. Der auf der Tafel (Zeile 21) wiedergegebene Aschegehalt liegt zwischen 10 und 14%; in dem oben erwähnten Kraftwerk in Philadelphia beträgt der Aschegehalt des aus anthrazitischer Schlammkohle hergestellten Staubes 18%. Eine obere Grenze für

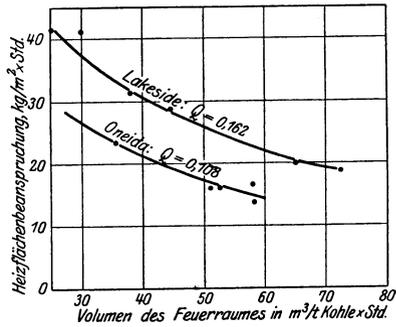


Abb. 60. Heizflächenbelastung in Abhängigkeit der Größe der Verbrennungskammer.

Q = Verbrennungskammer in cbm.
Heizfläche des Kessels in qm.

¹⁾ „Power“, 29. Nov. 1921, S. 828.

den Aschegehalt läßt sich kaum ziehen. Maßgebend sind vielmehr Schmelztemperatur und chemische Zusammensetzung, auf deren Bedeutung auf S. 13 f. hingewiesen wurde.

In der Regel scheint die Flugasche bedeutend mehr brennbare Bestandteile zu enthalten als die Schlacke¹⁾. Bei den Versuchen 3 bis 8 der Tafel 10 beläuft sich das Verbrennliche auf 3 bis 8% der Flugasche und etwa 2 bis 6,5% von Asche + Schlacke (Zeile 33); dieser Verlust ist daher geringer als bei Rostfeuerungen. Von der gesamten Aschen- und Schlackenmenge fanden sich bei den Versuchen²⁾:

Nummer des Versuches auf Tafel 10	3	4	5
Am Boden der Verbrennungskammer . v. H.	41,5	24,1	47,1
Im 1. und 3. Rauchgaszug v. H.	5,8	7,0	7,7
Im Flugaschenfang am Schornstein . . v. H.	33,2	29,0	26,0
Durch Schornstein entwichen v. H.	19,5	39,9	19,2

Bedenkt man, daß bei deutschen Rohbraunkohlen 30 bis 50% des Unverbrennlichen als Flugasche durch den Schornstein abziehen, so erscheinen die obigen zwischen 19 und 40% liegenden Werte nicht bedenklich. Die entweichende Flugasche wird als außerordentlich feines Pulver beschrieben, das in die höheren atmosphärischen Schichten gelangt, sich auf große Flächen verteilt und in den angrenzenden Wohnvierteln der Stadt Milwaukee keine Belästigungen hervorgerufen haben soll.

10. Ausbesserungsarbeiten. α) In der Aufbereitungsanlage: Diese hängen von der Art der Anlage und des vermahlenden Brennstoffes ab. In Deutschland können die von den Zementfabriken gemachten Erfahrungen als Anhalt dienen

β) An den Kesseln: Im Oneida-Kraftwerk hat sich auf Grund 2jähriger Erfahrungen die Haltbarkeit der feuerfesten Steine als nicht geringer als bei Kesselbetrieb herausgestellt³⁾. Vor einer Verallgemeinerung dieser Tatsache muß jedoch gewarnt werden, solange nicht eingehendere Unterlagen zur Verfügung stehen; vor allem ist bei bösartigen Schlacken zu fürchten, daß die Ausmauerung kurzlebiger als bei Rostfeuerungen ist. Zugunsten der Staubfeuerung ist dagegen anzuführen, daß sich keine beweglichen Teile in der Feuerzone befinden; Rostreparaturen fallen daher fort. Nach amerikanischen Mitteilungen ist auch der Schaden durch Schwefel in der Asche bei Staubfeuerungen geringer als bei Rosten⁴⁾.

¹⁾ „Power“, 2. März 1920, S. 356: bei Versuchen im Oneida-Kraftwerk enthielt die Flugasche 13,76%, die Schlacke 0,59% Brennbares.

²⁾ „Power“, 31. Mai 1921, S. 905. ³⁾ „Power“, 2. März 1920, S. 342.

⁴⁾ „Power“, 2. März 1920, S. 337 f.

d) Verhalten der Staubfeuerung unter verschiedenen Betriebszuständen.

1. Allgemeines. Zugunsten der Kohlenstaubfeuerung werden oft folgende Vorzüge ins Feld geführt:

- a) ein hoher Wirkungsgrad infolge geringen Luftüberschusses und geringer Rückständeverluste;
- b) gute Regelbarkeit bei Belastungsschwankungen;
- c) geringe Leerlaufverluste und schnelle Betriebsbereitschaft.

Im folgendem soll kurz festgestellt werden, wie weit diese Vorzüge im praktischen Betrieb vorhanden sind.

2. Vollast. Die Möglichkeit, Kohlenstaub mit niedrigem Luftüberschuß und hohem CO_2 -Gehalt zu verbrennen, ohne unverbrannte Abgase oder brennbare Rückstände zu erhalten, kann bei Kesseln nicht voll ausgenutzt werden. Die Erfahrung hat gezeigt, daß eine Steigerung des Kohlensäuregehaltes über eine gewisse Grenze Temperaturen erzeugt, denen das feuerfeste Mauerwerk des Feuerraumes auf die Dauer nicht gewachsen ist. Ein anderer Grund, den CO_2 -Gehalt durch vermehrten Luftüberschuß herabzudrücken, liegt vor, wenn man Aschenverflüssigung vermeiden will. Auf Seite 116 wurden die konstruktiven Maßnahmen angedeutet, durch die man in der modernen amerikanischen Praxis einerseits das Mauerwerk schützen, andererseits flüssige Schlacke schadlos zu machen bestrebt ist. Trotzdem zeigen auch die neuesten Versuche (Seite 127), daß man den CO_2 -Gehalt nicht über 14 bis 16 % zu steigern wagte, also einen Betrag, der auch bei gut geführten mechanischen Rosten erreicht wird. Der Vorschlag, statt des üblichen Schamottesteins, der keiner höheren Temperatur als 1400 bis 1500° ausgesetzt werden sollte, hochtemperaturbeständige Materialien zu verwenden, dürfte an wirtschaftlichen Bedenken scheitern. Über Versuche mit hochwertigen Ausstampfungen der Wände liegen noch keine zuverlässigen Unterlagen vor. Solange es nicht gelingt, im Dauerbetrieb mit höherem CO_2 -Gehalt zu fahren, kann von einer wesentlichen thermischen Überlegenheit der Staubfeuerung gegenüber modernen mechanischen Rostfeuerungen kaum die Rede sein. Auch durch die an sich sehr niedrigen Rückständeverluste läßt sich gegenüber guter Stückkohle und Rosten nur eine geringe Hebung des Wirkungsgrades herauschlagen. Allerdings ändern sich die Verhältnisse bei feinkörnigen oder minderwertigen Kohlen. Diese drücken den Wirkungsgrad bei Rostfeuerungen durch hohen Luftüberschuß, große Rückständeverluste, häufiges Reinigen infolge Klinkerbildung, sowie Ansaugen falscher Luft infolge verstärkten Zuges herab. Bei der Verfeuerung minderwertiger Brennstoffe in Staubform erfährt

dagegen der Luftüberschuß keine Erhöhung, ja er kann sogar erniedrigt werden, wenn hoher Aschegehalt an Stelle von Luftüberschuß zur Temperaturmilderung dient¹⁾. Auch die Größe der Rückständeverluste ist bei staubförmiger Verfeuerung nicht in dem Maße von der Minderwertigkeit des Brennstoffes abhängig, wie bei Verbrennung in Stückform. Der Wirkungsgrad nimmt daher mit zunehmender Minderwertigkeit des Brennstoffes bei Staubfeuerungen nicht so schnell ab, wie bei Rostfeuerungen. Allerdings darf nicht verkannt werden, daß neuerdings minderwertige Brennstoffe, wie Schlamm und aschereiche Kohlen, auch auf Rosten mit hohen Wirkungsgraden verarbeitet werden können. In solchen Fällen sind aber in der Regel Sonderkonstruktionen nötig, die einen Übergang auf andere Brennstoffe nur in beschränktem Maße zulassen. Dagegen ist die Staubfeuerung gegen Wechsel des Brennstoffes weit weniger empfindlich und erfordert daher bei Umstellungen nur geringe konstruktive Änderungen.

3. Teillast. Da ein Kessel selten dauernd unter Vollast steht und häufigen Belastungsschwankungen ausgesetzt wird, ist auf

a) gute Wirkungsgrade bei Teillast,

β) leichte und weitgehende Regelbarkeit Wert zu legen.

a) Wirkungsgrade. Auf den inneren Zusammenhang der flachen und daher günstig verlaufenden Kurven der Abb. 59 mit einer möglichst geringen Abschnürung der Verbrennungskammer gegen die Heizfläche wurde bereits hingewiesen. Die Wirkungsgrade dürften daher bei Flammrohrkesseln mit Vorbauten steiler abfallen als bei Wasserrohr- oder Steilrohrkesseln. Während sich bei Rostfeuerungen der Scheitel der Wirkungsgradkurve mit zunehmender Minderwertigkeit nach rechts, d. h. zu Punkten höherer Belastung bewegt, wird er sich bei Kohlenstaubfeuerungen auch bei Übergang zu minderwertigen Brennstoffen weniger aus seiner Lage verschieben²⁾.

β) Regelung. Die Regelung geschieht in der auf Seite 60 f. beschriebenen Weise. Durch Änderung der Staubmenge und der Sekundärluft gestaltet sich der Regelvorgang völlig zwangsläufig und kann, da unvorhersehbare Zwischenfälle, wie das Entstehen von Löchern in der Brennstoffschicht der Rostfeuerungen ausgeschlossen sind, maschinell durchgeführt werden; es ist daher möglich, automatisch mit konstanter Kohlensäure bei verschiedenen Belastungen zu fahren. Während sich die auf dem Rost befindlichen Massen bei Belastungsänderung erst allmählich dem neuen Gleichgewicht anpassen können, stellt sich dies bei Staubfeuerung sofort ein. Infolgedessen fallen die bei Belastungsschwankungen auftretenden Verluste

¹⁾ Siehe Seite 15.

²⁾ Archiv für Wärmewirtschaft, Nov. 1921, S. 158.

bei Staubfeuerungen geringer aus, d. h. der Unterschied zwischen den im Dauerbetrieb und bei Abnahmeversuchen erzielten Wirkungsgraden ist geringer als bei Rostfeuerungen. In der Literatur wird von interessierter Seite für die Staubfeuerung nicht nur eine leichte, sondern auch eine weitgehende Regelbarkeit in Anspruch genommen. Das letztere ist auf Grund praktischer Erfahrungen mit Vorsicht aufzunehmen. Die Staubfeuerungen sind von der Zündtemperatur des Mauerwerks in hohem Maße abhängig. Der Regelbereich ist um so größer, je kürzer die Teillast oder Leerlaufpause anhält oder je zündfähiger der Brennstoff ist. Obwohl noch keine zahlenmäßigen Unterlagen vorhanden sind, kann man doch mit einiger Gewißheit behaupten, daß der Regelbereich bei Staubfeuerungen geringer als bei allen Gas- oder Ölfeuerungen und den meisten Rostfeuerungen ist. Das gilt um so mehr, je länger die Teillast oder Leerlaufperiode und je kleiner die Feuerung ist, oder je weniger Wärme die Feuerraumwandungen speichern können. Es hat aber nicht den Anschein, daß dadurch die Staubfeuerung in ihren Anwendungsmöglichkeiten wesentlich eingeschränkt wird. Bei den Versuchen des Lakeside-Kraftwerkes (Tafel 10) ist wiederholt zwei Tage (48 Stunden) hindurch mit halber Vollast gefahren worden, ohne daß sich Störungen ergeben hätten. Das Verhältnis der Dauerleistungen ist daher mindestens 1:2; im Oneida-Kraftwerk werden bei Beschreibung von Versuchen Leistungsschwankungen im Verhältnis 1:8 berichtet¹⁾, wobei es sich allerdings um kurzanhaltende Teillasten gehandelt haben wird. Der Regelbereich könnte dadurch vergrößert werden, daß man durch Einschränkung der unmittelbaren Wärmeabstrahlung die Feuerraumtemperatur erhöht; damit begäbe man sich aber des Vorteils offener Verbrennungskammern und bekäme bei Vollast zu hohe Wandungstemperaturen. Es ist daher zweckmäßiger, für niedrige Teillasten besondere Brenner vorzusehen, die beispielsweise nischenartig in die Kammerwandung eingebaut werden und dadurch unmittelbar von einer gewissen Zündfläche umgeben sind.

4. Leerlauf, Anheizperioden. Staubfeuerungen brauchen bei Leerlaufperioden keinen Brennstoff, soweit sich diese nicht so lange ausdehnen, daß die Zündung des Staubes an den abgekühlten Wandungen der Kammer bei Inbetriebnahme in Frage gestellt wird²⁾. Während bei leerlaufenden Rostfeuerungen der Kaminschieber mit Rücksicht auf Explosionen in der Regel nicht ganz geschlossen wird, darf eine abgestellte Staubfeuerung gegen das Eindringen falscher Luft völlig abgedichtet werden. Deshalb und wegen des größeren

¹⁾ „Power“, 31. Mai 1921, S. 906.

²⁾ Der Leerlaufverbrauch rostgefeuerter Kessel beträgt 3 bis 9% des Vollastverbrauches.

Speichervermögens der Verbrennungskammer geht die Abkühlung langsamer als bei Rostfeuerungen vor sich. Bei Versuchen im Oneida-Kraftwerk war das Mauerwerk nach einer Betriebspause von 10 Stunden noch heiß genug, um den Staub sicher zu entzünden. Der Kessel-
druck war in dieser Zeit von 12 auf 10,5 at gefallen¹⁾. Im Mt.-Vernon-Kraftwerk in Philadelphia, in dem die Kessel ebenfalls mit 10 stündigen Betriebspausen arbeiten und mit aschereichem Staub anthrazitischen Ursprungs befeuert werden sollen, sind allerdings Öl-
brenner zum Anheizen und sicheren Zünden des Staubes angebracht worden²⁾. Es scheint also, daß bei großen Kesseln eine Betriebspause von 10 Stunden an der Grenze selbsttätiger Zündung liegt. Auch die von interessierter Seite ausgehende Behauptung, die Kohlenstaubfeuerung gestatte kürzere Anheizzeiten, ist mit Vorsicht aufzunehmen. Während kleine Kessel in weniger als einer halben Stunde aus dem kalten Zustand auf Betriebsdruck gebracht werden dürfen, sind bei großen Feuerungen mit Rücksicht auf die Wandung der Verbrennungskammer zum Anheizen mindestens $1\frac{1}{2}$ Stunden anzusetzen, die nur im Notfalle unterschritten werden sollten. Damit wird aber die bei Rostfeuerungen übliche Anheizzeit erreicht. Über den Staubbedarf während der Anheizperiode liegen leider noch keine einwandfreien Messungen vor. Die Brennstoffersparnis gegenüber Rostfeuerungen beläuft sich unter Berücksichtigung der Aufbereitung nach Berechnungen von Dr. Münzinger bei Steinkohlen bei 16 stündiger Arbeitszeit auf 4⁰/₀ und erreicht bei 8 stündigem Betrieb 10⁰/₀³⁾.

5. Zusammenfassung. Aus dem obigen geht hervor, daß von einer thermischen Überlegenheit der Staubfeuerung bei minderwertigen und feinkörnigen Brennstoffen allgemein und bei hochwertigen Kohlen nur bei schwankenden Belastungen und Leerlaufpausen gesprochen werden kann. Daraus folgt, daß man die Staubfeuerung zweckmäßig solchen Kesseln zuweist, die starken und häufigen Leistungsschwankungen ausgesetzt sind oder nur zeitweise in Betrieb sind, d. h. also sogenannten „Spitzenkesseln“. Inwieweit etwaige Hilfsfeuerungen zum Zünden nach langen Betriebspausen oder mangelhaftes Funktionieren der Brenner bei Teillasten die Überlegenheit der Staubfeuerung bei Spitzenbetrieb herabdrücken, sei dahingestellt. Jedenfalls sind in dieser Hinsicht noch Verbesserungen nötig und auch möglich.

Auf Hüttenwerken dürfte sich die Staubfeuerung ferner als Zusatzfeuerung unter Schräg- oder Steilrohrkesseln bei auftretendem Hochofen- oder Koksofengasmangel einbürgern.

1) „Power“, 15. Okt. 1918, S. 558. 2) „Power“, 29. Nov. 1921, S. 828 f.

3) Dr. Münzinger, Kohlenstaubfeuerungen für ortsfeste Dampfkessel, S. 101.

e) Wirtschaftlicher Vergleich mit mechanischen Rostfeuerungen.

