

40247-i

TAGESFRAGEN AUS DER ZUCKERINDUSTRIE
HERAUSGEGEBEN VON
ING. DR. OSKAR WOHRYZEK
HEFT Nr. 9

WIRTSCHAFTLICHE
ABWÄRMEVERWERTUNG
IM DAMPFKESSELBETRIEB
DER ZUCKERFABRIKEN
UNTER
BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG
DES LUFTVORWÄRMERS
BAUART LJUNGSTRÖM

VON
Dipl. Ing. WILHELM GUMZ



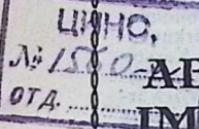
MAGDEBURG, 1931

Schallehn & Wollbrück Verlag

A
1834

S 92
TAGESSFRAGEN AUS DER ZUCKERINDUSTRIE
 HERAUSGEGEBEN VON
 ING. DR. OSKAR WOHRYZEK
 HEFT NR. 9

1930 : 212

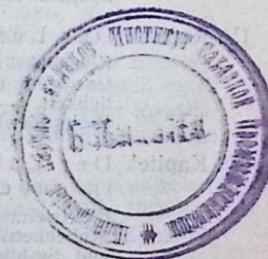


**WIRTSCHAFTLICHE
 ABWÄRMEVERWERTUNG
 IM DAMPFKESSELBETRIEB
 DER ZUCKERFABRIKEN**

UNTER
 BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG
 DES LUFTVORWÄRMERS
 BAUART LJUNGSTRÖM

VON
 Dipl. Ing. WILHELM GUMZ

ИАСГБ НААН
 № 40247 i



MAGDEBURG, 1931
 Schallehn & Wollbrück Verlag

INHALTSÜBERSICHT.

Vorwort. — Einleitung (Geschichtliches zur Luftvorwärmung).

I. Kapitel. Kesselbetrieb und Abwärmefragen in der Zuckerindustrie.

Dampfwirtschaft und Dampferzeugung in der Industrie. — Gesichtspunkte für den Kesselbetrieb und für seine Ökonomierung. — Wirtschaftlichkeitsberechnungen. — Kesselwirkungsgrad und Belastung. — Wirkungsgradcharakteristik. — Kesselneuanlagen und nachträgliche Verbesserung bestehender Anlagen. — Schnitzeltrocknung mit Rauchgasen oder Vorwärmung der Verbrennungsluft mit Rauchgasen? — Verwertung der Rauchgase in der Rohrzuckerindustrie.

II. Kapitel. Wesen und Wirkung der Luftvorwärmung.

Die Abwärmeverluste. — Verbrennung mit Heißluft. — Verbrennungsvorgänge in erhöhtem Temperaturniveau. — Feuerungstemperaturen. — Wärmestrahlung und Wasserumlauf. — Steigerung aller chemischen und physikalischen Reaktionen und Vorgänge beim Verbrennungsprozeß. — Vergasung. — Gasmischung (Sekundär Luft). — Schlackenbildung. — Untersuchung von der Puttens im Elektrizitätswerk der Stadt Brüssel über die Steigerung des Wirkungsgrades der Dampfkessel durch Luftvorwärmung. - Konstruktion der Feuerungen.

III. Kapitel. Die verschiedenen Systeme der Luftvorwärmung.

Rekuperativsystem (Wärmeübertragung durch eine Heizfläche), Regenerativsystem; Vor- und Nachteile beider in Bezug auf Wirkungsgrad und Raumbedarf. — Heizflächenverschmutzung und Verstopfung. — Korrosionen und Heizflächenzerstörung. — Lebensdauer und Betriebssicherheit.

IV. Kapitel. Der Luftvorwärmer Bauart Ljungström.

Konstruktionsprinzip — liegende und stehende Anordnung. — Gas- und Luftführung. — Einbau. — Reinigung. — Zugänglichkeit. — Ergebnisse der Zuckerraffinerie Göteborg (Schweden) mit Ljungström-Luftvorwärmern.

V. Kapitel. Der Luftvorwärmer Bauart Ljungström in anderen Industrien.

Elektrizitätswerke. — Montan-Industrien. — Braunkohlegrubenbetriebe und Brikettfabriken. — Ölraffinerien. — Eisen- und Stahlindustrie. — Cellulose-, Papier- und Holzindustrie. Lederindustrie.

VORWORT.

Es sei dem Herausgeber gestattet, sich die Begründung für das Sparenmüssen in der Zuckerindustrie zu ersparen: jede Begründung müßte nur diese traurige Notwendigkeit abschwächen. So wird, auch in allen Betrieben tatsächlich „gespart“, — aber es werden auch noch ebenso allgemein kostbare Energien verloren gegeben. Alle Ersparnisse an Mann und Material können im Vergleiche zu dem großen Ziele des Sparsen nur geringfügig sein; man muß ergiebigere Quellen erschließen. Auf der Suche nach solchen findet man eine in der Verschwendug, die noch immer mit der Verfeuerung unserer Brennmaterialien getrieben wird. (An die große Unwirtschaftlichkeit der Verfeuerung von Kohlen überhaupt am Roste soll hiebei gar nicht gedacht werden.) Daß man kaum 70% ihres Wärmeinhaltes im großen Durchschnitte nutzbar macht, gibt einen Fingerzeig dafür, wo es noch große Schätze zu bergen gibt.

Wie sachgemäß man immer den Kesselhausbetrieb führt, — die abziehenden Rauchgase enthalten noch immer große Werte an Energien und damit an Geld. Diese herauszuholen, hieße wirklich „sparen“.

Der Vorschlag, diese Wärme nutzbar zu machen, ist natürlich nicht neu; schon lange verwendet man sie mehr oder weniger rationell zu Überhitzung des Dampfes, zur Vorwärmung des Speisewassers, zur Trocknung von Rübenschmitzeln u. dgl. So erzielt man aber nur Teilerfolge, gemessen an dem, was aus den Rauchgasen noch herausgeholt werden könnte, bezw. in vielen Betrieben schon herausgeholt wird.

Auf seiner Studienreise: „Durch die dänische und schwedische Zuckerindustrie“ (Z. f. d. Zuckerind. d. tschl. Repbl. VIII, 1926/27, Heft 8 u. f.) lernte der Herausgeber dieser Hefte in der Zuckefabrik *Mariö* und in der Zuckerraffinerie *Göteborg* ein Verfahren kennen, die Verbrennungsluft mit den abziehenden Rauchgasen vorzuwärmen — ein Verfahren, das die Wirtschaftlichkeit der Dampferzeugung beider Betriebe wesentlich erhöht; das ist eine weitere Verwendungsmöglichkeit für die Rauchgase und, daß diese von allen Möglichkeiten die wirtschaftlichste ist, wird auf den folgenden Seiten begründet werden.