1. Allgemeines. Die Wirtschaftlichkeit einer Kesselfeuerungsanlage wird durch folgende Faktoren bestimmt:

- a) Menge und Art des Brennstoffes.
- b) Anlagekosten.
- c) Löhne.
- d) Reparaturen.
- e) Anpassungsfähigkeit an verschiedenartige Brennstoffe.
- f) Betriebssicherheit.

2. Menge und Art des Brennstoffes. In der Zahlentafel 11 ist eine vergleichende Zusammenstellung des Wärmeverbrauchs bei Rost- und Staubfeuerungen für die hauptsächlichsten Vertreter der Brennstoffe schätzungsweise gegeben. In der zweiten Zeile steht der Wärmearbeit zur Bestreitung des Kohlentransportes, der Brikettierung und des Rostantriebes einerseits, sowie für Trocknung, Mahlung und Transport des Staubes andererseits in Prozenten der gesamten eingeführten Wärmemenge; daraus erhält man in Zeile 3 die dem Kessel zugeführte Wärmemenge. Durch Multiplikation dieser Werte mit den Kesselwirkungsgraden ergibt sich in Zeile 5 der Gesamtwirkungsgrad, d. h. das Wärmeausbringen in Dampf in % der in der eingeführten Rohkohle enthaltenen Wärme. Da sich die Zahlen auf den Betriebszustand beziehen, bei welchem die thermische Überlegenheit der Staubfeuerung am geringsten ist, nämlich auf Vollast, so ergibt sich durch Vergleich der Zahlen in Zeile 5 die geringste zu erwartende Brennstoffersparnis. Die Zahlen können daher als Ausgangspunkt für eine wirtschaftliche Betrachtung dienen.

3. Anlagekosten. Diese erstrecken sich bei Staubbetrieb auf die Aufbereitungs- und Staubtransportanlage, die Zwischenbunker, sowie die Verbrennungskammer einschließlich Speiser, Brenner, Ventilator und Motoren. Ihnen stehen bei Rostfeuerungen Transportanlage, Kohlenbunker, Verbrennungskammer, Ventilatoren und die mechanische Rostanlage einschließlich Antriebsmaschinen gegenüber. Es ist schwierig, bei den heutigen Marktverhältnissen und den je nach der Brennstoffart sehr verschiedenen Rostkonstruktionen zu sagen, ob bei Staub- oder Rostbetrieb die Anlagekosten höher sind. In den meisten Fällen ist jedenfalls der Unterschied kein großer¹⁾. Allgemein kann man folgendes sagen:

Mit zunehmender Nennleistung der Anlage oder mit zunehmender Kesselanzahl wachsen die gesamten Anlagekosten bei Staub-

¹⁾ Für eine amerikanische Kesselanlage von 5 Kesseln zu je 1000 m² Heizfläche ergeben sich bei Staub- und Rostbetrieb 128000 bzw. 150000 Dollar.

Zahlentafel 11.

(Siehe auch Zahlen- tafel 7)		Gute Steinkohle		Steinkohlen- Schlamm		Braunkohle		
		Rostfeuerung	Staub- feuerung	Rostfeuerung	Staub- feuerung	Rohkohlen- Rostfeuerung	Brikett- Rostfeuerung	Staub- feuerung
1	Gesamter Wärme- aufwand . . vH.	100	100	100	100	100	100	100
2	Selbstverbrauch „	1—2	3—7	3—5	10	bis 4	20—25	15—20
3	Der Feuerung zugeführte WE „	98—99	93—97	95—97	90	96 u. mehr	75—80	80—85
4	Kesselwirkungs- grade ¹⁾ . . . „	77 ²⁾	81 ²⁾	55—70	65—75 ³⁾	55—80 ⁴⁾	70—80	70—85 ⁵⁾
5	Gesamter Wir- kungsgrad . . „	75—76	75—79	52—68	58—67	55—77	53—64	56—72

feuerung mit zentraler Aufbereitung langsamer, als bei Rostfeuerung oder als bei Vermahlung der Kohle in individuellen Mühlen⁶⁾ vor den Kesseln.

Mit abnehmendem Belastungsfaktor nehmen die gesamten Anlagekosten bei Staubfeuerungen mit zentraler, dreischichtig arbeitender Aufbereitung schneller ab als bei Rostfeuerungen, während sie bei Staubherstellung in individuellen Mühlen konstant bleiben.

Mit zunehmender Spitzenlast wachsen die gesamten Anlagekosten bei Staubfeuerung mit zentraler Mahlanlage langsamer als bei Rostfeuerung oder als bei Herstellung des Staubes in individuellen Mühlen. Im ersten Falle ist nur der Feuerraum mit seinem billigen mechanischen Zubehör, in den beiden letzten Fällen auch die gesamte Rostanlage bzw. Mühlenanlage nach der größten auftretenden Spitze zu bemessen.

4. Löhne. Die Löhne sind, soweit sie sich auf die zentrale Aufbereitungsanlage beziehen, auf der Tafel 3 bereits berücksichtigt.

¹⁾ Die oberen Werte beziehen sich auf besonders günstige Fälle und Kessel mit Überhitzern und Rauchgasvorwärmern (Economisern).

²⁾ Tatsächliche, an dem gleichen Kessel ermittelte Betriebswerte; der Kessel hat keinen Rauchgasvorwärmer (Economiser); „Power“, 2. März 1920, S. 357.

³⁾ In einem Fall wird als Wirkungsgrad ohne Überhitzer und Rauchgasvorwärmer 69—76 % genannt. („Power“, 29. Nov. 1921, S. 832.)

⁴⁾ „Wärme“, 20. Jan. 1922, S. 50; Zeitschrift für Dampfkessel und Maschinenbetrieb 1921, Nr. 32.

⁵⁾ Bei deutschem aschearmen Braunkohlenstaub mit hohem Schmelzpunkt der Asche sind niedrige Luftüberschüsse und daher ebenso hohe Wirkungsgrade wie bei Steinkohle zu erwarten; siehe Tafel 10, Versuche 2 und 5—8.

⁶⁾ Siehe Seite 27.

Im Kesselhaus dürfte sich eine Ersparnis an Arbeitskräften bei Staubfeuerungen nur in größeren Betrieben herausstellen, in denen die Regelung maschinell und von einem zentralen Punkte aus gehandhabt wird.

5. Reparaturen. Diese sind, soweit die zentrale Aufbereitungsanlage in Frage kommt, ebenfalls bereits in Tafel 3 bereits berücksichtigt. Über Reparaturen bei Staubfeuerungen im Kesselhaus fehlen z. Zt. noch zuverlässige Unterlagen. Die Auslagen dürften, da das Rostkonto fortfällt, bei Staubbetrieb niedriger sein, wenn nicht böartige Schlacken vorliegen, welche das Mauerwerk des Feuerhauses gegenüber Rostfeuerungen stärker in Mitleidenschaft ziehen.

6. Anpassungsfähigkeit an verschiedene Brennstoffe. Diese ist, wie auf Seite 132 beschrieben wurde, vor allem bei Umstellung auf minderwertige Kohlen bei Rostfeuerungen geringer als bei Staubfeuerungen mit der auf S. 107 gemachten Einschränkung.

7. Betriebssicherheit. Diese wurde, soweit die zentrale Aufbereitungsanlage in Frage kommt, bereits auf Seite 35 f. besprochen. Im Kesselhaus kann der Gesamtbetrieb oder jeder einzelne Kessel bei Unglücksfällen nach Belieben durch Abstellen der Brennstoffzufuhr augenblicklich stillgelegt werden.

8. Die Aussichten der Staubfeuerung bei verschiedenen Brennstoffen:

α) Steinkohle. Wie aus Tafel 11 hervorgeht, ist der Gesamtbrennstoffverbrauch gleichmäßig und voll belasteter Kessel bei guter Kohle und mechanischer Rostfeuerung etwa der gleiche wie bei Staubfeuerung. Die Staubfeuerung lohnt sich daher nur durch einen oder mehrere der folgenden Posten:

1. Bei starken Belastungsschwankungen oder langen Leerlaufperioden. (Spitzenkessel.)
2. Wenn der Kapitaldienst der Gesamtanlage niedriger ist.
3. Bei feinkörnigen und minderwertigen Kohlen. (Billige, anderweitig schlecht verwertbare Brennstoffe; siehe Seite 164.)
4. Wenn mit häufigen, einen ununterbrochenen Betrieb bedrohenden Wechseln der Kohlenart zu rechnen ist.

β) Schlammkohle und Braunkohle. Wie aus Tafel 11 hervorgeht, ist der Gesamtbrennstoffverbrauch gleichmäßig und voll belasteter Kessel bei Staubbetrieb kaum niedriger, als bei Rostfeuerungen. Die Staubfeuerung lohnt sich daher nur durch einen oder mehrere der folgenden Posten:

1. Bei starken Belastungsschwankungen und Leerlaufpausen. (Spitzenkessel.)
2. Wenn der Kapitaldienst der Gesamtanlage niedriger ist.

3. Wenn die Betriebskosten durch weniger Arbeitskräfte oder Verwertung von Abhitze zum Trocknen des Schlammes oder der Rohbraunkohle geringer ausfallen.
4. Wenn man durch höhere Heizflächenbelastungen die Kessel besser ausnutzen kann. (Stilllegung überflüssiger Kessel; keine Anschaffung neuer Kessel.)
5. Wenn durch Trocknung des Brennstoffes auf der Grube Transportersparnisse erzielt werden.

γ) Gegenüber Braunkohlenbrikettfeuerung. Wie auf Seite 39 f. gezeigt wurde, ist der Wärmepreis pro 1 Mill. WE in Staubform bei Grubenaufbereitung der gleiche oder etwas niedriger, bei Werksaufbereitung am Verbrauchsort etwas höher als bei Braunkohlenbriketten.

Bezogen auf den gesamten Rohkohlenaufwand ist das Dampfabbringen gleichmäßig und voll belasteter Kessel laut Tafel 11 etwa 3—8 $\frac{0}{0}$ höher als bei Rostfeuerungen.

Bei Grubenaufbereitung ist daher die Staubfeuerung stets wirtschaftlicher als die Brikettfeuerung. Bei Werksaufbereitung ist die Staubfeuerung nur wirtschaftlicher, wenn die Mehrkosten für Staubherstellung, Feuerungsanlage und Rohkohlentransport durch die Ersparnis infolge besseren Wirkungsgrades aufgewogen werden oder wenn billige, nicht brikettierbare Rohkohle zur Verfügung steht.

f) Zusammenfassung.

Das Anwendungsgebiet der Staubfeuerung läßt sich auf Grund der vorliegenden Erfahrungen mit hinreichender Klarheit umgrenzen und durch die Stichworte kennzeichnen: Feinkörnige und asche-reiche Kohlen (soweit deren Schlacke nicht bösartig ist) einerseits, und Spitzenkessel in Kraftwerken oder Zusatzfeuerungen gasgefeuerter Wasserrohrkessel auf Hüttenwerken andererseits. Weniger Klarheit herrscht bezüglich der günstigsten konstruktiven Ausbildung der Feuerungen; Fragen, wie die der Sekundärluftzuführung¹⁾ oder des bestmöglichen Schutzes der Feuerungswandungen vor Schlackenangriff²⁾ bedürfen noch weiterer Klärung; auch sind die Brenner noch verbesserungsbedürftig; sie müssen vor allem bei leichten Teillasten betriebssicherer sein, als es bisher noch vielfach der Fall ist³⁾ Das Grundsätzliche des Feuerungsbaus ist immerhin richtig erkannt worden und gipfelt vor allem in der Forderung großräumiger Verbrennungskammern⁴⁾. Diese lassen sich Schräg- und Steilrohrkesseln gut einpassen und haben, wie die Anlagen des Oneida- und Lake-

¹⁾ Siehe S. 63. ²⁾ Siehe S. 63, 64, 116. ³⁾ Siehe S. 61. ⁴⁾ Siehe S. 63, 115.

sidekraftwerkes beweisen, zu durchaus betriebsfähigen Kesseleinheiten geführt. Unverkennbar ist ferner die Leichtigkeit, mit der sich Staubfeuerungen in baulicher Hinsicht Doppelsteilrohrkesseln einfügen lassen und mit großen Verbrennungsräumen und langen Flammenwegen geringe Baugrundflächen und günstige Heizflächenbestrahlung verbinden. Die Frage eines Sonderkesseltyps kommt daher gegenüber den obigen Kesselgattungen nicht mehr in Betracht. Anders liegen die Verhältnisse bei Flammrohrkesseln; es muß zum mindesten fraglich erscheinen, ob man mit den Richtlinien, die bei Schräg- und Steilrohrkesseln bisher maßgebend war enund auf den Seiten 62 f. und 113 f. angeführt wurden, auch bei Flammrohrkesseln zum Ziele kommt. Diese sind aber grade für Deutschland wegen ihrer großen Verbreitung von besonderer Wichtigkeit. Unter Würdigung dieser Sachlage ist die Forderung eines Sonderkesseltyps verständlich. Nach Ansicht des Verfassers ist es aber das nächstliegende, zunächst einmal zu versuchen, die Staubfeuerung den vorhandenen Flammrohrkesseln anzupassen, bevor man den umgekehrten Weg beschreitet. Hier liegen wichtige Aufgaben für Feuerungs- und Kesselfirmen. Die Staubfeuerung muß doch in Deutschland im Hinblick auf die z. Zt. herrschenden abnormen Brennstoffverhältnisse beurteilt und nach ihrer Fähigkeit bewertet werden, die jetzige Kohlenknappheit zu mildern. Von tiefeinschneidenden Um- und Neubauten kann daher bei uns vorläufig keine Rede sein. Anders lägen die Verhältnisse schon, wenn die Staubfeuerung als eine Errungenschaft angesehen werden könnte, die ihre Lebensfähigkeit auch über die jetzigen Zustände hinaus bewahrt und wenn sie zu einer dauernden Einrichtung wird, die auch unter günstigeren Brennstoffverhältnissen gegenüber der Rostfeuerung wettbewerbsfähig bleibt. Ob das der Fall sein wird, hängt vor allem von der Schlackenfrage ab. Bei dieser tasten wir aber noch im Dunkeln und müssen uns hüten, auf Erfahrungen mit amerikanischen Kohlen zu sehr zu bauen. Die silikatreiche und kalkarme Asche der deutschen Steinkohlen berechtigt zu einer gewissen Skepsis¹⁾, die erst in dem Maße abzulegen ist, wie praktische Versuche die Brauchbarkeit dieser Kohlen in Staubform erwiesen haben. Günstigere Verhältnisse walten allerdings bei deutschen Braunkohlen ob, deren Schlacken auf Grund ihres Kalkreichtums im allgemeinen gutartiger sind. Im Hinblick auf die möglichen Vorteile der Staubfeuerung kann aber jedenfalls sowohl bei Stein- wie bei Braunkohlen zu Versuchen lebhaft geraten werden. Für Versuchsanlagen sind individuelle Mühlen nach Art der Kofino- oder der Walther Farner-Mühle an-

¹⁾ Siehe S. 13 f.

gebracht. Ist das Versuchsstadium erfolgreich überwunden, so soll man allerdings nicht vergessen, daß die Vorteile der Staubfeuerung am meisten bei Großanlagen in die Erscheinung treten. Für diese wird eine zentrale Aufbereitungsanlage immer das Ideal sein.

II. Staubfeuerungen auf Lokomotiven.

a) Geschichtliches.

Der Einführung von Kohlenstaubfeuerungen auf Lokomotiven haben in Amerika zwei Umstände die Wege geebnet: Die Ölfeuerungen, welche im Südwesten der Vereinigten Staaten vielfache und erfolgreiche Verwendung auf Lokomotiven gefunden haben, und die selbsttätigen Kohlenbeschickungen (automatic stokers), die auf Tausenden amerikanischer Lokomotiven zur Verfeuerung kleinstückiger und griesartiger Kohlen auf Rosten im Betrieb sind. Bei den Ölfeuerungen wird fein zerstäubtes Roh- oder Heizöl an einem Brenner in der teilweise ausgemauerten Lokomotivfeuerkiste verbrannt. Die gute Ausnutzung und Anpassungsfähigkeit der Ölfeuerung an die starken und fortwährend wechselnden Anstrengungen eines Lokomotivkessels ließen es naheliegend erscheinen, die der Ölfeuerung in mancher Hinsicht ähnliche Kohlenstaubfeuerung bei Lokomotiven zu verwenden. Bedenken, die sich gegen die Förderung und Speisung des Kohlenstaubes vom Tender zur Feuerkiste erhoben, wurden in dem Maße zerstreut, wie man erkannte, daß die oben erwähnten selbsttätigen Kohlenbeschickungen durchaus brauchbare betriebssichere Maschinen darstellten. Diese sind denn auch auf die maschinelle Durchbildung der Lokomotivkohlenstaubfeuerungen in Amerika nicht ohne Einfluß geblieben¹⁾.

Sieht man von einem etwa 18 Jahre zurückliegenden Versuche der Manhattan Elevated Railroad ab, der auf einer Lokomotive angestellt wurde und wegen ungenügender Mahlfeinheit fehlschlug, so kann man von den ersten unter regelrechten Betriebsverhältnissen arbeitenden Lokomotiv-Kohlenstaubfeuerungen in Amerika erst seit 1914 reden. In diesem Jahre setzte die New York Central Railroad eine ihrer großen 1-D-O-Güterzuglokomotiven mit Kohlenstaubfeuerung in Betrieb. Bald folgte eine 2-B-1-Schnellzuglokomotive der Chicago & North-Western Railroad, sowie einzelne Lokomotiven der Atchison Topeka & Santa Fé Railroad, der Delaware & Hudson Railroad, der Missouri Kansas & Texas Railroad, der Lehigh

¹⁾ Journal of the Am. Soc. of Mech. Eng., Okt. 1914, S. 370.

Valley Railroad und der Fuller Engineering Company. Auf allen diesen Lokomotiven war die Kohlenstaubfeuerung zunächst als Versuch gedacht. Leider war der Krieg derartigen Experimenten ungünstig und hat die Entwicklung der Kohlenstaubfeuerung sehr gehemmt. Die erste, in großem Maßstab geplante Umstellung von 250 ihrer Lokomotiven auf Kohlenstaub haben die Staatsbahnen von Brasilien ins Auge gefaßt, wo z. Zt. etwa 30 Lokomotiven mit Kohlenstaubfeuerung amerikanischer Herkunft in Betrieb sind bzw. genommen werden sollen. Anlaß zu dieser Umstellung war der Wunsch, sich von der teuern englischen Kohle unabhängig zu machen und die eigenen, minderwertigen und für Rostfeuerungen wenig geeigneten Kohlen für die Eisenbahnen heranzuziehen. Ähnliche Verhältnisse griffen in Schweden Platz, wo seit einigen Jahren eine Anzahl von Lokomotiven mit Torfstaub gefeuert werden. Auch die italienische Staatsbahn läßt auf zwei großen Güterzuglokomotiven amerikanische Kohlenstaubfeuerungen einbauen, um festzustellen, ob nicht die einheimischen Braunkohlen auf diese Weise verwendet werden können. Ferner werden drei Lokomotiven der Holländischen Staatsbahnen Kohlenstaubfeuerungen erhalten, in denen minderwertige Limburger Steinkohle verarbeitet werden soll¹⁾. In England ist eine Güterzuglokomotive der Great Central Railway auf Kohlenstaubfeuerung umgestellt worden²⁾.

b) Die Ausführungen von Staubfeuerungen auf Lokomotiven.

Den meisten zurzeit vorliegenden Ausführungen liegen die folgenden Leitgedanken zugrunde: Der Kohlenstaub bzw. Torfstaub wird in ortsfesten Anlagen hergestellt, die sich zweckmäßig an einem oder beiden Enden der Strecke befinden, und wird mittels eines Schlauches in den auf dem Tender befindlichen Behälter eingefüllt. Die Kohlenstaubfeuerungsanlage muß sich ohne zeitraubende und kostspielige Werkstattarbeiten in Lokomotiven normaler Konstruktion einbauen lassen und die Auswechselbarkeit ihrer einzelnen Bestandteile zwischen Lokomotiven verschiedener Größe und Gattung tunlichst ermöglichen. Führer und Heizerstand sind von Ausrüstungsteilen möglichst freizuhalten. Die Regulierung von Luft- und Brennstoff soll vom Heizerstand aus erfolgen. Die Einbauten feuerfester Steine dürfen die Inspektion der Feuerkiste nicht erschweren.

Abb. 61 zeigt die Anordnung einer Kohlenstaubfeuerung der „Locomotive Pulverized Fuel Co.“ (jetzt „Combustion Engineering Corporation“). Der Kohlenstaub wird an der Endstation durch die

¹⁾ Nach Mitteilung der Fuller Engineering Company.

²⁾ The Engineer, 25. April 1919.

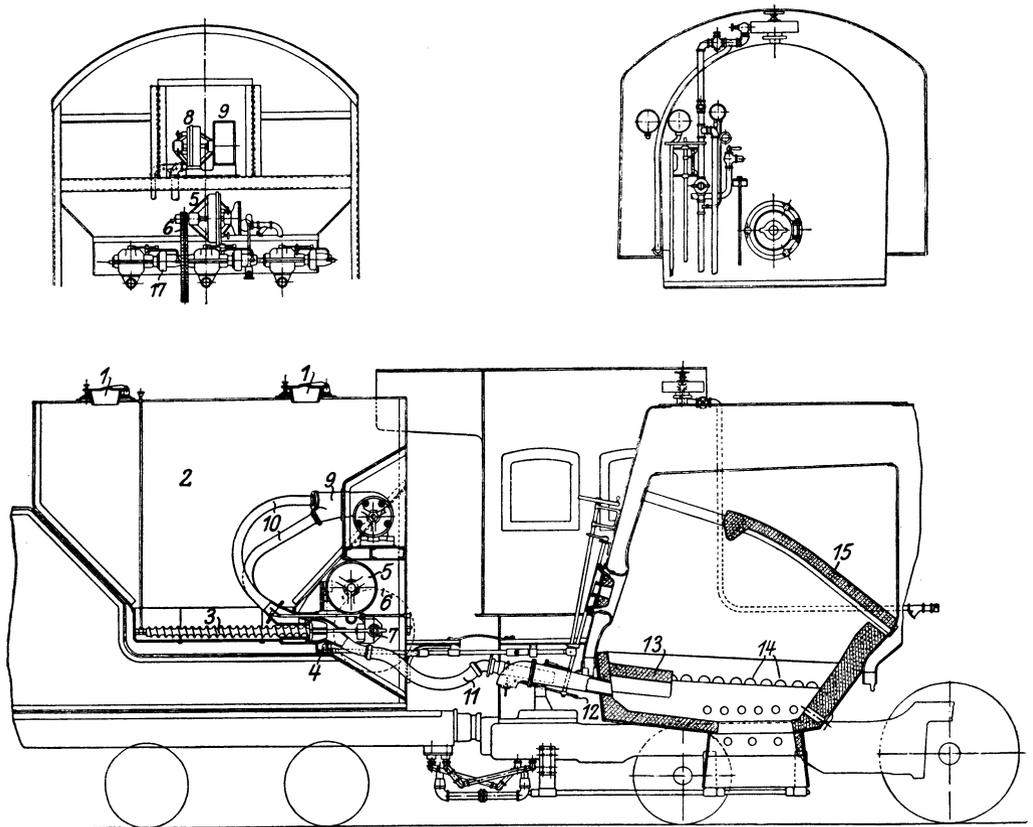


Abb. 61. Lopulco-Staubfeuerung einer Lokomotive.

Klappen 1 in den Behälter 2 eingeführt und gelangt mit Hilfe von drei Förderschnecken 3 zu drei Mischkammern 4. Die Schnecken werden von der Dampfturbine 5 über das Vorgelege 6 und die Querschwelle 7 angetrieben. Der von Dampfturbine 8 angetriebene Ventilator 9 bläst die Primärluft mit 90 mm W. S. (statisch) durch die Leitungen 10 zu den Mischkammern 4. In diesen befindet sich zwecks guter Durchmischung je ein Flügelrad; der Kohlenstaub wird von der Primärluft in der Schwebe durch drei Schläuche 11 den Brennern 12 zugeführt (siehe auch Abb. 27). Die Feuerkiste ist ähnlich wie bei Ölfeuerungen in ihrem unteren Teil mit feuerfesten Steinen und einem Zündgewölbe 13 ausgerüstet. Sekundärluft tritt durch die Öffnungen 14 ein. 15 ist die in Amerika bei allen größeren Lokomotiven übliche Feuerbrücke. Soll der kalte Kessel angeheizt werden, so werden die Turbinen 8 und 5 an die Dampfleitung des Lokomotivschuppens angeschlossen. Sobald der Ventilator einen hin-

reichenden Primärluftstrom erzeugt, werden durch Einrücken der Kupplungen 17 die Förderschnecken in Tätigkeit gesetzt. Das am Brenner austretende Kohlenstaub-Luftgemisch wird mit einem ölgetränkten Bündel Putzwolle zur Entzündung gebracht. Nach Erreichung eines gewissen Dampfdruckes im Kessel werden die Turbinen 5 und 8 auf diesen umgeschaltet. Ventilator 9 läuft mit konstanter Tourenzahl, während die Umdrehungen der Förderschnecken je nach Brennstoffbedarf veränderlich sein müssen.

Abb. 62 zeigt einen Entwurf, der insofern eine Verbesserung darstellt, als man zum Antrieb der Förderschnecken vom Turbinen- zum Dampfmaschinenbetrieb übergegangen ist¹⁾. Dampfmaschinen

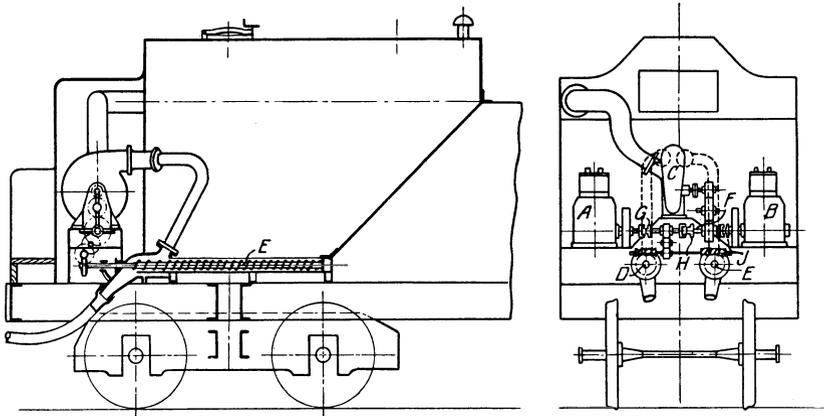


Abb. 62. Tendarausrüstung einer staubgefeuerten Lokomotive.

haben nicht nur einen weiteren Tourenreglungsbereich, sondern springen auch bei niedrigeren Dampfdrücken an als Turbinen. Das kann dann von Vorteil sein, wenn beim Anheizen im Schuppen nur Dampf von niedrigem Druck zur Verfügung steht. Von zwei gleichen Zweizylinderdampfmaschinen *A* und *B* treibt *B* den Ventilator *C* an, während *A* die Förderschnecken *D* und *E* in Umdrehung versetzt. Die Welle *F* ist durch drei Kupplungen *G*, *H*, *J* unterteilt, die bezwecken, daß eine der beiden Dampfmaschinen Ventilator und Förderschnecken gleichzeitig antreiben kann, wenn die andere außer Ordnung gerät. Man erhält durch diese Anordnung also erhöhte Betriebssicherheit.

Bei Abb. 63 dient als Antrieb der Förderschnecken wiederum eine Zweizylinderdampfmaschine, während für den Ventilator eine Dampfturbine beibehalten wurde. Die Tourenzahl der Dampfmaschine wird im Verhältnis 1: 3,5 mittels eines vom Heizerstand kontrollierten Regulators geregelt. Diese Anordnung wird unter anderem auf zwei

¹⁾ Great Central Railway of England.

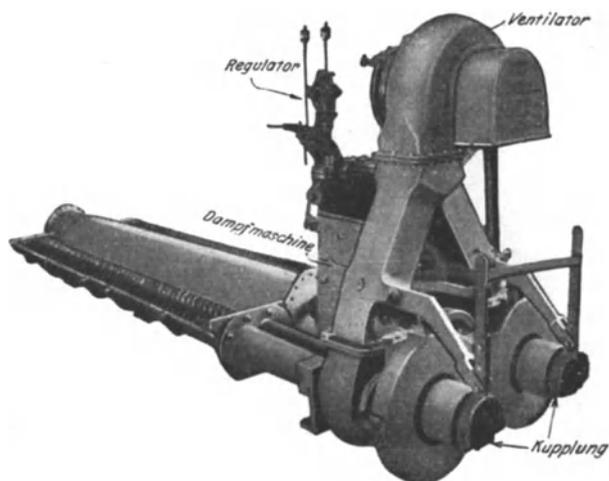
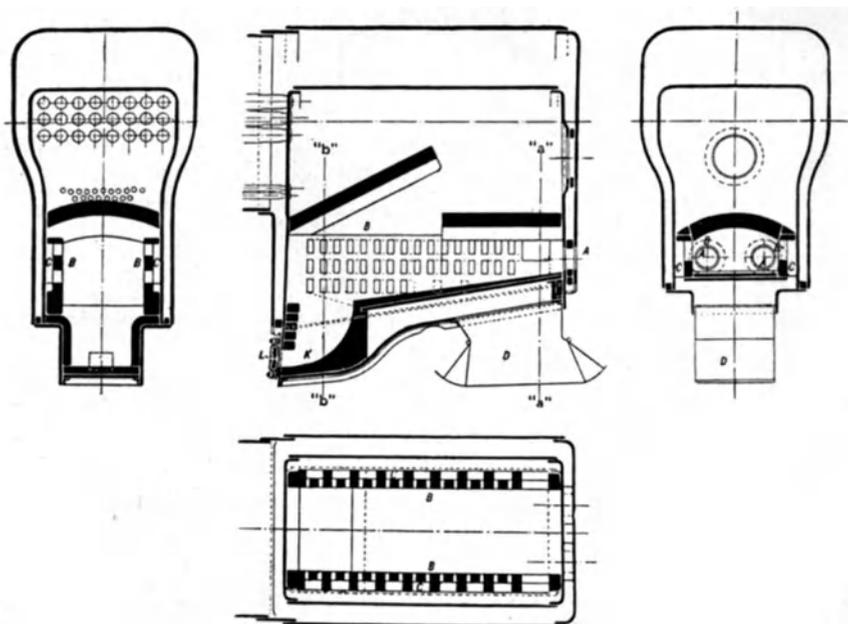


Abb. 63. Tendrausrüstung der Fuller Engineering Co.

Abb. 64. Feuerkiste für Staubfeuerung¹⁾.

Lokomotiven der Italienischen Staatsbahnen zur Verfeuerung von Braunkohlenstaub benutzt²⁾.

¹⁾ The Engineer, 25. April 1919.

²⁾ Nach Angaben der Fuller Engineering Co. ist die zu befahrende Strecke von Rom nach Viterbo 80 km lang. Die Analysen der zu verwendenden Braunkohlen lauten vor der Trocknung:

Die Ausmauerung der Feuerkiste auf einer Güterzuglokomotive der Great Central Railway in England läßt sich aus Abb. 64 erkennen. Beachtenswert sind der Schlackenabzug *K* und die Art der Sekundärluftzuführung.

Die Torfstaubfeuerung auf den Lokomotiven der Schwedischen Staatsbahnen¹⁾ ist auf Abb. 65 gezeigt. Aus dem trichterförmigen, geschlossenen Torfstaubbehälter wird durch die Ejektorwirkung der Druckluft, die unten durch ein Regulierventil nach Art von Abb. 16 eintritt, eine gewisse Menge Torfstaub zum Brenner befördert. Die Feuerbüchse hat eine ziemlich komplizierte Ausmauerung und ist mit einem Hilfsrost für Steinkohlenfeuerung versehen. Diese ist offenbar für eine sichere Zündung erforderlich, worauf auch die geringe Mahlfeinheit des Mahlstaubes hindeutet.

Steinkohlenfeuerung versehen. Diese ist offenbar für eine sichere Zündung erforderlich, worauf auch die geringe Mahlfeinheit des Mahlstaubes hindeutet.

Feuchtigkeit 12,5—26,8%,
Flüchtige Bestandteile 31,5
bis 60%, Asche 11,6—62%,
Heizwert (oberer) 2020 bis
5800 WE. Tenderkohlen-
staubraum 10 cbm.

¹⁾ Feuerungstechnik, 1.
Jan. 1920, S. 53 f.

Bleibtreu, Kohlenstaubfeuerungen.