Was der Herausgeber an Ort und Stelle über das Verfahren erfuhr, veranlaßte ihn später, dieses Gebiet zunächst theoretisch und dann in seinen praktischen Auswirkungen für andere Industriezweige zu studieren. Damit faßte er aber auch den Entschluß, dieses Verfahren der heimischen Zuckerindustrie näher bekannt zu machen. Der Entschluß fiel ihm umso leichter, als er in Dipl. Ing. Wilhelm G um z den berufensten Fachmann fand, über das Gebiet der Luftvorwärmung im allgemeinen und über den Luftvorwärmer Bauart L j u n g s t r ö m im besonderen ausführlich zu berichten. (Für besondere Fälle, für ein tieferes Eindringen in dieses interessante Gebiet sei auf seine „[Die] Luftvorwärmung im Dampfkesselbetrieb“, Verlag Spamer, 1927, Neuauflage in Vorbereitung, verwiesen.)

Der Herausgeber hofft, durch die Aufnahme dieses Themas die „Tagesfragen“ bereichert und manchem Zuckertechniker einen Wink gegeben zu haben, wie und wo er seinen Betrieb wirtschaftlicher gestalten kann.

Dio sek, im März 1931.

Der Herausgeber.

EINLEITUNG.

Die Idee, die Verbrennungsluft vorzuwärmen, um dadurch die Verbrennung des Brennstoffes günstig zu beeinflussen, faßte schon James Watt, der Erfinder der Dampfmaschine. 1785 machte er bereits den Vorschlag, daß man die Verbrennungsluft durch oder über den glühenden Brennstoff leiten müsse, damit sie sich erwärme und die Verbrennung der brennbaren Gase erfolgreich bewirkt werden könne. Ihm folgten später andere Erfinder, die in der erwärmten Luft ein Mittel sahen, die Verbrennung rauch- und rußfrei zu gestalten. Erst im Jahre 1816 kam Robert Stirling der Gedanke, diese Vorwärmung durch die abziehenden Verbrennungsgase zu bewirken. Damit war das wärmeirtschaftlich so wertvolle Prinzip erfunden, das im letzten Jahrhundert seine technische Ausgestaltung fand. Trotz mancher Gegnerschaft (die es, wie jeder gute Gedanke, fand) setzte es sich siegreich durch. Engländer Neilson, Cowper, Howden), Deutsche (die Brüder Siemens), Schweden (Ljungström), Amerikaner (Marland, als einer der Ersten u. a.) arbeiteten an diesem wahrhaft internationalen Problem.

Obwohl schon James Howden die Luftvorwärmung durch Anwendung von künstlichem Zug (für Schiffsessel) ausgestaltete, blieb diese Errungenschaft für ortsfeste Anlagen unbenützt; sie arbeiteten also mit natürlichem Zug weiter. Aber in dem Maße, wie der künstliche Zug hier Erfordernis wurde, verbesserten sich die Voraussetzungen für die Ausbreitung und Entwicklung der Luftvorwärmung. Durch das schwedische Brüderpaar Fredrik und Birger Ljungström, das sich schon durch andere hervorragende Erfindungen bekannt gemacht hatte (eine Turbine, eine Turbolokomotive, ein Automobilgetriebe u. a.), fand die Luftvorwärmung eine mächtige Förderung. Besonders Fredrik Ljungström, der nach einem geeigneten Luftvorwärmer für die Turbolokomotive suchte, fand eine Lösung, die dann später auch für ortsfeste Anlagen verwandt wurde.

Die ersten Konstruktionen des Vorwärmers waren mit gleichzeitig eingebauten Schraubenventilatoren für Luft und Gas ausgerüstet und hatten vor allem den Nachteil, daß sie durch die Konstruktion ziemlich viel Platz beanspruchten und daß sie besonders im Vergleich mit anderen Bauarten ziemlich teuer waren. Im Ver-

laufe der Entwicklung wurden eine Reihe anderer Konstruktionen und konstruktiver Verbesserungen durchgeführt, bis man schließlich auf die im Hefte beschrieben heutige Form kam. Als der wichtigste Fortschritt darf die vor 2 bis 3 Jahren eingeführte Heizflächen-gestaltung betrachtet werden; gleichzeitig wurde die Trennung von Vorwärmer und Ventilatoren durchgeführt u. a., so daß ein Modell entstand, das an Wirkungsgrad und Betriebssicherheit Höchstes bietet.

So ist es begreiflich, daß innerhalb weniger Jahre fast 900 Ljungström-Luftvorwärmer in allen Industrien der ganzen Welt arbeiten. Von diesen wieder 29 in der Zuckerindustrie von Frankreich, Schweden, Dänemark, Südafrika, Süd- und Mittelamerika, der Vereinigten Staaten von Amerika und von Canada — davon die Mehrzahl in Betrieben der Rohrzuckerindustrie. Sollte dieser Umstand als Zeichen dafür aufzufassen sein, daß die Rohrzuckerindustrie die Rübenzuckerindustrie auch technisch überflügeln will...?

I. KAPITEL.

Kesselbetrieb und Abwärmefragen in der Zuckerindustrie.

Es gilt als allgemein anerkannte Tatsache, daß die Zuckerindustrie zu den wärmewirtschaftlich am höchsten entwickelten Industriezweigen zählt. Frühzeitig schon wurde hier die Kupplung der Kraft und Wärmeerzeugung durchgeführt und demgemäß ein spezif. Kohlenverbrauch je 100 kg verarbeitete Rüben erzielt, der Wirtschaftlichkeit, Erzeugungskosten und Konkurrenzfähigkeit ungeheuer steigerte. Dies ist aber um so wichtiger, als ja der Verkaufspreis von zwei in schärfstem Wettbewerb liegenden Erzeugergruppen, den Rüben und den Zuckerrohr verarbeitenden Fabriken, bestimmt wird. Soweit durch Preiskonventionen, Zölle und dergl. wenig veränderliche Standardpreise aufrecht erhalten werden, ist eine vernünftige Betriebs- und Wärmewirtschaft der Maßstab der Verdienstmöglichkeit.

In auffallendem Gegensatz zu der hoch entwickelten Dampfwirtschaft steht in vielen Betrieben noch die Dampferzeugung selbst — eine Erscheinung, die sich in zahlreichen anderen Industriezweigen und in allen, selbst industriell hoch entwickelten Ländern, wiederholt. Es gibt kaum einen lebhafteren Gegensatz als den Kesselbetrieb öffentlicher Elektrizitätswerke, wo der Kesselbetrieb eine dem Maschinenbetrieb gleichwertige Behandlung erfährt, und den Kesselbetrieb industrieller Anlagen, wo man ihn häufig als unangenehme Beigabe auffaßt und wertvolle und ergiebige Abwärmequellen vernachlässigt, obwohl technische Hilfsmittel zu ihrer Erfassung genügend zur Verfügung stehen.

In der Zuckerindustrie sind 3 Gesichtspunkte für den Kesselbetrieb von ganz besonderer Wichtigkeit:

1. Die geringe jährliche Betriebsstundenzahl der Rohzuckerfabrikation.
2. Die Brennstoff-Frage.
3. Die Lastschwankungen und die Elastizität der Feuerungen und Kessel.

Die beiden ersten Fragen sind bestimmend für die Festlegung der wirtschaftlichsten Abgastemperatur, eine Frage von einer bisher häufig unterschätzten Bedeutung. Vor 20 Jahren, als die normale Kesselanlage aus Kessel mit kleinem Ekonomiser und Schornstein

bestand, galt eine Abgastemperatur von 180 bis 200° als Grenze der Gasabkühlung und an dieser Zahl wird selbst heute noch festgehalten, während die Voraussetzungen längst gewandelt sind. Luftvorwärmer und Saugzusanlagen haben die wirtschaftlichste Abgastemperatur ganz wesentlich heruntergedrückt. Dieses wirtschaftliche Optimum der Gasabkühlung wird gefunden, indem man die Kosten für die Amortisation der Abwärmeverwertungsanlagen (Economiser und Luftvorwärmer) sowie der Zugerzeugungsanlagen (Saugzuganlage oder Schornstein) einerseits und die Betriebskosten (Brennstoffkosten und Stromverbrauch) andererseits addiert. Da, wo die Summe dieser Kosten ein Minimum zeigt, liegt die wirtschaftlichste Abgastemperatur, der Punkt, bei welchem die Dampferzeugungskosten unter Berücksichtigung aller Faktoren am niedrigsten sind. Von bedeutendem Einfluß sind dabei: Die Anschaffungskosten der in Frage kommenden Apparate, die Höhe der Amortisation und Verzinsung, die jährliche Betriebsstundenzahl, die Brennstoff- und die Stromkosten. Eine andere Voraussetzung ist dabei, daß die zur Verwendung kommenden Apparate selbst nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten entworfen sind; so gibt es z. B. bei Economisern und Luftvorwärmern jeweils nur eine Gas- und Luftgeschwindigkeit, bei welcher Heizflächenabmessungen (fallend mit wachsender Geschwindigkeit) und Betriebskosten, d. i. Druck- und Zugverluste (steigend mit wachsender Geschwindigkeit) bei gegebenen Betriebsverhältnissen richtig zu einem Optimum abgeglichen sind. Ähnliche Betrachtungen treffen auf die Aufteilung des Abwärmefälliges in Economisern und Luftvorwärmern zu. Bei Zusanlagen kann man durch die Wahl hoher Ausblasgeschwindigkeiten kleine, billige Ventilatoren aber schnellen Verschleiß erhalten, ohne daß damit zugleich wirtschaftliche Verhältnisse getroffen wären.

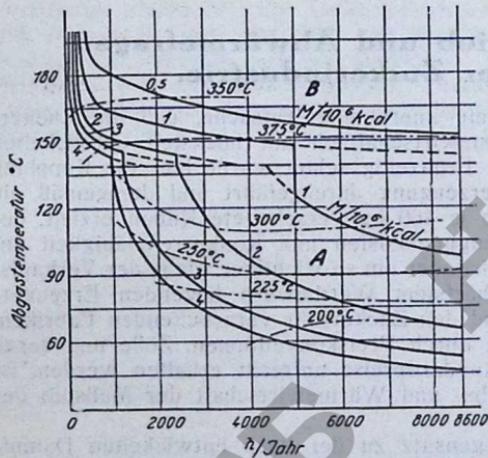


Abb. 1.

Wirtschaftlichste Abgastemperatur in Abhängigkeit von der Betriebsstundenzahl und dem Wärme preis

(Heißluft-Isothermen strichpunktiert)

Feld A:

Gebiet der Economiser und Luftvorwärmer

Feld B:

Gebiet der Luftvorwärmer allein

schaftlichen Gesichtspunkten entworfen sind; so gibt es z. B. bei Economisern und Luftvorwärmern jeweils nur eine Gas- und Luftgeschwindigkeit, bei welcher Heizflächenabmessungen (fallend mit wachsender Geschwindigkeit) und Betriebskosten, d. i. Druck- und Zugverluste (steigend mit wachsender Geschwindigkeit) bei gegebenen Betriebsverhältnissen richtig zu einem Optimum abgeglichen sind. Ähnliche Betrachtungen treffen auf die Aufteilung des Abwärmefälliges in Economisern und Luftvorwärmern zu. Bei Zusanlagen kann man durch die Wahl hoher Ausblasgeschwindigkeiten kleine, billige Ventilatoren aber schnellen Verschleiß erhalten, ohne daß damit zugleich wirtschaftliche Verhältnisse getroffen wären.

Abb. 1 zeigt das Ergebnis derartiger Wirtschaftlichkeitsberechnungen, die folgendes erkennen läßt:

Je geringer die jährliche Betriebsstundenzahl ist, um so höher liegt die zu wählende Abgastemperatur, umgekehrt liegt sie um so tiefer, je höher die Brennstoffkosten sind. In einer Zuckerfabrik mit kurzer Kampagne liegt die Betriebsstundenzahl beispielsweise in der Größenordnung von nur 2000 Stunden pro Jahr. Der Kohlenpreis dagegen ist im allgemeinen sehr hoch, da die Ansiedlung der Zuckerfabriken in der Nähe des Rübenbaus und unabhängig der Lage des Brennstoffversorgungsgebietes erfolgen muß. Rechnet man also mit einem Wärmepreis von $3 \text{ Mk}/10^6 \text{ kcal}$, so ergibt sich eine Abgastemperatur von nur ungefähr 100° als wirtschaftliche Größe. Zugleich zeigt Abb. 1, daß zur Erreichung dieser Temperatur eine Hintereinanderschaltung von Ekonominern und Luftvorwärmern zu empfehlen ist. Natürlich gilt diese Feststellung mit den notwendigen Einschränkungen; so z. B. dürfen bei der Verfeuerung feuchter Brennstoffe (Rohbraunkohle) Abgastemperaturen von 130 bis 150° mit Rücksicht auf den Taupunkt der Abgase nicht unterschritten werden.