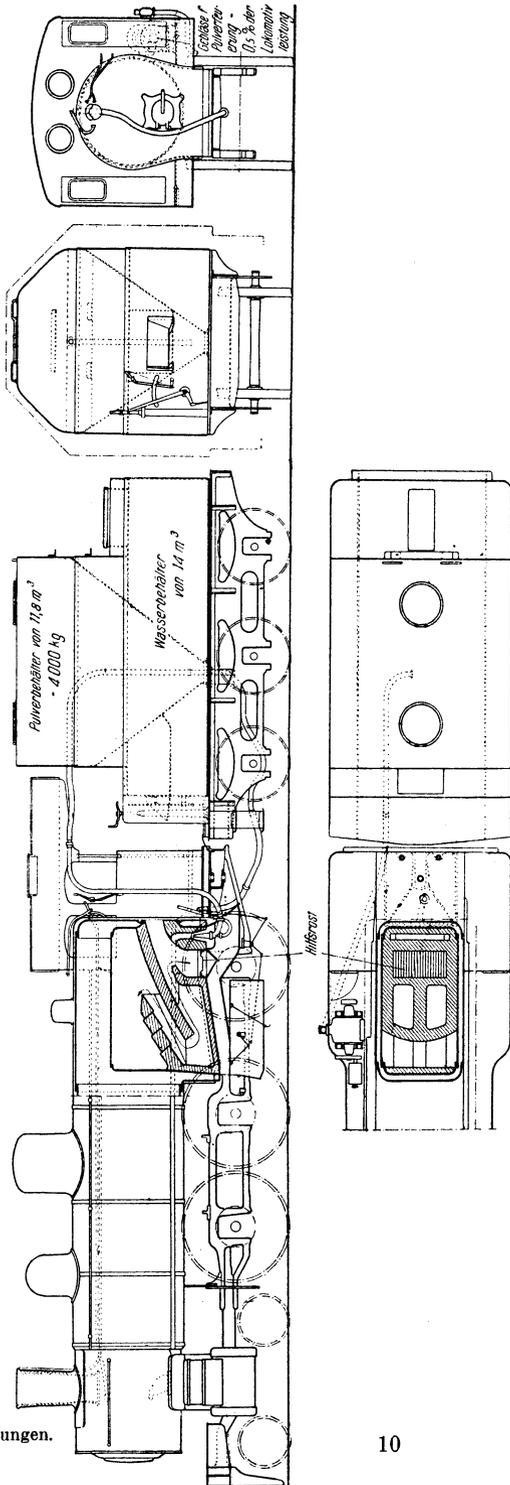


Abb. 65. Torfstaubgefeuerte Lokomotive der Schwedischen Staatsbahnen¹⁾.

c) Versuche und Betriebsergebnisse mit Staubfeuerungen auf Lokomotiven.

1. Versuche der Delaware & Hudson Railroad¹⁾.

Zur Verwendung kamen verschiedene Mischungen von Anthrazitabfall (siehe S. 163) von Schutthalden mit bituminöser Steinkohle. Die besten Resultate ergab eine Mischung von 60⁰/₀ Anthrazitabfall mit 40⁰/₀ bituminöser Kohle. Die Analyse dieser gemahlene Mischung lautet wie folgt:

Feuchtigkeit	rd. 0,5 ⁰ / ₀
Flüchtige Bestandteile	rd. 15—20 ⁰ / ₀
Fixer Kohlenstoff	rd. 69—64 ⁰ / ₀
Asche	rd. 14 ⁰ / ₀
Schwefel	1,4 ⁰ / ₀
Heizwert	rd. 7000 WE/kg
Mahlfeinheit	8 ⁰ / ₀ —25 ⁰ / ₀ Rückstand auf 6200 er Sieb.

Bei Verwendung von Anthrazitabfall ohne Beimengung von bituminöser Kohle ließ sich ein einwandfreier Betrieb nicht aufrechterhalten, weil bei starkem Exhaust die Flamme ausgeblasen wurde und schwer wieder zu entzünden war. Die Versuche sind insofern interessant, als sie einen Weg zeigen, Anthrazitabfälle zu verwenden, und weil sie beweisen, daß ein Brennstoff mit 15 bis 20⁰/₀ flüchtiger Bestandteile im Lokomotivbetrieb verwendet werden kann. Es ist daraus der bedeutsame Schluß zu ziehen, daß sich auch Halbkoks, dessen flüchtige Bestandteile rd. 15⁰/₀ betragen, auf Lokomotiven ohne Zusatz gasreicher Kohle verfeuern lassen wird.

2. Versuche der Chicago & North Western Railway²⁾.

Zu einem vergleichenden Versuche zwischen handbeschickter Rostfeuerung und Kohlenstaubfeuerung wurden zwei Schnellzuglokomotiven vom 2-B-1-Typ mit weiten Feuerkisten herangezogen. Beide Lokomotiven waren zu gleicher Zeit gebaut und gleicher Konstruktion. Die mit Rostfeuerung versehene war jedoch in etwas besserem Zustande als die mit Kohlenstaubfeuerung ausgerüstete Lokomotive. Verschiedene Kohlenarten wurden bei den Versuchen verwandt, nämlich bituminöse Steinkohle aus dem Staate Illinois, bituminöse Steinkohle aus dem Staate Kentucky und lignitische Kohle aus dem Staate North Dakota.

¹⁾ Harvey, Pulverized Coal Systems in America, London 1919, S. 44. Pulv. Fuel, Comm. of Conservation, Ottawa, Can., 1920, S. 52.

²⁾ Herington, Powdered Coal as a Fuel, New York 1920, S. 173 f.

Versuch mit bituminöser Steinkohle aus Illinois. Zur Verwendung kam ungewaschener Grieß; die Analyse der gemahlten Kohle lautet:

Feuchtigkeit	3,18—15,36 ‰
Flüchtige Bestandteile	rd. 34 ‰
Fixer Kohlenstoff	rd. 47 ‰
Asche	rd. 10 ‰
Schwefel	rd. 1,7 ‰
Heizwert (oberer)	5960—6900 WE/kg
Mahlfeinheit	9—0 ‰ Rückstand auf 1650er Sieb, 28—3 ‰ " " 6200er "

Der Gehalt der Kohle an Eisenpyriten führte zu der auf S. 13 beschriebenen Bildung von „Schwalbennestern“ vor den Heizröhren. Nach einer Fahrt von 120 bis 130 km trat ein Sinken des Dampfdruckes und nach 160 km sogar Dampfangel ein. Der Versuch muß daher als erfolglos angesehen werden.

Versuch mit bituminöser Steinkohle aus Kentucky. Zur Verwendung kam ungewaschener Grieß; die Analyse der gemahlten Kohle lautet:

Feuchtigkeit	1,9—2,8 ‰
Flüchtige Bestandteile	36 ‰
Fixer Kohlenstoff	54 ‰
Asche	8 ‰
Schwefel	0,79 ‰
Heizwert (oberer)	7750 WE/kg
Mahlfeinheit	7 ‰ Rückstand auf 1650er Sieb, 17 ‰ " " 6200er "

Die Versuche mit dieser hochwertigen Kohle konnten ohne nennenswerte Schwierigkeiten durchgeführt werden. „Schwalbennester“ traten nicht ein. Die im Aschekasten angetroffene Schlacke war so gering, daß die Lokomotive erst nach Rückkehr zum Ausgangspunkt, d. h. nach etwa 275 km über die Schlackenrube gefahren zu werden brauchte. Die wesentlichsten Ergebnisse des vergleichenden Versuches sind auf Tafel 12 zusammengestellt¹⁾.

Die niedrige mittlere Rostanstrengung zeigt, daß die Lokomotiven leicht belastet waren. Einen Rückschluß auf die Überlastungsfähigkeit bei Staubbetrieb lassen die obigen Daten daher nicht zu; sie sind überhaupt mit Vorsicht aufzunehmen, weil sie aus zwei Einzelversuchen stammen und keine Durchschnittswerte sind. Wenn man schon bei der Beurteilung von ortsfesten Dampfkesseln die aus einer

¹⁾ Pulverized Fuel, Commission of Conservation, Ottawa, Can. 1919, S. 50/51.

Zahlentafel 12.

Vergleichender Versuch auf Lokomotive D127 mit handbeschiekter Rostfeuerung und D128 mit „Copulco“-Kohlenstaubfeuerung auf der Strecke Chicago Ill.—Milwaukee, Wis. und zurück.

		Hand- feuerung	Kohlenstaub- feuerung
1. Lokomotive in Dienst	Std.	4,09	4,03
2. „ „ Fahrt	Std.	3,97	3,87
3. Außentemperatur	°C	11	6,6
4. Chicago—Milwaukee—Chicago	km	rd. 275	rd. 275
5. Mittlere Stundengeschwindigkeit	km/Std.	69,3	71,3
6. Kohlenverbrauch auf der Strecke	t	3,43	3,46
7. Stündlicher Kohlenverbrauch	t	0,864	0,895
8. Wasserverbrauch	cbm	27,82	31,72
9. Rohe Verdampfungsziffer		8,1	9,15
10. Reduzierte Verdampfungsziffer ¹⁾		?	9,3
11. Hintertender gemessene mittlere Zugkraft	kg	1146	1230
12. Mittlere Leistung, hinter dem Tender gemessen	PS	294	322
13. Kohle zum Anheizen, Rangieren und während Warteperioden vor und nach der Fahrt . . . t	t	2,52	1,42
14. Desgleichen	%	100	56,4
15. Gesamter Kohlenverbrauch	t	5,95	4,88
16. Desgleichen	%	100	82
17. Mittlere Rostanstrengung	kg/qm × Std.	190	—

Anzahl von Versuchen ermittelten Durchschnittswerte benötigt, so gilt das in verstärktem Maße bei Lokomotivkesseln, die schwer zu beobachtenden Unregelmäßigkeiten, wie Löchern in der Brennstoffschicht oder Undichtigkeiten der Heizrohre oder Überhitzereinheiten in ungleich höherem Grade als ortsfeste Kessel ausgesetzt sind. Immerhin können die obigen Daten als Anhalt dienen. Bemerkenswert scheint die höhere Verdampfungsziffer der kohlenstaubgefeuerten Lokomotive, was auf höhere Flammentemperaturen und niedrigeren Luftüberschuß zurückzuführen wäre. Am augenfälligsten ist die Kohlenersparnis in den Stillstandperioden. Von der kohlenstaubgefeuerten Lokomotive wird berichtet, daß sie 20 Minuten vor der Station liegen konnte, ohne Kohlenstaub zu verbrennen, und daß dieser erst 5 Minuten vor Abgang des Zuges angestellt wurde.

Über die Verbrennung auf der kohlenstaubgefeuerten Lokomotive geben die folgenden, aus Mitteilungen von Mühlfeld²⁾ entnommenen Daten Auskunft. Um einen Anhalt für den Anstrengungsgrad oder die Belastung des Kessels zu geben, wurde die äquivalente Rostanstrengung beigefügt; ferner ist aus der Rauchgasanalyse der Luftüberschuß berechnet worden.

¹⁾ Bezogen auf Wasser von 0° und Dampf von 100° C = 639,7 WE/kg.

²⁾ Herington, Powdered Coal as a Fuel, New York 1920, S. 173 und 175.

Zahlentafel 13.

Kohlenstaub in kg pro Stde. (Dauerlast)	Äquivalente Rostanstrengung kg/qm \times Stde.	CO ₂ %	CO %	O %	Luft- überschuß
1394	306	14,5	0,0	4,5	1,26
1590	348	15,2	0,0	2,8	1,15
1787	392	15,2	0,0	4,0	1,23
1818	399	16,4	0,4	2,6	1,13

Die der Feuerkiste zugeführten Kohlenstaubmengen entsprechen Rostanstrengungen zwischen 300 und 400 kg pro Quadratmeter und Stunde; diese treten bei amerikanischer bituminöser Steinkohle und Rostfeuerung bei leichter bis mittelschwerer Vollast ein, ohne daß ein so niedriger Luftüberschuß oder ein so hoher Kohlensäuregehalt wie oben erzielt werden dürfte. Die Werte aus Tafel 13 lassen erkennen, daß auch bei Vollast sehr günstige Verbrennungsverhältnisse in der Kohlenstaubfeuerung obwalten. Wahrscheinlich könnte der Kessel bei leidlich vollkommener Verbrennung erheblich weiter forciert werden, wenn nicht das Mauerwerk der Verbrennungskammer unter den hohen Temperaturen zu sehr leiden würde. In der Regel wird man über einen Kohlensäuregehalt von 15 bis 16 % bei Dauerbetrieb nicht gehen können¹⁾. Man würde also bei der in Frage stehenden Lokomotive und einer Rostanstrengung über 400 kg/qm und Stunde mit größerem Luftüberschuß arbeiten und damit einen wesentlichen Vorteil der Kohlenstaubfeuerung zum mindesten teilweise opfern müssen.

Versuch mit lignitischer Kohle aus North Dakota. Die Analyse der gemahlene Kohle lautet:

Feuchtigkeit	1,8 %
Flüchtige Bestandteile . .	47,25 %
Fixer Kohlenstoff :	40,91 %
Asche	9,32 %
Schwefel	0,72 %
Heizwert	6100 WE/kg
Mahlfeinheit	2 % Rückstand auf 1650 er Sieb,
	4 % " " 6200 er "

Nach Literaturangaben (Railway Age Gazette, 11. August 1916) sollen die Versuche mit dieser lignitischen Kohle durchaus befriedigend gewesen sein.

Es war die Absicht der Eisenbahngesellschaft, die Versuche auch auf die Verschiebelokomotiven im Weichbild von Chicago auszudehnen,

¹⁾ The Blast Furnace & Steel Plannt, Sept. 1920, S. 529.

weil man sich nicht nur wegen der langen Stillstandsperioden, sondern auch wegen der bei Kohlenstaubfeuerung möglichen, fast rauchfreien Verbrennung Vorteile versprach. Die durch den Krieg geschaffene Lage machte jedoch weitere Versuche unmöglich.

3. Versuche der Atchison, Topeka & Santa Fé Railroad.

Zu einem vergleichenden Versuche zwischen Rostfeuerung und Kohlenstaubfeuerung wurden zwei gleichartige Güterzuglokomotiven von 1-D-1-Typ ausgewählt. Zur Verwendung kam die in Abb. 61 dargestellte „Copulco“-Anordnung. Die Versuche fanden von Mai 1917 bis Juli 1918 auf der 181 km langen Strecke Fort Madison, Ia.-Marceline, Mo. statt. Die Aufbereitungsanlagen befinden sich an diesen Endstationen. Die zur Verwendung gekommene, gemahlene bituminöse Kohle hat folgende Analyse¹⁾:

Feuchtigkeit	1,5 ⁰ / ₀
Flüchtige Bestandteile	32,67 ⁰ / ₀
Fixer Kohlenstoff	51,57 ⁰ / ₀
Asche	14,71 ⁰ / ₀
Schwefel	3,95 ⁰ / ₀
Heizwert	rd 6700 WE/kg
Mahlfeinheit	2 ⁰ / ₀ Rückstand auf 1650er Sieb, 17 ⁰ / ₀ „ „ 6200er „ ¹⁾ .

Zahlentafel 14.

	Handfeuerung	Kohlenstaubfeuerung
1. Länge der Strecke km	181	181
2. Lokomotive auf Strecke Std.	6,7	6,6
3. „ in Fahrt „	5,29	5,35
4. Gewicht des Zuges hinter Tender t	ca. 1900	ca. 1850
5. Anzahl der Wagen	65	63
6. Kesseldruck at Ü	ca. 13	ca. 13
7. Verbrauchte Kohlenmenge insgesamt . . kg	13 828	10 474
8. „ Wassermenge „	72 789	73 007
9. Zug in Feuerkiste mmWS	61	33
10. „ „ Rauchkammer „	185	297
11. Rauchkammertemperatur °C	300	292
12. Überhitzung „	97,3	121,5
13. Rohe Verdampfungsziffer	5,28	6,97
14. Reduzierte Verdampfungsziffer ²⁾	5,84	7,89
15. Wirkungsgrad des Kessels %	53,3	66,2
16. „ „ „ und Überhitzers %	59,7	75,3
17. Mittlere äquival. Rostanstrengung kg/qm × Std.	—	ca. 350
18. Brennstoffersparnis gegenüber Handfeuerung	—	24,2 ⁰ / ₀

¹⁾ Journ. of the Am. Soc. of Mech. Eng., Okt. 1914.

²⁾ Bezogen auf 0° Wasser und 100° Dampf = 639,7 WE/kg.

Die Versuche wurden von der Eisenbahngesellschaft in außerordentlich sorgfältiger Weise zu dem Zwecke durchgeführt, die Verwendungsmöglichkeiten minderwertiger bituminöser Steinkohlen und lignitischer Kohlen zu prüfen. Die im folgenden gemachten Angaben gründen sich auf Mitteilungen, die der Verfasser dem Leiter der Versuche, Mr. H. B. Mac-Farland, verdankt und die mit dessen Erlaubnis im Auszuge wiedergegeben sind. Tafel 14 zeigt die wichtigsten Daten, die aus Versuchsergebnissen von je 18 unter normalen Betriebsverhältnissen durchgeführten Rundreisen einer kohlenstaub- und handgefeuerten Lokomotive ausgewertet wurden.