Was endlich den Gesichtspunkt größtmöglicher Elastizität von Kessel und Feuerung und den Wirkungsgrad bei den verschiedenen Belastungen betrifft, so liegen hier Verhältnisse vor, die einerseits durch die Vergrößerung der dem Kessel nachgeschalteten Heizfläche, — andererseits durch die Einwirkung der Luftvorwärmung selbst wesentlich begünstigt werden. Abb. 2 zeigt den Verlauf des Kesselwirkungsgrades in Abhängigkeit von der Belastung. Bei wenig nachgeschalteter Heizfläche macht sich nach Erreichen eines gewissen Höchstwertes ein sehr schneller Abfall bemerkbar, der umso mehr in Erscheinung tritt, je kleiner die Kesselanlage ist; bei unendlich großer Heizfläche dagegen würde die Kurve eine stetige Steigung mit zunehmender Belastung aufweisen. Kesselanlagen mit Ekonominern und Luftvorwärmern mit ziemlich viel nachgeschalteter Heizfläche (Mehraches der Kesselheizfläche selbst) zeigen demnach eine Wirkungsgradcharakteristik nach Kurve 2, d. h., eine über einen großen Belastungsbereich ziemlich konstante Kurve. Durch den Einfluß der Luftvorwärmung auf den Verbrennungsvorgang wird dieser Verlauf noch wesentlich unterstützt, so daß ein so günstiger Wirkungsgrads-

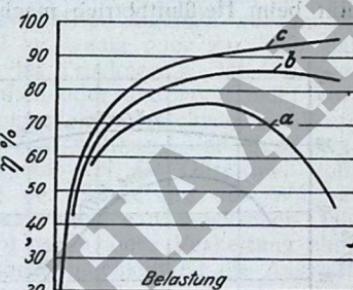


Abb. 2.
Abhängigkeit des Kesselwirkungsgrades von der Belastung
a) bei wenig nachgeschalteter Heizfläche
b) bei viel nachgeschalteter Heizfläche
c) bei unendlich großer Heizfläche

verlauf, wie ihn das praktische Beispiel der Abbildung 3 aufweist, resultiert.

Das Zusammenwirken von Unterwind, Saugzug und Heißluft gestattet eine so plötzliche Leistungsverschiebung durch eine einfache Betätigung am Schaltpult, daß jede auftretende Belastungsspitze ohne Speicher feuerseitig aufgenommen werden kann, insbesondere dann, wenn die Feuerungen durch zweckentsprechende, zonenweise unterteilte Luftzuführung eine genaue Beherrschung und Leitung des Verbrennungsvorganges gestatten. Diese große Elastizität beim Heißluftbetrieb macht sich aber nicht nur beim Lastwechsel, sondern ganz besonders auch beim Hochfahren kalter Kessel bemerkbar, der Beharrungszustand wird in wesentlich kürzerer Zeit erreicht und die zusätzlichen Brennstoffverluste beim Anheizen entsprechend vermindert. Für die Betriebsbereitschaft des Kesselhauses sind diese Fragen von beachtenswerter Bedeutung.

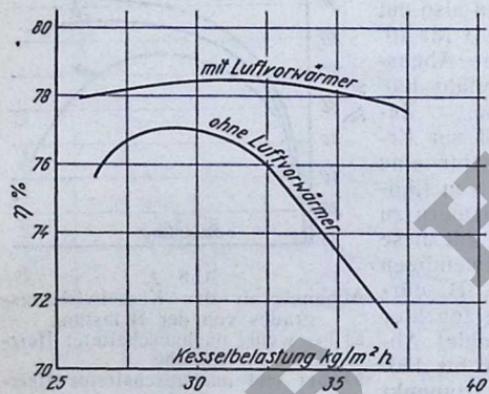


Abb. 3.
Abhängigkeit des Kesselwirkungsgrades von
der Belastung bei einer Anlage mit und ohne
Luftvorwärmer

Galten diese Ausführungen zunächst für Kesselneuanlagen, so lassen sich diese Gesichtspunkte größtentils auch auf d. nach-

trägliche Verbesserung bestehender Anlagen anwenden. Selbstverständlich sind dabei die bestehenden Verhältnisse: Art und Alter der Kessel und Feuerungen, Brennstoff und Platzverhältnisse am besten durch sachverständige Überprüfung an Ort und Stelle zu berücksichtigen. In vielen Fällen sind dabei kleine Änderungen an den Feuerungen, wie z. B. Verbesserung der Luftzuführung und Luftzuteilung, Vergrößerung der Wärmeabstrahlung durch Kürzung überflüssig langer Zündgewölbe und dergl., sehr zweckmäßig und für den Erfolg ausschlaggebend. Der nachträgliche Einbau von Luftvorwärmern und Zugverstärkungsanlagen bietet aber neben der Wirkungsgradsverbesserung die Möglichkeit außergewöhnlicher Leistungssteigerungen, die einem etwa bestehenden Dampfmangel ohne Neuinvestierung an Kesseln und Feuerungen abhelfen oder die gewünschte Dampflieferung mit einer geringen Kesselzahl erzielen, wodurch sich die Gesamtverluste vermindern und eine frei verfügbare Kesselreserve geschaffen wird.

In der Zuckerindustrie besteht nun jedoch noch eine andere, häufig in Anspruch genommene Möglichkeit zur Ausnutzung der Abgaswärme: Die Schnitzeltrocknung. Eine so weit gehende Abwärmeausnutzung durch Economiser und Luftvorwärmer verdrängt die Schnitzeltrocknung aus dem Kesselbetrieb, die nunmehr mit Dampf vorzugsweise mit Abdampf oder Warmwasser erfolgt. Vergleicht man beide Trocknungsarten miteinander, so bietet sich folgendes Bild. Durch die Schnitzeltrocknung mit Abgas wird Trocknungsbetrieb und Kesselbetrieb gekuppelt und, um eine möglichst vollkommene Ausnutzung der Abwärme zu erhalten, muß der Trocknungsbetrieb dauernd dem Kesselbetrieb angepaßt werden. Ist dies nicht der Fall, sondern einmal zu wenig oder gar kein, das andere Mal zu viel Trocknungsgut im Trockner, so ist entweder die Abwärmeausnutzung unvollkommen oder überhaupt nicht vorhanden, das andere Mal die Trocknung nicht ausreichend, die Ware infolgedessen ungleichmäßig und wenig haltbar. Von den wegfällenden Rückwirkungen der Warmluft auf die Güte und Vollkommenheit der Verbrennung und der Steigerung der Wärmeübertragung im Kessel sei dabei noch einmal ganz abgesehen. Die Betriebsführung und Bedienung wird durch diese Verkettung ohne Zweifel erschwert. Eine andere Unannehmlichkeit ist die Auswahl der verfeuerten Kohle, die weder zu stark rüßen und stauben darf, noch zu viel Schwefel enthalten soll, da sonst das Trockengut verschmutzt, minderwertiger und schwer verkäuflich wird. Eine Wareverschlechterung kann auch leicht durch die zu hohen Trockengastemperaturen und das damit verbundene Ansengen der Schnitzel bedingt sein. Diese Rücksichtnahmen, die wiederum eine um so schwierigere Bedienung erfordern, je stärker die Kesselbelastung schwankt, erschweren nicht nur die Brennstoffauswahl und engen die in Frage kommenden Kohlensorten stark ein, sie bedingen auch durch die Forderungen an den Kohlenlieferanten eine vielleicht nicht unwesentliche Verteuerung, und machen eine scharfe Überwachung der Kohlenlieferungen erforderlich. Die Möglichkeit minderwertigere, im Wärmepreis meist günstigere Brennstoffe zu verfeuern, was mit Luftvorwärmung mit ausgezeichnetem Wirkungsgrad möglich ist, scheidet damit ganz aus.

Demgegenüber ist die Trocknung mit Dampf wesentlich einfacher, sehr leicht regelbar und, ohne Verluste zu verursachen, nach Belieben an- und abzustellen. Die Trocknung wird damit zu einem vom Kesselhausbetrieb unabhängigen Betriebsvorgang, der im Gegenteil zu einer Milderung der auftretenden Dampf spitzen herangezogen werden kann. Die gleichmäßig, gut und bei niedriger Temperatur getrocknete Ware, die lediglich mit reiner Luft in Berührung gekommen ist, ist daher wesentlich hochwertiger, leichter und besser verkäuflich und verträgt selbst längere Transporte. Diese Art der Schnitzeltrocknung ist daher vom Standpunkt der Gesamtwirtschaft der Fabrik sicherlich vorteilhafter, zumal die Luftvorwärmung ein Mittel an die Hand gibt, eine sehr wirtschaft-

liche und vollkommene Wärmeausnutzung im Kesselbetrieb zu ermöglichen.

Anders geartet liegen die Verhältnisse in der Rohrzucker-industrie. Hier dient vorwiegend die Bagasse als Brennstoff, die als Abfallprodukt keinen Verkaufswert besitzt. Das Bestreben der Fabriken geht dahin, den gesamten Wärmebedarf aus der Bagasse zu decken, was jedoch nur in wärmewirtschaftlich gut durchgebildeten Betrieben möglich ist. Andernfalls ist eine zusätzliche Verfeuerung von Kohle notwendig, was die Wirtschaftlichkeit um so empfindlicher beeinträchtigt, als die Kohlenkosten sehr hoch und die Beschaffung schwierig ist, während für die Kohle zudem besondere Feuerungen, bzw. Zusatzfeuerungen notwendig werden. Die Einführung der Luftvorwärmung in einigen südafrikanischen und südamerikanischen Fabriken hat den Beweis erbracht, daß die Verbrennung dieses minderwertigen Abfalls so wesentlich verbessert und der Wirkungsgrad soweit gesteigert werden konnte, daß der gesamte Wärmebedarf ohne Schwierigkeiten gedeckt wurde.

II. KAPITEL.

Wesen und Wirkung der Luftvorwärmung.

Die Wirkung der Luftvorwärmung im Wärmeerzeugungs- und Übertragungsprozeß einer Dampfkesselanlage ist eine überaus vielfältige, eingeleitet durch die Rückführung eines mehr oder weniger großen Anteils der fühlbaren Wärme der Abgase in den Verbrennungsprozeß. Die Abwärmerückgewinnung ist somit der primäre Vorgang, der eine Reihe anderer Vorgänge auslöst, die in ihrer Gesamtheit zu der nutzbaren Verwertung der wiedergewonnenen Wärme und zum sichtbaren Erfolg der Luftvorwärmung beitragen. Die Abwärmeverluste bilden heute immer noch die größte Verlustquelle im Dampfkessel - Betrieb. Hier ist der Hebel anzusetzen. Dabei reichen die bisher verwendeten Mittel — die Speisewasser-Vorwärmer — durchaus nicht immer aus, zumal sie sowohl gasseitig als auch wasserseitig an ganz bestimmte Temperaturgrenzen gebunden sind. Die Abwärmeverluste in % des Heizwertes des aufgegebenen Brennstoffes lassen sich recht genau (wesentlich genauer als mit der bisher meist gebräuchlichen Siegert'schen Formel) durch die folgende Gleichung erfassen: *)

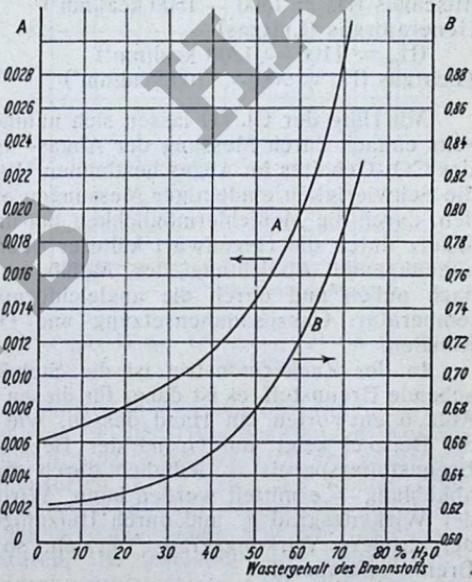


Abb. 4.
Beiwerte A und B der Gleichung (1) für feuchte
Brennstoffe

$$Q = \left(A + \frac{B}{CO_2} \right) (t_g - t_i) \dots \dots \dots (1)$$

*) Vergl. „Feuerungstechnik“ XVII (1929), 10 u. 11, S. 109/12 u. 123/25.

und die Verluste durch unvollkommene Verbrennung (CO-Verluste) durch die Gleichung:

$$Q_u = \frac{C \cdot CO}{CO_2 + CO} (\%) \dots \dots \dots \quad (2)$$

Die Konstanten A, B und C der Gl. (1) und (2) können der nachstehenden Zahlentafel 1, für feuchte Brennstoffe, wie z. B. Rohbraunkohle, den Abb. 4 und 5 entnommen werden.