Die mittlere äquivalente Rostanstrengung von ca. 350 kg pro Quadratmeter und Stunde entspricht einer mittelschweren, aber nicht forcierten Beanspruchung von Feuerung und Kessel. Zum Vergleich sei eingeschoben, daß auf deutschen Vollbahnlokomotiven eine Rostanstrengung von 400 kg pro Quadratmeter und Stunde als maximale Dauerbelastung der Kesselfeuerung anzusehen ist. Die Verbrennung muß im Falle von Kohlenstaub als recht günstig angesehen werden, was aus der um etwa 30% höheren Verdampfung und dem besseren Kesselwirkungsgrad hervorgeht. Die höhere Überhitzung bei annähernd gleicher Rauchkammertemperatur deutet auf den besseren Wärmeübergang infolge geringeren Luftüberschusses hin; der letztere geht ferner aus dem niedrigeren Zug in der Feuerkiste hervor. Umso auffallender ist es daher, daß der Rauchkammerzug bei Kohlenstaubbetrieb bedeutend höher liegt als bei Handfeuerung. Diese Erscheinung findet ihre Erklärung in der Bildung von „Schwalbennestern“, die sich in der auf S. 13 beschriebenen Weise bei asche- und schwefelreichen Kohlen in der Feuerkiste vor den Rauchröhren ansetzen und diese überkleben. Bei den vorliegenden Versuchen wurde für periodische Entfernung der „Schwalbennester“ mittels eines Preßluftstrahles gesorgt; dies konnte geschehen, während die Lokomotive Wasser nahm. Trotzdem werden die „Schwalbennester“ als die bedenklichste Nebenerscheinung bei Kohlenstaubbetrieb bezeichnet; sie traten bei der obigen asche- und schwefelreichen bituminösen Kohle hartnäckiger auf als bei hochwertigem Lignit, der außerdem fast gar keine Schlacke bildete.

Die Ausmauerung der Verbrennungskammer erforderte häufige Ausbesserungsarbeiten. Im Durchschnitt mußten nach jeder Rundfahrt 16 Steine im Kammergewölbe und der Feuerbrücke und im ganzen 34 Steine in der Feuerkiste ersetzt werden. Unter 18 Rundreisen waren nur 8, nach welchen keine Steine zu erneuern waren. Die Steine der Feuerbrücke überdauerten nicht mehr als durchschnittlich 3 Rundreisen. Die Ausbesserungsarbeiten nahmen daher mehr Zeit in Anspruch als bei der handgefeuerten Lokomotive, wo-

bei die langsamere Abkühlung der Verbrennungskammer der Kohlenstaubfeuerung einen weiteren Zeitverlust verursachte.

Die Wirkungsweise der Brenner wird als nicht unbedingt zuverlässig bezeichnet und die Vermutung ausgesprochen, daß die günstigste Anordnung der Brenner und der Ausmauerung in der Feuerkiste noch nicht gefunden und erst festzustellen sei.

4. Versuche der Schwedischen Staatsbahnen.

Die Versuche wurden auf der Strecke Hallsberg-Mjölby (rd. 97 km) mit zwei Lokomotiven gleichen Typs ausgeführt, von denen die eine mit einer Torfstaubfeuerung nach Abb. 65 ausgerüstet wurde, während die andere Kohle auf Rosten verbrannte. Die Analyse der verwendeten Brennstoffe lautet wie folgt:

	Torfstaub	Kohle
Kohlenstoff	47 ⁰ / ₀	73,5 ⁰ / ₀
Sauerstoff	29,5 ⁰ / ₀	4,4 ⁰ / ₀
Wasserstoff	4,5 ⁰ / ₀	8,6 ⁰ / ₀
Schwefel	0,5 ⁰ / ₀	1,5 ⁰ / ₀
Stickstoff	1,1 ⁰ / ₀	1,2 ⁰ / ₀
Asche	3,2 ⁰ / ₀	6,2 ⁰ / ₀
Wasser	14,2 ⁰ / ₀	4,2 ⁰ / ₀
Heizwert	4400 WE/kg	7250 WE/kg ¹⁾ .

Zahlen-
Versuche der

Brennstoff	Fahrt	Richtung	Gewicht in Tonnen		Achsenzah	Durchschnittliche Geschwindigkeit km/Std.	Verbrauch in Kilogramm			Dampfdruck at
			Lokomotive, Tender und Wagen	Wagen			Wasser	Kohle	Torfstaub	
Torfstaub	I	H—M	787	700	78	29,2	12600	80	2712	12,1
		M—H					9600	68	2277	
Kohle	II	H—M	782	700	78	27,5	12550	1855	—	11,5
		M—H					9350	1351	—	
Kohle	III	H—M	782	700	78	28,7	13300	2021	—	11,6
		M—H					11000	1609	—	
Torfstaub	IV	H—M	787	700	78	27,0	13250	87	2947	11,9
		M—H					11750	76	2550	
Torfstaub	V	H—M	387	300	40	42,3	9400	61	2016	11,8
		M—H					8700	58	1940	
Kohle	VI	H—M	382	300	40	41,7	8900	1312	—	11,5
		M—H					7800	1067	—	

¹⁾ Pulverized Fuel, Commission of Conservation, Ottawa, Can., 1919, S. 54 f

Aus Tafel 15 geht hervor, daß die Überhitzung des Dampfes bei Torfstaubbetrieb höher als bei Rostfeuerung ist (s. auch Versuch 3). Dies erklärt sich aus der längeren Flamme und den höheren Flammentemperaturen bei Torfstaubfeuerung. Bei dieser wurde die Temperatur während eines Versuches zu 1670° errechnet, während sie für die Kohlenrostfeuerung mit 1510° angegeben wird¹⁾. Die Tatsache, daß sich trotz niedrigeren Heizwertes mit Torfstaub höhere Temperaturen als mit Stückkohle erreichen ließen, deutet wieder auf den niedrigeren Luftüberschuß und die schnellere Verbrennung der Staubfeuerung hin. Die in der Tafel angegebenen reduzierten Verdampfungsziffern wurden unter Zugrundelegung einer Verdampfung von 0° auf Dampf von $100^{\circ} = 639,7$ WE/kg und eines Heizwertes von 4300 WE/kg für Torfstaub und 7000 WE/kg für Kohle berechnet. Bei der kohle-gefeuerten Lokomotive wurde die Tatsache, daß sie neu war und eine über dem Durchschnitt liegende Verdampfungsziffer ergab, durch einen Korrektionsfaktor = $1,054$ berücksichtigt. Die Versuche zeigen, daß zur Erzeugung der gleichen Dampfmenge $7,08 : 4,89 = 1,45$ kg Torfstaub gegen 1 kg Kohle nötig ist. Der Kesselwirkungsgrad ist daher bei Torfstaubfeuerung $\frac{4,89 \cdot 7000}{7,08 \cdot 4300} = 1,12$ oder 12% besser als bei

afel 15.

chwedischen Staatsbahnen.

Dampf- temperatur °C	Wärmeinhalt des Dampfes	Rauchkammer- temperatur °C	Zug in mm/W.S.		Heizwert		Verdampfungsziffer				Wirkungsgrad des Kessels
			Feuerkiste	Rauch- kammer	Torfstaub	Kohle	roh		reduziert		
							Torstaub	Kohle	Torstaub	Kohle	
332	740	255	20	86	4340	—	4,25	—	4,88	—	0,73
293	719	290	14	47	—	7180	—	6,83	—	7,11	0,65
300	723	312	22	60	—	7380	—	6,7	—	6,8	0,62
336	742	294	—	—	4380	—	4,35	—	4,95	—	0,74
331	740	289	15	101	4490	—	4,38	—	4,85	—	0,72
298	722	268	16	52	—	7160	—	7,0	—	7,34	0,67
							Durchschnitt: 4,89 7,08				

¹⁾ Torfwirtschaft, 5. Jan. 1921, S. 9.

Stückkohlenfeuerung. Ein Vorrat von 4 t Torfstaub auf dem Tender reicht bei einem Güterzuge von 650 t oder einem Personenzuge von 300 t hinter dem Tender etwa 100 bzw. 130 km.

Gerügt wird die Flugstaubbelastigung, die zu einer Vermehrung der Augenzündungen des Bahnpersonals geführt hat¹⁾.

d) Bewertung der Staubfeuerung für Lokomotiven.

1. Brennstoffersparnis gegenüber Rostbetrieb. Die Versuche amerikanischer Eisenbahnen und der schwedischen Staatsbahnen haben nicht nur die thermische Überlegenheit der Kohlenstaubfeuerung über die Rostfeuerung erwiesen, sondern sie haben auch die Möglichkeit dargetan, minderwertige, auf Rosten schlecht verwendbare Brennstoffe, wie lignitische Kohle und Torf, mit guten Wirkungsgraden und voller, normaler Kesselleistung befeuern zu können. Vergleichende Dauerversuche ergaben bei Staubfeuerungen höhere Verdampfungsziffern und Kesselwirkungsgrade, sowie eine Brennstoffersparnis, die nach Abzug der für Trocknung und Mahlung nötigen Kohle auf etwa 15⁰/₀ bei Steinkohle veranschlagt werden dürfte.

Es wurde oben (Seite 135 ff.) festgestellt, daß die Kohlenstaubfeuerung bei modernen, ortsfesten Kesseln — von gewissen minderwertigen Brennstoffen abgesehen — gegenüber der modernen, selbsttätigen Rostfeuerung keine beträchtliche Brennstoffersparnis erzielt. Bei Lokomotiven liegen die Verhältnisse für die thermische Beurteilung der Staubfeuerung günstiger. Der Einwand, daß sich auch auf Lokomotiven selbsttätige Rostfeuerungen einbürgern werden und zu ähnlichen Verhältnissen wie bei den ortsfesten Kesseln führen mögen, ist nicht stichhaltig, weil bei einem Vergleich zwischen den in Amerika üblichen, selbsttätigen Lokomotivrostbeschickungen (automatic stokers) und Handfeuerungen der geringere Brennstoffverbrauch in der Regel auf seiten der letzteren ist, und weil die ersteren lediglich zu der über die physische Kraft des Heizers gehenden Bewältigung der Kohle eingeführt wurden. Die thermischen Vorteile der Kohlenstaubfeuerung müssen bei Lokomotiven deshalb größer als bei stationären Kesseln sein,

a) weil die Lokomotivrostfeuerung — von den Beschickungsperioden abgesehen — fast immer mit Luftüberschuß arbeitet, der vor allem bei heruntergebranntem Feuer und forciertem Betrieb sehr groß wird und nicht wie bei ortsfesten Kesseln von Hand geregelt werden kann. Bei Kohlenstaubfeuerungen ist dagegen der Luftüberschuß in den neueren amerikanischen Konstruktionen von Hand ein-

¹⁾ Nach privaten Mitteilungen.

stellbar und, wie aus Tafel 13 auf Seite 149 hervorgeht, auch bei Vollast außerordentlich gering;

b) weil bei Lokomotivrostfeuerungen der Verlust durch Kammerlöse und Flugkohle groß ist — besonders bei selbsttätigen Rostbeschickungen — und bei Staubfeuerungen geringer ausfällt oder im Falle guter Beaufsichtigung seitens des Heizers gar nicht vorhanden ist;

c) weil die hohe Rostanstrengung und das kleine Volumen der Feuerkiste bei forciertem Betrieb derartig hohe Gasgeschwindigkeiten zur Folge hat, daß die flüchtigen Bestandteile bei Rostfeuerung nicht gründlich mit Verbrennungsluft gemischt werden können und teilweise unverbrannt entweichen. Bei der Kohlenstaubfeuerung befindet sich in jedem Zeitintervall nur so viel Brennstoff in der Feuerkiste, wie jeweilig verbrennt.

d) Auch auf den Dampfmaschinenteil der Lokomotive wirkt die Kohlenstaubfeuerung insofern günstig ein, als man bei ihr der Blasrohrwirkung zur Erzeugung von Zug fast gänzlich entraten und den Querschnitt des Blasrohrs bis auf das Doppelte steigern kann, ohne das nötige Vakuum in der Feuerkiste zu beeinträchtigen (siehe Abb. 66). Infolgedessen nimmt der Gegen-
druck im Zylinder ab und dessen Leistung zu. Ferner kann die in verschiedenen Fällen beobachtete höhere Überhitzung des Dampfes den Arbeitsprozeß günstig beeinflussen.

2. Regelbarkeit. Als Vorteil der Kohlenstaubfeuerung muß ihre leichte Regelbarkeit erwähnt werden, die bei den bedeutenden und fortwährenden Belastungsschwankungen des Lokomotivkessels wertvoll wird. Die Bedienung der Maschinerie ist ähnlich wie bei selbsttätigen Rost-

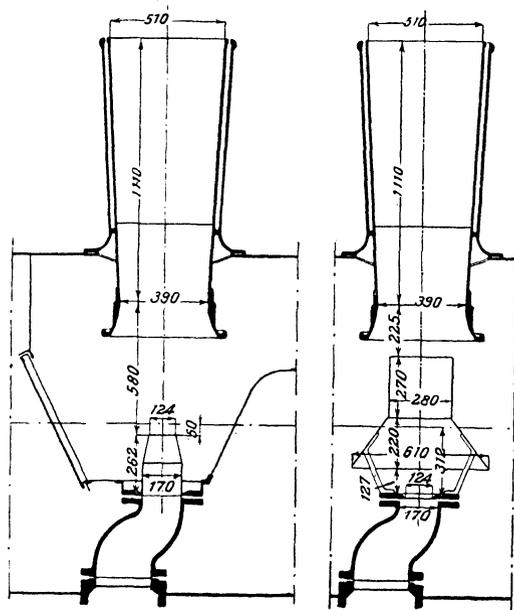


Abb. 66. Rauchkammer einer schwedischen Staatsbahnlokomotive vor und nach der Umstellung auf Torfstaubfeuerung¹⁾.

¹⁾ Torfwirtschaft, 5. Jan. 1921.

beschickungen, die sich in Amerika beim Lokomotivpersonal allgemeiner Beliebtheit erfreuen. Ähnlich wie bei diesen bedient der Heizer die Kohlenstaubzufuhr an Hand des Manometers und stellt die Luftzufuhr so ein, daß sich gerade kein Rauch entwickelt. Bei forciertem Betrieb muß jedoch das Pyrometer der Rauchgase für die Luftzufuhr maßgebend sein, damit die feuerfesten Steine nicht erweichen oder schmelzen.

Bezüglich des Regelbereiches gilt das für ortsfeste Kessel auf Seite 133 Gesagte. Die Möglichkeit, bei Stillstand den Brennstoff abzustellen, hat zwar etwas Bestechendes, dürfte aber nur bei kurzen Haltepausen vorhanden sein. Nach den bisherigen Erfahrungen kann der Brennstoff bei gutem Zustand der Verbrennungskammer 20 bis 30 Minuten lang abgestellt werden, ohne daß die Zündung in Frage gestellt würde. Bei längeren Stillstandszeiten, wie sie vor allem bei Verschiebelokomotiven auftreten, wird man ohne eine Hilfsfeuerung (Hilfsrost nach Abb. 65 oder Zündölbrenner) nicht auskommen, da es nach privaten Mitteilungen bei dem jetzigen Stand der Staubfeuerungstechnik nicht möglich ist, die Brennerleistung unbeschadet sicherer Zündung so stark zu vermindern, daß sie grade genügt, die Stillstandsverluste des Kessels zu decken.

3. Überlastbarkeit. Es wurde bereits auf S. 151 an Hand der Versuche gezeigt, daß sich auch bei mittelschwerer Anstrengung der Feuerung sehr günstige Verbrennungsverhältnisse bei Kohlenstaubbetrieb erzielen lassen, daß man aber bei forciertem Betrieb mit Rücksicht auf die Verbrennungskammertemperaturen wahrscheinlich größeren Luftüberschuß geben muß. Daß sich bei Kohlenstaubfeuerungen größere maximale Dauerleistungen als bei Rostfeuerung erzielen lassen, scheint bei Lokomotiven mit großen Feuerkisten wahrscheinlich, ist aber, soweit bekannt, bisher durch einwandfreie Versuche noch nicht erwiesen worden. Die Angabe, daß bei Versuchen der New York Central Railroad von einer Lokomotive bei Staubfeuerung 10⁰/₀ mehr Zugtonnen gezogen werden konnten als bei Rostbetrieb üblich, ist zu allgemein, um als Anhalt dienen zu können.

4. Rauchlosigkeit. Ohne Frage ist die Rauchlosigkeit eine starke Seite der Kohlenstaubfeuerung. Allerdings gilt dies mit einer Einschränkung. Beim Anheizen oder nach längeren Betriebspausen tritt, wenigstens bei gasreichen Steinkohlen, starkes Qualmen auf. Der amerikanische Eisenbahner stellt zuweilen die Scherzfrage: „Welcher Brennstoff qualmt am stärksten und welcher am wenigsten?“ und antwortet: „Das Heizöl“. Das gleiche wird man auch von gasreichem Steinkohlenstaub sagen können. Bei Braunkohlen wird man stets fast rauchlos fahren können.