Zahlentafel 1.

Brennstoff	A	B	C
Steinkohle	0,00510	0,6281	60,345
Braunkohlenbrikett mit 15% H ₂ O	0,00747	0,626	60,4
Rohbraunkohle mit 50% H ₂ O	0,01459	0,680	65,5
Rohbraunkohle mit 60% H ₂ O	0,0194	0,720	69,3
Heizöl	0,0063	0,497	47,987
Reichgas (H _u = 4000 — 6000 kcal/nm ³)	0,0106	0,3263	31,395
Mischgas (H _u = 1300 — 1500 kcal/nm ³)	0,0093	0,748	71,986
Generatorgas (Luftgas) (H _u = 1100 — 1200 kcal/nm ³)	0,0073	0,859	82,648
Gichtgas (H _u = 900 — 1100 kcal/nm ³)	0,0024	1,17	112,571

Mit Hilfe der Gl. (1) lassen sich nunmehr die Abwärmeverluste sehr einfach durch Messung der Abgas- und Lufttemperatur, sowie des CO₂-Gehaltes im Abgas bestimmen. Es muß allerdings dabei auf die Schwierigkeit eindeutiger Messungen aufmerksam gemacht werden, durch die Meßfehlermöglichkeit bei ungenügendem Strahlungsschutz durch die Gegenwart kälterer oder heißerer Flächen, durch ungenügende Abdichtung der Meßlöcher durch Wärmeableitung nach außen und durch die ungleichförmige Verteilung von Gas-temperatur, Gaszusammensetzung und Gasströmung in größeren Kanälen.

In der Zuckerindustrie ist die Steinkohle der meist vorherrschende Brennstoff, es ist daher für diesen Brennstoff das Diagramm Abb. 6 entworfen, an Hand dessen, wie der eingezeichnete Pfeil als Beispiel zeigt, auf Grund der Bezeichnungen der Gl. (1) die Brennstoffersparnis — lediglich durch die verbesserte Rauchgas-abkühlung — ermittelt werden kann. Wird in einem Kesselaggregat der Wirkungsgrad η und durch Hinzufügen eines Luftvorwärmers der größere Wirkungsgrad η' erzielt, so beträgt die gewonnene Brennstoffersparnis

$$\epsilon = 1 - \frac{\eta}{\eta'} \dots \dots \dots \quad (3)$$

d. h., also eine Verbesserung von 70% auf 80% bedeutet eine Brennstoffersparnis von $1 - \frac{0,70}{0,80} = 0,125 = 12,5\%$.

Sehr wesentlich für die Wirkung der Luftvorwärmung ist nun die Frage, was mit der in Form von Heißluft zurückgeführten

Wärme geschieht und welche Veränderungen und Rückwirkungen in der Feuerung und im Kessel selbst eintreten. Die Verbrennung mit Heißluft bedeutet, daß der Feuerung mehr Wärme zugeführt wird, daß ein entsprechend größerer Betrag an Wärme entwickelt wird und daß sich alle Vorgänge in der Feuerung in einem etwas erhöhten Temperaturniveau abspielen. Dadurch wird zunächst die Wärmeabgabe der Brennstoffsicht, der Flamme u. der heißen, den Feuerraum erfüllenden Gase gesteigert, da ja bekanntlich der Wärmeaustausch fester Körper durch Strahlung mit der vierten Potenz der absoluten Temperaturen, derjenige der Flammen u. Gase nach anderen verwickelten Temperaturfunktionen zunehmen. Die Wärmeabgabe durch Strahlung ist außerdem um so größer, je größer die Oberfläche des abstrahlenden Flammenkörpers ist, sie

ist daher bei gasreichen Brennstoffen und bei der räumlich auseinandergezogenen Verbrennung bei den Düsenfeuerungen (Kohlenstaub-, Öl- und Gasfeuerungen) ganz besonders groß, bei gasarmen, z. B. anthrazitischen Kohlensorten, Koks usw., auf Rosten ohne große Flammenentwicklung geringer; die Verbrennungstemperaturen solcher Brennstoffe liegen entsprechend höher. Für die Berechnung der Verbrennungstemperaturen, die Zunahme der theoretischen Verbrennungstemperatur durch vorgewärmte Luft, die stets bedeutend geringer ist als die Lufttemperatursteigerung, sowie für die Berechnung der wirklichen Verbrennungs- und Feuerraumtemperaturen, deren Steigerung durch den vergrößerten Einfluß der Abstrahlung noch weiter begrenzt wird, bedient man sich vorteilhaft des It-Diagramms, welches die Verhältnisse am einfachsten zu lösen und am anschaulichsten darzustellen gestattet.*.) Einen Begriff über

*.) Siehe Gumz: „Feuerungstechnisches Rechnen“, Leipzig 1931, Verlag O. Spamer.