5. Reparaturen. Bei Kohlen mit hohem Schwefelgehalt stellen sich bekanntlich an Aschekästen und Funkenfängern bzw. Netzwerk der Rauchkammer häufige Reparaturen ein. Die vollkommene Verbrennung der Kohlenstaubfeuerung einerseits, die einfachere Konstruktion der Aschekästen andererseits mindert die Reparaturunkosten der letzteren, während in der Rauchkammer Funkenfänger und Netzwerk im Falle von Kohlenstaubfeuerung überhaupt fortfallen. (Siehe Abb. 66.)

Ein hartnäckiges Übel ist der Schaden, welcher der Feuerbrücke und dem Zündgewölbe durch Abbrand und Auswaschung durch hohe Temperaturen und fliegende Asche- und Schlackenpartikel zugefügt wird. Nach den Mitteilungen des Kohlenstaubfeuerungs-ausschusses der amerikanischen Eisenbahnen [International Railway Fuel Association]¹⁾ wiegt der durch Erneuerung der feuerfesten Steine entstandene Geld- und Zeitverlust den durch Brennstoffersparnis erzielten Gewinn mehr als auf, es sei denn, man verwende eine minderwertige, billige Kohle, die sonst als Abfallprodukt nicht zu verwenden wäre. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, daß der Preis amerikanischer Kohle im Verhältnis zu den dortigen Löhnen niedrig ist, und daß die Reparaturunkosten, auf deutsche Verhältnisse übertragen, in ein günstigeres Licht rücken würden. Dazu kommt noch, daß sich die Kohlenstaubfeuerung auf Lokomotiven seit der Zeit der Berichterstattung des obigen Ausschusses im Mai 1919 konstruktiv wesentlich verbessert hat.

6. Konstruktion. Man sollte sich grundsätzlich darüber klar sein, daß eine Lokomotivfeuerkiste mit ihrem kleinen Volumen und den daraus folgenden hohen Gasgeschwindigkeiten einerseits und den durch ihre geringe Länge bedingten kurzen Flammenauslauf andererseits für die Kohlenstaubflamme keineswegs ideale Vorbedingungen bietet. Der starke Abbrand und die Auswaschung der feuerfesten Steine können daher kaum überraschen, sollten aber keineswegs unterschätzt werden. Man wird aber trotz dieser bedenklichen Seite der Kohlenstaubfeuerung mit dem oben erwähnten Ausschuß übereinstimmen können und auf Grund der in den Versuchen erwiesenen günstigen Verbrennungsverhältnisse und der Anpassungsfähigkeit der Kohlenstaubfeuerung ihre Verwendung für Lokomotiven im Prinzip als einen durchaus gesunden Gedanken bezeichnen können. Die beobachteten Schäden werden als Kinderkrankheiten anzusehen sein, die durch bessere wissenschaftliche Ergründung und verbesserte Konstruktionen, wenn nicht beseitigt, so doch herabgemindert werden können. Grundsätzlich gelten auch für die Lokomotiven die auf S. 65f. dargelegten Konstruktionsregeln für Verbrennungskammern. Aus praktischen Gründen wird man bestrebt

¹⁾ Power, 24. Juni 1919, S. 997.

sein, die heutige Form der Feuerkiste beizubehalten. Ob das möglich sein wird, darüber sind die Ansichten in amerikanischen Eisenbahnkreisen noch geteilt. Sollte man finden, daß sich die obigen Schäden nur durch den Bau spezieller, für Kohlenstaubfeuerung gebauter Lokomotivkessel mit langem Flammenauslauf beheben lassen, so sind allerdings die Aussichten der Kohlenstaubfeuerung auf Lokomotiven gering. Die meisten Eisenbahnen werden auf der Umstellungsmöglichkeit von Rost- zu Kohlenstaubfeuerung und umgekehrt bestehen.

7. Zusammenfassung. Zusammenfassend kann man sagen, daß der erheblichen thermischen Überlegenheit der Kohlenstaubfeuerung: — höhere Verdampfungsziffern, gute Anpassungsfähigkeit, geringere Brennstoffverluste bei Stillstandsperioden, Verwendbarkeit minderwertiger Brennstoffe, Rauchlosigkeit — entschiedene Nachteile: — Komplikation der Lokomotivausrüstung, teure Reparaturen der Verbrennungskammer, nicht unbedingt sicheres Funktionieren der Brenner, Errichtung von Aufbereitungsanlagen und Vorratsbehältern an den Bekohlungsstationen — gegenüberstehen. Der erste der erwähnten Nachteile, die Komplikation der Lokomotivausrüstung, würde allerdings hinfällig, wenn man auch bei rostgefeuerten Lokomotiven wie in Amerika zu selbsttätiger Beschickung überginge; der zweite Nachteil, die teuren Reparaturen, läßt sich vielleicht durch verbesserte Konstruktion der Verbrennungskammer überwinden. Das gleiche gilt von den Brennern. Wägt man die starken Seiten der Kohlenstaubfeuerung gegen ihre schwachen ab, so wird man sich überall da, wo billige und gute stückige Steinkohle zur Verfügung steht, wenig von diesem Feuerungsverfahren versprechen dürfen. Anders dort, wo man auf minderwertige Brennstoffe angewiesen ist. Auf die Einführung der Lokomotivkohlenstaubfeuerung in Brasilien und auf die Versuche in Schweden, Italien und Holland wurde ja bereits hingewiesen. In allen diesen Ländern gilt es, die heimischen, minderwertigen Brennstoffe für den Eisenbahnbetrieb heranzuziehen.

e) Verwendungsmöglichkeiten der Kohlenstaubfeuerung auf Lokomotiven in Deutschland.

Die Forderung: „Die beste Kohle der Eisenbahn“ kann unter den Zeitverhältnissen nicht mehr aufrecht erhalten werden. Es ist patriotische Pflicht von Privatindustrie und Staatsbahnen, sich bei der wohl noch länger andauernden Brennstoffknappheit auf minderwertige Brennstoffe einzustellen, um eine möglichst große Menge der für manche industriellen Zwecke unentbehrlichen hochwertigen Gaskohlen freizubekommen.

Für die Eisenbahnen käme in erster Linie die Verwendung von Braunkohlenstaub und von Halbkoksstaub in Frage. Bei Braunkohlenstaub würde sich das auf dem Tender mitgeführte Brennstoffgewicht schätzungsweise um 25 bis 30% gegenüber stückiger Ruhrkohle, bei Halbkoksstaub um etwa 40% erhöhen. Man hätte also vielfach entweder neue und größere Tender zu bauen oder müßte bei Beibehalten der alten Tender diese an jeder Endstation auffüllen.

Die Frage: „Staubaufbereitung auf der Grube oder an den Endstationen“ ist wegen des etwaigen Rohkohlentransportes und der teureren Anlagekosten im letzteren Falle von wirtschaftlicher Bedeutung. Bei Halbkoks ist Grubenaufbereitung tunlich, bei Braunkohlenstaub zweifelhaft, solange seine Transport- und Lagerfähigkeit noch nicht erwiesen ist.

Es bedarf also noch eingehender Untersuchungen, bevor an eine Umstellung im großen gedacht werden kann. Sie lohnen aber die Mühe und sollten in erster Linie von der Privatindustrie angestellt werden. Ein großer Betrieb wie die Staatsbahnen ist dafür weniger geeignet. Vor allem sollte sich die Braunkohlenindustrie dieser Aufgabe widmen. In jeder Brikettfabrik fallen große Mengen feinen Staubes ab, mit dem auf Zechenlokomotiven unschwer Versuche gemacht werden könnten. Fallen diese günstig aus, so sollten sich auch die Reichsbahnen der Sache annehmen. Der Einwand, ein großer Bahnbetrieb könne sich nicht auf verschiedenartige Feuerungen im Hinblick auf die Freizügigkeit der Lokomotiven einlassen, ist nicht stichhaltig. Es sei nur daran erinnert, daß sich die selbsttätigen Beschickungen auf amerikanischen Lokomotiven ohne großen Widerstand eingebürgert haben und daß drüben große Bahngesellschaften in dem einen Bezirk Öl, in dem andern Kohle verfeuern. Die Umstellung einer Lokomotive wird in der Regel in der Werkstatt binnen weniger Tage vollzogen. Bei Umstellung auf Staubbetrieb liegen die Verhältnisse aber nicht anders.

III. Staubfeuerungen auf Schiffen.

Kohlenstaubfeuerungen unter Schiffskesseln sind bisher noch nicht über das erste Versuchsstadium gediehen. Grundsätzlich ist zu bemerken, daß wegen der Eigenschaft manchen Kohlenstaubes, bei längerem Lagern festzubacken oder sich zu entzünden, die Aufbereitung an Bord zu geschehen hätte. Wegen des geringen zur Verfügung stehenden Raumes wird man von einer Trocknung absehen und von vornherein auf an sich schon verhältnismäßig trockne Steinkohlen angewiesen sein. Im Interesse hinreichender Betriebs-

sicherheit wird man sich vor allem bei Kriegsschiffen kaum zu einer Zentralmahlanlage verstehen und eine Unterteilung in verschiedene Mahlgruppen fordern. Die Zerkleinerung geschähe dann zweckmäßig in Maschinen nach Art der Walther-Farner oder Kofinomühlen unmittelbar vor den Kesseln. Bei den auf Handelsschiffen üblichen Zylinderkesseln wäre wahrscheinlich ein Ofenvorbau nötig, der sich wegen Platzmangels fast immer verbieten wird. Etwas günstiger liegen die Verhältnisse bei Wasserrohrkesseln, wie sie auf neueren Passagierdampfern und Kriegsschiffen Verwendung finden und in welche sich Staubfeuerungen nach Art von Abb. 56 einbauen lassen würden. Die Aussichten für die Kohlenstaubfeuerungen scheinen vorläufig — vielleicht von Sonderfällen abgesehen — nicht groß zu sein.

Schluß.

Bedeutung der Staubfeuerung für die deutsche Brennstoffwirtschaft.

a) Brennstoffe.

Die Bewertung eines Brennstoffes für Kohlenstaubfeuerungen läßt sich nicht in eine einfache Formel kleiden. Ein gewisser Gehalt an flüchtigen Bestandteilen ist wünschenswert, braucht aber keineswegs bestimmend zu sein. Vielfach wird die Brauchbarkeit der Kohle von ihrer Asche abhängen. Diese kann den Mahlvorgang durch erhöhten Mühlenverschleiß unwirtschaftlich machen, durch ihre Zähflüssigkeit den Ofenbetrieb stören oder durch ihr chemisches Verhalten das Mauerwerk der Feuerung angreifen. Leider sind wir über das Verhalten der Aschen deutscher Kohlen noch nicht genügend unterrichtet; es muß deshalb davor gewarnt werden, die Erfahrungen mit Aschen amerikanischer Kohlen ohne weiteres übertragen zu wollen. Immerhin ist es möglich, die Verwertbarkeit verschiedener deutscher Brennstoffe für Kohlenstaubfeuerungen auf Grund der in den vorigen Kapiteln dargestellten Verhältnisse in großen Umrissen zu kennzeichnen.

1. Koks. Koksgrus aus Kokereien und Gasanstalten ist wenig geeignet, in Staubfeuerungen verbrannt zu werden. Erstens ist der Kraftbedarf für die Mahlung sehr hoch und der Verschleiß der Mühlen ein großer, und zweitens ist der Gehalt an flüchtigen Bestandteilen so gering, daß eine sichere Zündung des Kohlenstaubes nur bei

hohen Verbrennungskammertemperaturen möglich ist¹⁾. Immerhin läßt sich durch Zusatz von Kohlenstaub der Gehalt an flüchtigen Bestandteilen steigern und eine brauchbare Mischung herstellen. Die Verwertung von Koks- und Kohlenstaubmischungen dürfte jedoch auf vereinzelte Fälle beschränkt bleiben.

Lokomotivkammerlösch, mit Kohle gemischt, ist in Amerika in ortsfesten Staubfeuerungen mit leidlichem Erfolge verbrannt worden. Diese Verwertung dürfte sich nur auf große Lokomotivschuppen oder -werkstätten beschränken, in denen genügende Mengen zur Verfügung stehen, um den Bau einer Mahlanlage zu rechtfertigen.

Auch die Verwertung der aus Halbgasfeuerungen stammenden Braschen und des in der Generatorschlacke befindlichen Koksrückstandes in Staubfeuerungen unter Zusatz von gasreicher Steinkohle wäre zu erwägen. Der Koks müßte von der Schlacke getrennt und dann vermahlen werden. Ob ein derartiges Verfahren wirtschaftlich ist, erscheint immerhin fraglich.

2. Halbkoks. Anders als bei Koks liegen die Verhältnisse bei Halbkoks, der als Nebenprodukt bei der Tieftemperatur- oder Urteergewinnung aus Stein- oder Braunkohlen abfällt. Halbkoks hat bisher nur für Hausbrandzwecke als sog. Grudekoks aus den Schweleereien des sächsisch-thüringischen Braunkohlenreviers Verwertung gefunden. Ob die Urteererzeugung in großem Maßstabe Platz greifen wird, hängt davon ab, wie sich die Lage auf dem Erdölmarkt entwickelt oder in welchem Maße es in Zukunft gelingt, aus dem Urteer Schmiermittel herzustellen. Sollte dies der Fall sein, so wird man sich nach einem Absatz für das Nebenprodukt, den Halbkoks, umsehen müssen. Zur Verfeuerung auf Rosten ist Halbkoks seines bröckeligen und feinkörnigen Gefüges wegen wenig geeignet. Vielleicht stellt die Brikettierung einen Ausweg dar; ob man jedoch ohne teure Bindemittel auskommt, scheint fraglich. Versuche mit brikettiertem Halbkoks auf Lokomotiven sind unbefriedigend ausgefallen, weil er infolge seines geringen Gewichtes mit den Rauchgasen teilweise unverbrannt entweicht. Vielleicht lassen sich auch die in Amerika weitverbreiteten Unterschub-Retortenfeuerungen mit Unterwind dem Halbkoks anpassen. Die bestgeeignete Methode der Halbkoksverwertung scheint aber die Staubfeuerung zu sein. Zu ihren Gunsten spricht, daß Halbkoks mit verhältnismäßig geringem Kraftaufwand gemahlen werden kann, nicht getrocknet zu werden braucht und hinreichende Mengen flüchtiger Bestandteile (8—15%) enthält. Es

¹⁾ Durch Versuche der Firma Polysius, Dessau, wurde erwiesen, daß sich Koksstaub bei hoher Mahlfineinheit und hohen Kammertemperaturen vollkommen verbrennen läßt.

wäre daher denkbar, daß sich ein guter Markt für Halbkoks aufbauen ließe, der nicht nur die Rentabilität der z. Z. in Betrieb befindlichen Schwelereien erhöhen, sondern auch den Abbau und die Verwertung von bitumenreichen Braunkohlen wieder lohnend machen würde, die unter dem Druck der amerikanischen Erdölindustrie nicht abbauwürdig bleiben konnten¹⁾.

Betrachtet man die Verschmelzung unter dem Gesichtspunkt der Gas- und Halbkokserzeugung als Hauptzweck und des Teeres als Nebenprodukt, so erschließen sich vielversprechende Aussichten für bitumenarme Braunkohlen, zu denen bekanntlich die großen deutschen Vorkommen der Niederlausitz und des Rheinischen Vorgebirges gehören. Bei der Verschmelzung könnte man einen Teil des entstehenden Gases für die Unterhaltung des Prozesses verwenden, während der Rest für Kraft- und Leuchtzwecke zur Verfügung stünde. Bei Braunkohle wird der Wärmemehraufwand für die Durchführung des Schwelprozesses an Stelle des Trockenprozesses mit etwa 15⁰/₀ angegeben²⁾. Pro Tonne Rohbraunkohle mit 50⁰/₀ Wassergehalt erhält man nach Fellner & Ziegler:

120—150 cbm Reichgas von 4000—5000 WE,

eine Teerausbeute von 3—9⁰/₀ je nach Art der Kohle,

eine Halbkoksausbeute von 260—350 kg von 4000—4500 WE³⁾.

Man könnte auch die gesamte Gasmenge für anderweitige Zwecke abgeben und die für den Schwelprozeß nötige Heizung mit Schwachgas (Generatorgas) oder mit Halbkoksstaubfeuerung vornehmen, oder die letztere nur als Ergänzung der Gasheizung bei auftretenden Spitzen im Gasverbrauch einspringen lassen. Naturgemäß müßte die Gas- und Halbkokserzeugung in Großbetrieben stattfinden, die wie die Brikettfabriken zweckmäßig in der Nähe der Gruben zu errichten wären. Das gewonnene Gas könnte dann nicht nur nach benachbarten Elektrizitätswerken oder Fabriken, sondern in Ferngasleitungen nach den umliegenden Städten geleitet werden, wie es bereits mit Koksgas geschieht, das beispielsweise die Städte Barmen, Remscheid oder Saarbrücken versorgt. Für den Halbkoks würde sich bei der Industrie wahrscheinlich unschwer ein

¹⁾ Beyschlag, Neue und alte Wege der Braunkohlen- und Schieferverschmelzung.