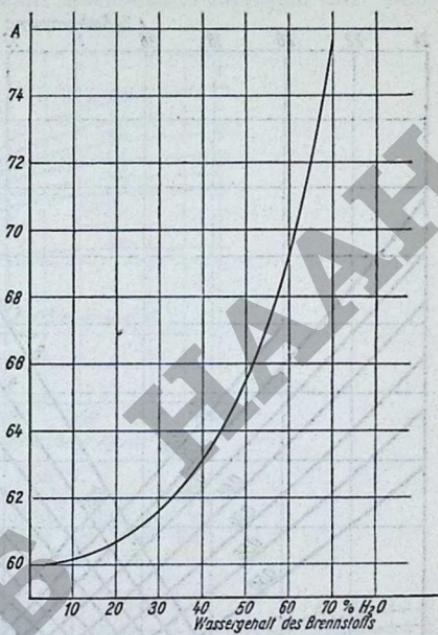


Abb. 5.
Beiwert C der Gleichung (2) für feuchte
Brennstoffe

die Größenordnung der Feuerungstemperaturen geben die Abb. 7—9, die für einen Feuerraum üblicher Ausführung errechnet sind für Lufttemperaturen von 0°, 200° und 400° C. Natürlich ist der Einfluß der Rostbelastung und des Luftüberschusses dabei vor allem sehr

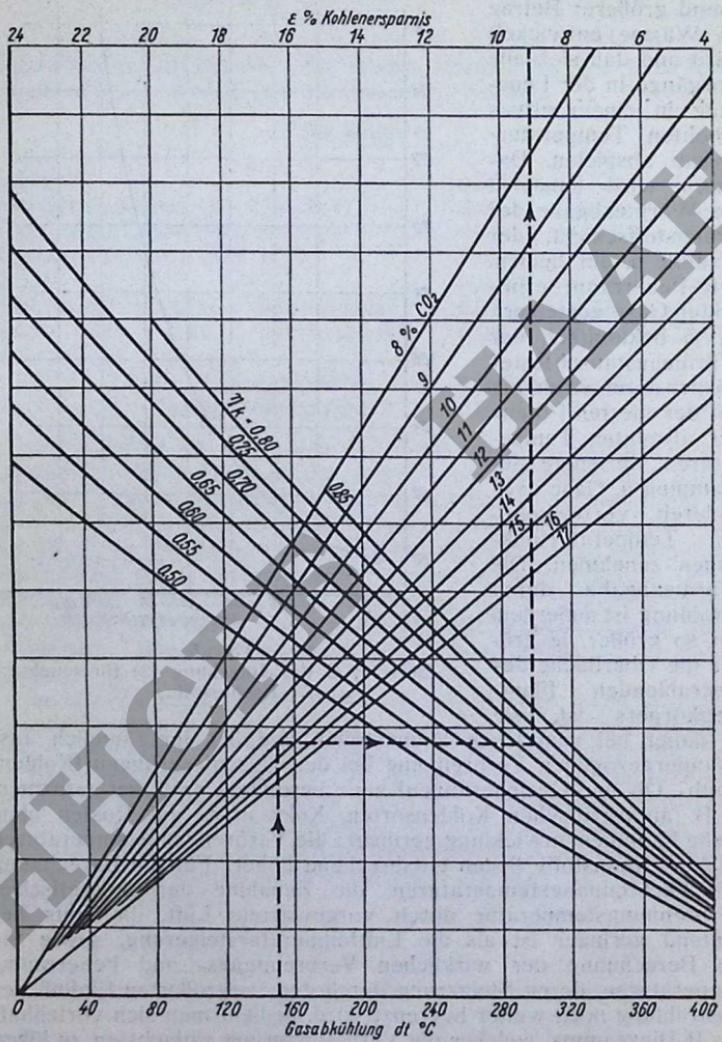


Abb. 6.
Diagramm zur Bestimmung der Kohlenersparnis in Abhängigkeit
von der Gasabkühlung

groß. Man ersieht auch, daß die Furcht vor zu großen Temperatursteigungen unbegründet ist, häufig ergibt eine Verminderung des Luftüberschusses (Erhöhung des CO_2 -Gehaltes) noch ganz andere Temperaturanstiege! Einen Grenzfall stellt gewissermaßen die Kohlenstaubfeuerung mit allseitig gekühltem Feuerraum dar. Man

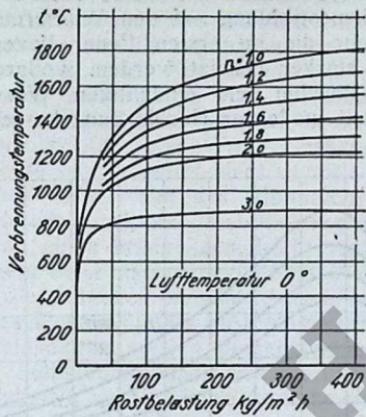


Abb. 7.
Feuerraumtemperaturen in Abhängigkeit vom Luftüberschuß und von der Rostbelastung bei einer Lufttemperatur von 0°C .

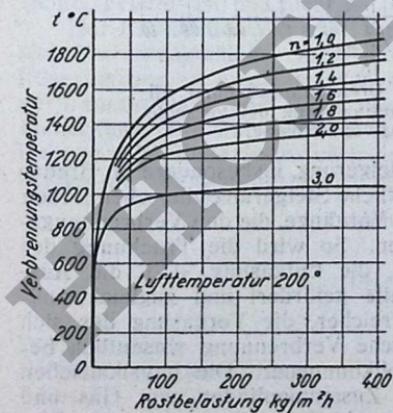


Abb. 8.
Feuerraumtemperaturen in Abhängigkeit vom Luftüberschuß und von der Rostbelastung bei einer Lufttemperatur von 200°C .

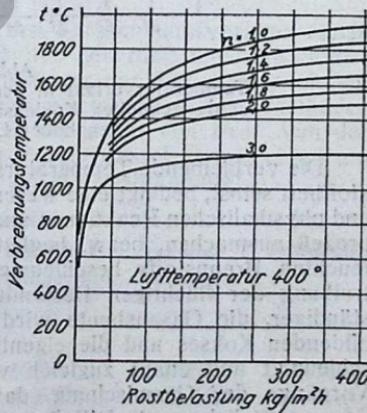


Abb. 9.
Feuerraumtemperaturen in Abhängigkeit vom Luftüberschuß und von der Rostbelastung bei einer Lufttemperatur von 400°C .

erkennt aus der Abb. 10, daß die Abstrahlung hier außerordentlich wirksam ist, so daß Lufttemperaturlbeschränkungen hier garnicht bestehen. Bis zu 88% der durch die Heißluft eingeführten Wärmemenge wird sofort wieder durch Strahlung abgeführt, so daß sich am Ende des Feuerraumes nur eine ganz geringe Temperatursteigerung bemerkbar macht. — Sehr vorteilhaft wirkt diese Erhöhung der Wärmestrahlung auf den Wasserumlauf der Kessel ein, indem nunmehr die im ersten Feuer liegenden Steigrohre unverhältnismäßig stärker beheizt werden, wodurch die Aufrechterhaltung eines schnellen und eindeutigen Wasserumlaufs, eine Lebensnotwendigkeit moderner Hochleistungskessel, sehr gefördert wird.