²⁾ Siehe auch Heft 3 der Hauptstelle für Wärmewirtschaft, S. 16.

³⁾ Rheinische bitumenarme Braunkohle von der Grube „Brühl“ liefert nach Versuchen von Fellner & Ziegler im Schwelverfahren pro 1 Tonne Rohkohle:

130 cbm Reichgas von 4200 WE,

40 kg Teer,

260 kg Halbkoks.

Siehe ferner: „Stahl und Eisen“ 1920, I, S. 741.

Großabsatz für Staubfeuerungen in Zementfabriken, Hüttenwerken oder vielleicht auch unter ortsfesten Kesseln oder Lokomotiven finden.

Halbkoks kann in offenen Eisenbahnwagen befördert werden und ist, wenn lufttrocken, sofort mahlbar. Trockenvorrichtungen an der Verbrauchsstelle würden also fortfallen und nur Mühlen benötigt werden. Die verkehrstechnischen Vorteile, die Halbkoks gegenüber grubenfeuchter Rohbraunkohle mit sich bringt, sind ohne weiteres klar; nicht nur, daß eine größere verfügbare Menge Wärmeinheiten pro Tonne transportiert werden und der Wagenumlauf entsprechend vermindert werden kann; auch der Versandradius kann vergrößert werden.

3. Anthrazit. Der Verwendung von Anthrazit in Staubfeuerungen stehen keine wesentlichen Schwierigkeiten entgegen¹⁾. Bei dem niedrigen Gehalt an brennbaren flüchtigen Bestandteilen muß man allerdings feine Mahlung oder hohe Verbrennungskammertemperaturen oder beides in Kauf nehmen. Anthrazit eignet sich für Feuerungen mit kurzen Flammenwegen oder häufigen Betriebspausen wenig. Ähnlich wie bei Koks kann man durch Beimischung von Kohlenstaub den Gehalt an flüchtigen Bestandteilen erhöhen²⁾.

In Pennsylvanien erlangt neuerdings der Abfall der Anthrazitkohlenwäschen für Staubfeuerungen Bedeutung. Diese Abfallkohle, die etwa 8⁰/₀ der Förderung ausmacht und sich ihres feinkörnigen Gefüges und des hohen Aschegehaltes wegen für Rostfeuerungen nicht eignet, wird in großen Halden aufgeschichtet oder in die Bäche des Kohlenreviers geschwemmt. Die Analyse des wasserfreien Materials lautet³⁾:

Fixer Kohlenstoff	70 ⁰ / ₀
Flüchtige Bestandteile	6 ⁰ / ₀
Asche	24 ⁰ / ₀
	100 ⁰ / ₀

Die Feuchtigkeit schwankt in weiten Grenzen zwischen 8 und über 30⁰/₀ Wasser. Der Heizwert des trockenen Brennstoffes ist etwa 6400 WE/kg. Die übliche Mahlfeinheit bewegt sich zwischen 10 und 15⁰/₀ Rückstand auf einem 4900er Sieb. Die Mühlenleistung ist etwa einhalbmahl, der Mühlenverschleiß etwa doppelt so groß, wie

¹⁾ Bei einem Schweißofen ließ sich z. B. dauernd eine Temperatur von 1480° ohne Luftvorwärmung erzielen, ohne daß Schwierigkeiten bei der Zündung eintraten. (Technique Moderne, Februar 1920, S. 81 ff.)

Siehe auch Heft 3 der Hauptstelle für Wärmewirtschaft, S. 10.

²⁾ Siehe S. 146.

³⁾ Harvey, Pulversided Coal Systems in Amerika, London 1919, S. 8.

bei amerikanischer gasreicher Steinkohle. Die „Philadelphia Rapid Transit Company“ hat kürzlich ihr elektrisches Bahnkraftwerk „Mt. Vernon“ in Philadelphia, Pa., teilweise auf Staubfeuerung umgestellt, und verwendet dabei Abfallkohle ohne Beimischungen¹⁾.

In Deutschland läge es nahe, die sog. Waschberge der Anthrazitgruben im Wurmrevier und in Westfalen auf ihre Eignung für Kohlenstaubfeuerungen zu untersuchen.

4. Steinkohlen. Steinkohlen können in ihrer Gesamtheit als geeignet für Staubfeuerungen angesprochen werden und finden in der deutschen Zementindustrie bei Drehöfen in Staubform bereits vielfach Verwendung.

Da die guten und gasreichen Kohlensorten der deutschen Industrie in zunehmendem Maße durch die Zwangslieferungen an den Verband entzogen werden, müssen die heimischen Verbraucher mehr und mehr auf minderwertige, aschereiche und feinkörnige Kohlen zurückgreifen. Unter diesen Umständen kann die Staubfeuerung mit besonderem Vorteil verwandt werden.

Außer Stückkohlen kämen für Staubfeuerungen Kohlengrieß und der bei der Kohlenwäsche abfallende Kohlenschlamm in Frage. Bei diesem wäre allerdings eine Trocken- und Mahlanlage unumgänglich.

Der Wunsch, sich von Kohlenschlamm und den lästigen Klärsümpfen freizumachen, hat auf verschiedenen westfälischen Zechen dazu geführt, das Feine der Förderkohle vor der Wäsche durch Wind-sichtung abzusaugen. Die so gewonnene Staubkohle beträgt nicht selten 25—30 v. H. der Förderung; der Feuchtigkeitsgehalt ist höchstens 2 v. H.; Trockenanlagen werden also nicht benötigt; 20—30 v. H. der Staubkohle sind fein genug, um unmittelbar verfeuert zu werden; der Rest kann durch billiges Nachmahlen auf die nötige Feinheit gebracht werden²⁾. Als Verbraucher kommen die Kessel der Zechen und benachbarten Eisenwerke oder deren hüttenmännische Öfen in Betracht.

5. Braunkohlen. Die Braunkohlen sind in Deutschland in großen Mengen vertreten und haben durch die Zeitverhältnisse besondere Bedeutung für das deutsche Wirtschaftsleben erhalten.

Manche deutschen Braunkohlen eignen sich für Staubfeuerungen vorzüglich, weil sie nicht nur einen niedrigen Gehalt an Asche haben, sondern weil die letztere oft im Gegensatz zu den bösartigen Silikatschlacken gewisser Steinkohlen kalkreich ist und daher in der Flamme

¹⁾ „Power“, 29. November 1921, S. 828; dgl., 27. Juli 1920, S. 140. Siehe ferner Seite 114.

²⁾ „Glückauf“, 30. April 1921, S. 413 ff.; „Die Wärme“, 6. Januar 1922, S. 21 ff.

eine „kurze“, meist schwerschmelzende Schlacke gibt. Immerhin ist bei gewissen mitteldeutschen Braunkohlen mit eisenhaltigen Aschen niedrigen Schmelzpunktes Vorsicht geboten¹⁾).

Für die Verwertung von sandiger und daher schlecht briкетierbarer Kohle ist die Staubfeuerung der beste Ausweg.

Schließlich sei noch auf den in den Briкетtfabriken entweichenden oder abgesogenen Kohlenstaub hingewiesen. Er wird meist in Dampf oder Wasser niedergeschlagen, dadurch entwertet und als billiger Schlamm abgegeben. Dieser Staub könnte nicht nur in Dampfkesseln auf der Briкетtfabrik, sondern auch auf deren Lokomotiven verfeuert werden. Die dadurch erzielte Ersparnis an Rohkohle oder Briкетts wäre nicht unbeträchtlich.

6. Torf. Torfstaubfeuerungen werden seit einer Anzahl von Jahren auf Lokomotiven der schwedischen Staatsbahnen benutzt. In Deutschland werden Torfstaubfeuerungen wohl höchstens lokale Verbreitung finden.

b) Verwendungszweck.

Sieht man von der Zementindustrie ab, so sind die Aussichten der Staubfeuerung auf Hüttenwerken am größten. Das gilt vor allem von den reinen Stahl- und Walzwerken und erst in zweiter Linie von gemischten, auf „Gasbasis“ gestellten Hütten oder von Betrieben der Kleineisenindustrie.

Geringer als bei Hütten, wenn auch nicht unbeträchtlich sind die Möglichkeiten bei ortsfesten Dampfkesseln. Allerdings muß es beim derzeitigen Stand der Technik fraglich erscheinen, ob sich die Staubfeuerung dem in Deutschland sehr verbreiteten Flammrohrkessel in einer wirtschaftliche Vorteile versprechenden Form anpassen wird.

Die Frage der Lokomotivbeheizung ist noch nicht spruchreif und erst durch eingehende Versuche zu klären. Fallen diese günstig aus, so sind allerdings die Aussichten vor allem bei Braunkohlen- und Halbkoksstaub nicht schlecht.

c) Forderungen.

Die zunehmende Verbreitung der Staubfeuerung in Amerika einerseits und die kritische Lage unsrer Brennstoffversorgung andererseits verlangt gebieterisch, daß man sich auch in Deutschland dieses Feuerungsverfahrens tatkräftig annehme. Es war der Hauptzweck der vorliegenden Arbeit, für den einzuschlagenden Weg Fingerzeige zu geben. Sie gipfeln in einer dreifachen Forderung:

¹⁾ Siehe S. 13 ff.

1. Übernahme des Bewährten.
2. Wissenschaftliche Durchdringung der Trocken-, Mahl-, und Verbrennungsvorgänge.
3. Auswertung der so gewonnenen Erkenntnis durch betriebmäßige Versuche.

Hüten wir uns vor Anpreisungen unerfahrener Firmen, die mehr Schaden als Nutzen stiften, und die durch zahllose, sachlich nicht mehr daseinsberechtigende Konstruktionen die bereits gewonnenen Erkenntnisse zu verdunkeln drohen. Nur wenn Wissenschaft und Praxis Hand in Hand gehen, und die Betriebe, unnötiger Geheimnistuerei abhold, ihre Erfahrungen mit Staubfeuerungen bekanntgeben, können vorhandene Mängel beseitigt und gesunde Bahnen eingeschlagen werden. Nur so sichern wir uns vor teuren, aber fruchtlosen Experimenten, vor übertriebenen, die großen Zusammenhänge verkennenden Hoffnungen oder unberechtigter kleinmütiger Zurückhaltung. Dann wird es aber auch gelingen, die Staubfeuerung ihrem wahren Wert entsprechend mit in den Dienst des einen großen Zieles zu stellen: Der Vervollkommnung unserer Produktions- und Verkehrsmittel und damit des Wiederaufbaus unsres Vaterlandes!

Sachverzeichnis.

- Abbrand 78, 80, 83, 91, 93.
Abhitzeessel 77, 78, 80, 97, 101.
Abhitzeverwertung 100.
Aeromühle 27, 34, 44.
Agglomerieröfen 67.
Anlagekosten 106, 108, 109, 135.
Anodenöfen 99.
Asche (siehe auch Schlacke)
 Absonderung der — 23, 65.
 Aggregatzustände der — 12f.
 Entfernung der Flug- 70, 101.
 Gehalt an — 17, 72, 90, 126, 129,
 146, 147, 149, 150, 152.
 Schwefelgehalt der — 16, 72, 74,
 126, 130, 146, 150.
 Zusammensetzung der — 11, 15.
AtchisonTopeka&Santa Fé Railroad 150.
Aufbereitungsanlagen
 Anordnung von — 33
 für Braunkohle 39.
 für Steinkohle 38.
 Kosten von — 38.

Betriebsbereitschaft 107, 134, 148.
Blechwalzwerke 83.
Blechwärmöfen 83.
Blockwärmöfen 81, 82.
Braunkohlen
 Generatorgas aus — 105.
 Mahlung von — 24.
 -Staub 80, 105, 109, 159, 164.
 Trocknung von — 11, 20, 22, 39.
Brenner
 Bergmann- 56.
 Dunn- 56.
 Fuller- 56, 58, 59.
 für Hochöfen 98.
 für Kessel 57 f.
 für Lokomotiven 58.
 für Martinöfen 57, 69.
 Hochdruck- 54, 62, 69.
 Leistung der — 57, 62, 94.
 Lopulco- 56.
 Niederdruck- 54, 62, 69, 116.
 Regelung der — 57.
Brennstoffe
 Anthrazit 78, 146, 163.
 Aschegehalt der — 11.
 Braschen 23, 161.
 Braunkohle 80, 137, 141, 159, 164.
 Feuchtigkeit der — 10.
 flüchtige Bestandteile der — 10, 146.
 Gas 7, 73, 90, 123.
 Generatorgas 73.
 Brennstoffe (Fortsetzung).
 Grus 78, 164.
 Halbkoks 31, 146, 159, 161.
 Kammerlöschke 23, 161.
 Koks 23, 160.
 Lignit 126, 149.
 Öl 7, 73, 90, 93, 111.
 Schlammkohle 129, 137, 163.
 Teeröl 111.
 Torf 78, 152, 165.
Chemische Industrie 66.
Chicago & North Western Railway 146.
Combustion Engineering Co. (Lopulco)
 Brenner der — 57, 58.
 Kesselfeuerung der — 117, 118, 120.
 Lokomotivfeuerung der — 142.
Covert-Fördersystem 44, 49.
Dampfkessel 112 f.
 Brenner für — 56.
 Flammrohrkessel 124.
 Regelung der — 132.
 Schiffskessel 159.
 Schrägröhrkessel 117 f.
 Sonderkessel 139.
 Steilrohrkessel 120 f.
 Verdampfungsversuche 125 f.
Decker-Gleichstromtrommeltrockner 21.
Delaware & Hudson Railroad 146.
Doppelöfen 83.
Durchweichungsgruben 82.
Eisenausscheider 23.
Eisengießerei 86 f.
Eisenmischer auf Hütten 77.
Eisenpyrit 13, 147, 151.
Explosionsgefahr 20, 36, 47, 48, 55, 56,
 62, 90.
Fellner & Ziegler
 Doppelspeiseschnecke von — 52.
 Schwelversuche von — 162.
 Verbundrohrmühle von — 29.
Feuchtigkeit der Brennstoffe 10, 18.
Feuerfeste Steine
 Anforderungen an — 65.
 Erweichung der — 13, 131.
 Schlackenangriff 13.
Flammen
 Hochdruck- 54, 62.
 Niederdruck- 54, 62, 82.
 reduzierende — 84, 87.
 Strahlung der — 62, 84.
 Umkehr- 63, 69.
 Wirkungsgrad der — 55.

- Gasfeuerungen** 7, 55, 123.
Generatorgas 103.
Geschwindigkeit
 der Verbrennung von Kohlenstaub
 5, 62. [48.
 des Staubes bei Hochdruckförderung
 des Staubes bei Niederdruckförde-
 rung 44.
 in Verbrennungskammern 14, 65, 115.
Gesenkschmiedeöfen 91.
Gitterkammern, siehe **Regenerativ-**
kammern.
Gießereiöfen 87.
Glasindustrie 66.
Glühöfen 84, 89.
- Halbgasfeuerungen** 110.
Heizflächenbeanspruchung 129.
Heizwert verschiedener Brennstoffe 7.
Herdschmelzöfen 16, 75, 87.
Hochöfen 67, 98.
Holbeck
 Fördersystem 46, 49.
 Regelungsverfahren 46.
- Kalkindustrie** 66.
Kathodenöfen 100.
Kleisenindustrie 112.
Kofino-Mühle 27, 34, 44.
Kohlensäure 61, 64, 127, 131, 149.
Kohlenstaub
 Aschegehalt von — 17, 72, 74, 90,
 97, 127, 129, 146f.
 Aufbereitung von — 17.
 Entgasung von — 3.
 Entlüftung von — 35.
 Feuchtigkeitsgehalt von — 10, 35,
 36, 129.
 Herstellungskosten von — 37, 107, 109.
 Lagerung von — 35.
 Mahlfineinheit von — 5, 8, 30, 31, 126, 129.
 Selbstentzündung von — 36.
 Sortierung von — 8, 30, 32.
 spezifisches Gewicht von — 36.
 Temperaturkontrolle von — 37.
 Transport von — 41f.
 Trocknung von — 18f.
 Verbrennung von — 4.
 Zündung von — 4.
- Kohlenstaubfeuerungen**
 auf Hüttenwerken 66f., 165.
 auf Schiffen 159.
 in chemischen Fabriken 66.
 in der Glasindustrie 66.
 in Zementfabriken 66.
 unter Lokomotiven 140f., 165.
 unter ortsfesten Kesseln 112f., 165.
- Kohlentrockner**
 Abhitze für — 23.
 Abmessungen der — 20.
- Kohlentrockner (Fortsetzung)**.
 Gleichstromtrommeltrockner — 20.
 Kraftbedarf der — 20.
 Leistung der — 20, 22.
 Röhrentrockner 22.
 Tellertrockner 22.
 Temperaturen der Heizgase 19f.
 Temperaturkontrolle der — 23.
 Trommeltrockner 19 bis 22, 39.
 Wärmeaufwand der — 19f.
 Wirkungsgrad der — 19.
- Kohlenverbrauch**
 auf Lokomotiven 146f.
 bei Belastungsschwankungen 103, 132.
 bei Leerlaufperioden 103, 133.
 in hüttenmännischen Öfen, siehe diese.
 in ortsfesten Kesseln 127.
- Koksöfen** 68.
Krupp-Gruson
 Mühlen von — 27, 44.
 Trockner von — 20.
Kupferhütten 94.
- Lakesidekraftwerk** 64, 114, 117, 126f.
Lokomotiven
 Brenner für — 56.
 Feuerkisten der — 142f., 157.
 Regelung bei — 155.
 Tendersrüstung 142f.
 Versuche auf — 146f.
- Luftpressung**
 bei Brennern 54, 96, 142.
 bei Staubbeförderung 47f.
 in Verbrennungskammern 89, 127, 150.
Luftüberschuß 6, 64, 128, 131, 149.
Luftvorwärmung 6, 54, 57, 70, 77, 78,
 85, 93, 101, 119, 122.
- Martinöfen** 68f.
Metallhütten 94.
- Mühlen**
 Abmessungen der — 29.
 Aero- 27.
 Granulatoren 18.
 Hammer- 24.
 Horizontalkugel- 25.
 Kofino- 27.
 Kraftbedarf der — 18, 31.
 Kugel- 18, 28.
 langsamlaufende — 29.
 Leistung der — 29, 31.
 Pendel- 24.
 Raymond- 25.
 Ring- 25.
 Rohr- 28.
 Schlagkreuz- 24.
 schnelllaufende — 29.
 Walther-Farner- 27.
 Walzen- 18.
Muffelöfen 94.

- Ölfeuerungen** 1, 7, 73, 90, 93, 111, 134.
Oneidakraftwerk 113, 116, 126 f.
- Pfeiffer, Gebr., Kaiserslautern**
 Windsichter von — 33.
Platinenwärmöfen 81.
Polysius, G., Dessau
 Kugelmühle von — 28.
 Versuche von — 161.
Preßstahl 12, 91.
Primärluft 54, 60, 61, 96.
Puddelöfen 77.
- Quigley**
 Fördersystem 47.
 Speisevorrichtung 52, 53.
- Regenerativkammern** 12, 70, 80, 101.
Rekuperatoren 78, 80, 85, 101.
Reparaturen 106, 130, 137, 151, 157.
Röhrentrockner 22, 39.
Röstöfen 66, 94.
Roheisenerzeugung 66.
Rollöfen 79.
Rostfeuerungen 6, 137f., 148, 150, 152, 154.
Rückzündung 55, 60, 61.
- Sandtrockenöfen** 86.
Schachtöfen 98.
Schlacke, siehe auch unter Asche
 Angriff durch — 12f., 75, 81, 97.
 Erstarrung der — 14, 64, 116.
 Herd — 74, 88.
 Schmelzbarkeit der — 15, 127.
 Schutz gegen — 63, 64, 96, 116, 122, 151.
 Verflüssigung der — 14.
Schmiedöfen 12, 91.
 „Schwalbennester“ 13, 16, 147, 151.
Schwedische Staatsbahnen 152.
Schwefel, siehe unter Asche.
Schweißöfen 81.
Sekundärluft 54, 60, 63, 116, 132.
Siebung von Kohlenstaub 8, 30, 32.
Speisevorrichtungen
 Schnecken 51.
 Syhonspeiser 53.
 Trommelspeiser 51.
 von Edison 51.
 von Pinther 50.
 von Quigley 52, 53.
 von Schwarzkopf 51.
- Spitzenkessel** 134.
Stahlgießerei 86f.
Stahlwerke 68f., 111.
Staubbrände 20, 23, 36, 47, 48.
- Staubfeuerungen, siehe Kohlenstaub-**
feuerungen.
Stoßöfen 79.
Strahlung 62, 128, 132.
Strecköfen 66.
- Teerölfeuerungen** 111.
Temperaturen
 Abgas- 61, 64, 71, 97, 101, 128.
 Verbrennungs- 6, 64.
Tempergießerei 87.
Tieföfen 82.
Tieftemperaturverkokung 161.
Torf
 Transport von Torfstaub 42.
 Trocknung von — 22.
Transport des Kohlenstaubes
 durch Schnecken 42, 49.
 Emulsionssystem 48.
 Hochdrucksystem 47, 49.
 in Wagen 42.
 Kraftbedarf für — 42, 48, 49.
 Luftbedarf für — 44, 48.
 Niederdrucksystem 44, 49.
- Trockenöfen (Gießerei)** 86.
Trockner, siehe Kohlentrockner.
- Verbrennung**
 schleppende 64.
Verbrennungskammer
 Asche in der — 65, 130.
 Ausmauerung der — 65, 131, 151.
 Formgebung der — 65, 115.
 Größe der — 64, 115.
 Sekundärluftzuführung in der — 63, 116, 128.
 Strahlungsverhältnisse in der — 62.
 Temperaturen in der — 64, 131.
- Verbundmühle** 29.
Verzinkungswannen 85.
- Wärmöfen** 81f.
Walther-Farnermühle 27, 34, 44.
Walzwerke 79f., 111.
Warmhalten der Feuerungen 103, 133, 156.
Windsichtung 32.
Wirkungsgrade
 von Lokomotivkesseln 150, 153.
 von ortsfesten Kesseln 125, 127, 132, 136.
- Wirtschaftlichkeit der Staubfeuerungen**
 102, 135.
- Zementindustrie** 66.
Zinkhütten 94.
Zinntopföfen 100.
Zusatzfeuerung 107, 111, 123, 124, 156.

Kohlenstaubfeuerungen für ortsfeste Dampfkessel. Eine kritische Untersuchung über Bau, Betrieb und Eignung. Von Dr.-Ing. **Friedrich Münzinger.** Mit 61 Textfiguren. 1921. Preis M. 24,—.

Die Leistungssteigerung von Großdampfkesseln. Eine Untersuchung über die Verbesserung von Leistung und Wirtschaftlichkeit, und über neuere Bestrebungen im Dampfkesselbau. Von Dr.-Ing. **Friedrich Münzinger.** Mit 173 Textabbildungen. Erscheint Ende Frühjahr 1922.

Dampfkesselfeuerungen zur Erzielung einer möglichst rauchfreien Verbrennung. Von **F. Haier.** Zweite Auflage im Auftrage des Vereins deutscher Ingenieure bearbeitet vom Verein für Feuerungsbetrieb und Rauchbekämpfung in Hamburg. Mit 375 Textfiguren, 29 Zahlentafeln und 10 lithographierten Tafeln. 1910. Gebunden Preis M. 20,—.

Handbuch der Feuerungstechnik und des Dampfkesselbetriebes mit einem Anhang über allgemeine Wärmetechnik. Von Dr.-Ing. **Georg Herberg,** Stuttgart. Dritte, verbesserte Auflage. Mit 62 Textabbildungen, 91 Zahlentafeln sowie 48 Rechnungsbeispielen. 1922. Gebunden Preis M. 90,—.

Die Grundgesetze der Wärmeleitung und des Wärmeüberganges. Ein Lehrbuch für Praxis und technische Forschung. Von Oberingenieur Dr.-Ing. **Heinrich Gröber.** Mit 78 Textfiguren. 1921. Preis M. 46,—; gebunden M. 53,—.

Die Wärme-Übertragung. Auf Grund der neuesten Versuche für den praktischen Gebrauch zusammengestellt. Von Dipl.-Ing. **M. ten Bosch,** Zürich. Mit 46 Textabbildungen. 1922. Preis M. 45,—.

Die Grundgesetze der Wärmestrahlung und ihre Anwendung auf Dampfkessel mit Innenfeuerung. Von Ing. **M. Gerbel.** Mit 26 Textfiguren. 1917. Preis M. 2,40.

Technische Wärmelehre der Gase und Dämpfe. Eine Einführung für Ingenieure und Studierende. Von Studienrat Oberingenieur **F. Seufert,** Stettin. Zweite, verbesserte Auflage. Mit 26 Textabbildungen und 5 Zahlentafeln. 1921. Preis M. 11,—.

Die Abwärmeverwertung im Kraftmaschinenbetrieb

mit besonderer Berücksichtigung der Zwischen- und Abdampfverwertung zu Heizzwecken. Eine kraft- und wärmewirtschaftliche Studie. Von Dr.-Ing. **Ludwig Schneider**. Dritte, neubearbeitete Auflage. Mit 159 Textfiguren. 1920. Preis M. 16,—; gebunden M. 20,—.

Technische Thermodynamik. Von Prof. Dipl.-Ing. **W. Schüle**.

Erster Band: **Die für den Maschinenbau wichtigsten Lehren nebst technischen Anwendungen.** Vierte, neubearbeitete Auflage. Mit 225 Textfiguren und 7 Tafeln. 1921. Gebunden Preis M. 105,—.

Zweiter Band: **Höhere Thermodynamik** mit Einschluß der chemischen Zustandsänderungen nebst ausgewählten Abschnitten aus dem Gesamtgebiet der technischen Anwendungen. Vierte, neubearbeitete Auflage. Mit etwa 210 Textfiguren und 5 Tafeln. In Vorbereitung.

Leitfaden der Technischen Wärmemechanik. Kurzes Lehr-

buch der Mechanik der Gase und Dämpfe und der mechanischen Wärmelehre. Von Prof. Dipl.-Ing. **W. Schüle**. Dritte, verbesserte Auflage. Mit 93 Textfiguren und 3 Tafeln. 1922. Preis M. 33,—.

Energie-Umwandlungen in Flüssigkeiten. Von Prof. **Dónát**

Bánki, Budapest. In zwei Bänden. Erster Band: Einleitung in die Konstruktionslehre der Wasserkraftmaschinen, Kompressoren, Dampfturbinen und Aeroplane. Mit 591 Textabbildungen und 9 Tafeln. 1921. Gebunden Preis M. 135,—.

Die Ölf Feuerungstechnik. Von Dr.-Ing. **A. O. Essich**. Zweite, ver-

mehrte und verbesserte Auflage. Mit 209 Textabbildungen. 1921. Preis M. 20,—.

Ölfeuerung für Lokomotiven mit besonderer Berücksichtigung der

Versuche mit Teerölzusatzfeuerung bei den preußischen Staatsbahnen. Von Reg.-Baumeister **L. Sußmann**. Mit 41 Textfiguren. 1912. Preis M. 3,—.

Verbrennungslehre und Feuerungstechnik. Von Studien-

rat Oberingenieur **Franz Seufert**. Mit 19 Abbildungen, 15 Zahlentafeln und vielen Berechnungsbeispielen. 1921. Preis M. 15,—.

Die Heizerschule. Vorträge über die Bedienung und die Einrichtung

von Dampfkesselanlagen mit einem Anhang über Niederdruckkessel für Heizungsanlagen. Von Regierungsgewerberat **F. O. Morgner**, Chemnitz. Dritte, umgearbeitete und vervollständigte Auflage. Mit 158 Textfiguren. 1921. Preis M. 20,—.

Die Maschinistenschule. Vorträge über die Bedienung von Dampf-

maschinen und Dampfturbinen zur Ablegung der Maschinistenprüfung. Von Gewerberat **F. O. Morgner**, Leiter der Heizer und Maschinistenkurse in Chemnitz. Mit 119 Textfiguren. 1920. Preis M. 8,—.

Die Dampfkessel. Lehr- und Handbuch für Studierende technischer Hochschulen, Schüler Höherer Maschinenbauschulen und Techniken sowie für Ingenieure und Techniker. Von Prof. **F. Tetzner** †. Sechste, umgearbeitete Auflage von Oberlehrer **O. Heinrich**. Mit 451 Textabbildungen und 20 Tafeln. 1921. Gebunden Preis M. 62,—.

Hochleistungskessel. Studien und Versuche über Wärmeübergang, Zugbedarf und die wirtschaftlichen und praktischen Grenzen einer Leistungssteigerung bei Großdampfkesseln nebst einem Überblick über Betriebserfahrungen. Von Dr.-Ing. **Hans Thoma**, München. Mit 65 Textfiguren. 1921. Preis M. 33,—; gebunden M. 39,—.

Das Entwerfen und Berechnen der Verbrennungskraftmaschinen und Kraftgasanlagen. Von Dr.-Ing. e. h. **Hugo Güldner**, Maschinenbaudirektor, Vorstand der Güldner-Motoren-Gesellschaft in Aschaffenburg. Dritte, neubearbeitete und bedeutend erweiterte Auflage. Mit 1282 Textfiguren, 35 Konstruktions tafeln und 200 Zahlentafeln. Zweiter unveränderter Neudruck 1921. Gebunden Preis M. 200,—.

Bau und Berechnung der Verbrennungskraftmaschinen. Eine Einführung von Studienrat a. D. Oberingenieur **Fr. Seufert**. Dritte, verbesserte Auflage. Mit 94 Abbildungen und 2 Tafeln. Erscheint Ende Frühjahr 1922.

Die Steuerungen der Verbrennungskraftmaschinen. Von Dr.-Ing. **Julius Magg**. Mit 448 Textabbildungen. 1914. Gebunden Preis M. 16,—.

Regelung der Kraftmaschinen. Berechnung und Konstruktion der Schwungräder, des Massenausgleichs und der Kraftmaschinenregler in elementarer Behandlung. Von Hofrat Prof. Dr.-Ing. **M. Tolle**, Karlsruhe. Dritte, verbesserte und vermehrte Auflage. Mit 532 Textfiguren und 24 Tafeln. 1921. Gebunden Preis M. 240,—.

Drehschwingungen in Kolbenmaschinenanlagen und das Gesetz ihres Ausgleichs. Von Dr.-Ing. **Hans Wydler**, Kiel. Mit einem Nachwort: Betrachtungen über die Eigenschwingungen reibungsfreier Systeme von Prof. Dr.-Ing. **Guido Zerkowitz**, München. Mit 46 Textfiguren. 1922. Preis M. 90,—.

Bau und Berechnung der Dampfturbinen. Eine kurze Einführung. Von Oberingenieur Studienrat **Franz Seufert**, Stettin. Mit 54 Textabbildungen. 1919. Preis M. 5,—.

Dampf- und Gasturbinen. Mit einem Anhang über die Aussichten der Wärmekraftmaschinen. Von Dr. phil., Dr.-Ing. **A. Stodola**, Professor an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich. Fünfte, umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 1104 Textabbildungen und 12 Tafeln. 1922. Gebunden Preis M. 600,—.

Konstruktion und Material im Bau von Dampfturbinen und Turbodynamos. Von Dr.-Ing. **O. Lasche**, Direktor der A. E. G. Zweite Auflage. Mit 345 Textabbildungen. 1921. Gebunden Preis M. 70,—.

Der Einfluß der rückgewinnbaren Verlustwärme des Hochdruckteils auf den Dampfverbrauch der Dampfturbinen. Von Dr.-Ing. **Georg Forner**, beratender Ingenieur, Privatdozent an der Technischen Hochschule zu Berlin. Mit 10 Textabbildungen und 8 Zahlentafeln. 1922. Preis M. 15,—.

Die Zwischendampfverwertung in Entwicklung, Theorie und Wirtschaftlichkeit. Von Dr.-Ing. **Ernst Reutlinger**, Köln. Mit 69 Textfiguren. 1912. Preis M. 4,—.

Bau großer Elektrizitätswerke. Von Prof. Dr.-Ing. h. c., Dr. phil. **G. Klingenberg**, Geheimer Baurat.

I. Band: **Richtlinien für den Bau großer Elektrizitätswerke** (mit Wirtschaftlichkeitsrechnungen und Ausführungsbeispielen). Mit 180 Textabbildungen und 7 Tafeln. Unveränderter Neudruck. 1920. Gebunden Preis M. 60,—.

II. Band: **Verteilung elektrischer Arbeit über große Gebiete.** (Mit einer Baustatistik von Elektrizitätswerken und einer Arbeit über „Elektrizitätsversorgung der Großstädte“ als Ergänzung des I. Bandes) Mit 205 Textabbildungen. Unveränderter Neudruck. 1920. Gebunden Preis M. 56,—.

III. Band: **Das Kraftwerk Golpa.** Mit 127 Textabbildungen und 4 Tafeln. 1920. Gebunden Preis M. 30,—.