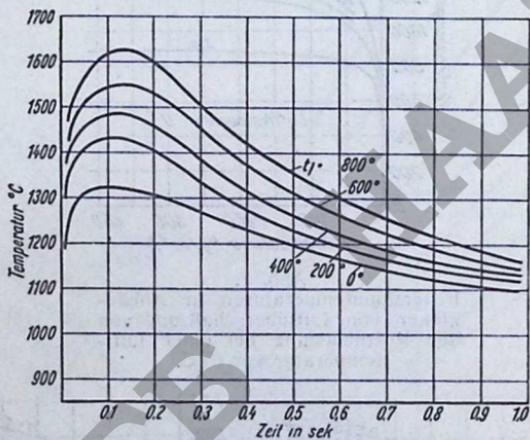


Abb. 10.

Temperaturverlauf in der Brennkammer einer allseitig gekühlten Kohlenstaubfeuerung bei verschiedenen hoher Luftvorwärmung.

Die verbleibende Temperatursteigerung, insbesondere im Brennstoffbett selbst, bedingt eine wesentliche Steigerung aller chemischen und physikalischen Reaktionen und Vorgänge, die den Verbrennungsprozeß ausmachen, bzw. begleiten. So wird die Trocknung des feuchten Brennstoffs beschleunigt, die Entgasung, d. i. die Ausreibung der flüchtigen Bestandteile gefördert und zugleich vollständiger, die Gasausbeute wird reicher, die Vergasung des sich bildenden Kokses und die eigentliche Verbrennung wesentlich beschleunigt und damit zugleich vollkommener. Die physikalischen Vorgänge der Gasmischung, das Zusammenfinden von Gas und Sauerstoffteilchen, die Diffusion verschiedener Gasarten, besonders die Heranförderung des Verbrennungssauerstoffes an die festen Kohlenstoffpartikel, sowie die mechanische Turbulenz werden in gleicher Weise erhöht. Das Ergebnis ist eine Beschleunigung aller Vorgänge im Feuerbett, eine lebhafte Gasbildung und Verbren-

nung, eine Verbesserung des Ausbrandes und eine Vermeidung des Auftretens unverbrannter Gasbestandteile. Im allgemeinen gestatten diese Vorteile zugleich eine Verminderung des notwendigen Luftüberschusses. Die sehr schnell und lebhaft einsetzende Vergasung läßt es besonders bei gasreichen Brennstoffen als sehr zweckmäßig erscheinen, über dem Brennstoffbett Sekundärluft zuzusetzen, wobei dem Konstrukteur ein gutes Hilfsmittel an die Hand gegeben ist, durch die Art der Zweitluftzuführung eine intensive Verwirbelung von Gas und Luft im Feuerraum und eine entsprechende Flammenverkürzung zu erzielen. Die Beschleunigung des Entgasungsvorganges muß indessen bei stark backenden Kohlensorten durch entsprechende Luft- und Wärmezufuhrregulierung (Zonen-einteilung der Roste sehr zu empfehlen) so weit verzögert werden, daß ein möglichst großer Teil des Ölbitumens durch langsames Erhitzen abgeschwelt wird, um das Bilden größerer Kokskuchen zu verhindern und einen bröckeligen, leicht reagierenden Koks zu erhalten. Hier liegt die Entscheidung über die erzielbare Güte des Ausbrandes, für die, entgegen mancher Ansichten, die Vorgänge im vorderen Teil des Rostes bereits ausschlaggebend sind. Die Vorgänge der Verschlackung spielen demgegenüber nur eine untergeordnete Rolle. Selbstverständlich ist es notwendig, sich über die Schlackenschmelzkurve (einen Schlackenschmelzpunkt gibt es ja bei den wenigsten Brennstoffen) und über das Verhalten der Schlacke während des Verbrennungsvorganges Rechenschaft abzulegen. Schlackenbildung ist indessen nichts Ungewöhnliches und tritt in den meisten Feuerungen, auch bei kalter Luft ein, sie ist kein Hindernis für die Erzielung eines guten Ausbrandes, wenn sie richtig geleitet ist und nicht zu früh einsetzt.

Der Einfluß der Warmluft auf den Verbrennungsvorgang macht sich bei zweckmäßiger Ausbildung der Feuerung und umsichtiger Feuerführung in einem starken Rückgang der Verluste durch unverbrannte Gase und durch Unverbranntes in den Rückständen bemerkbar. Die Zahlentafel 2 nach Versuchen von Prof. Van der Putten im Elektrizitätswerk der Stadt Brüssel kennzeichnet am besten die Einflüsse der Warmluft auf die Verbrennung:

Zahlentafel 2.

	Versuch 1	Versuch 2	Differenz
	Ohne Luftvorwärmung, Feuerung im alten Zustand.	Mit Luftvor- wärmung Feuerung umgebaut.	
Wirkungsgrad			
Kessel und Überhitzer	58,9%	75,6%	+ 16,7
Kessel	51,0%	66,3%	+ 15,3
Überhitzer	7,9%	9,3%	+ 1,4
Verluste durch Unverbranntes in den Rückständen	9,3%	3,4%	- 5,9
Abwärme-Verluste	23,2%	10,5%	- 12,7
Restverluste	8,6%	10,5%	+ 1,9

Der erwähnte Umbau der Feuerung bestand in einer Feuerraumvergrößerung, die in diesem Fall nur durch eine Neigung des Rostes nach hinten möglich war, einer Verkürzung des Zündgewölbes und einer Zoneneinteilung (3 Zonen) des vorhandenen Unterwindwanderrostes.

Wir haben gesehen, daß als Endergebnis der Einwirkungen der Luft in der Feuerung noch eine meist nicht sehr bedeutende Erhöhung der Gastemperatur beim Eintritt in den eigentlichen Kessel übrig bleibt. Diese Gastemperaturerhöhung trägt natürlich zu einer entsprechenden Erhöhung der mittleren Temperaturdifferenz, der mittleren Gastemperatur, Gasgeschwindigkeit und Wärmeübergangszahl durch Gasstrahlung und durch Konvention und im Zusammenwirken dieser Faktoren zu einer Erhöhung der Kesselleistung bei. Die höhere Anfangstemperatur hat ferner auf die Form der Gasabkühlungskurve insofern einen Einfluß, als sie zu einem steileren Abfall der Gastemperatur im ersten Teil der Heizfläche führt, so daß leicht Abgastemperaturen am Kesselende auftreten, die tiefer liegen als bei niedrigerer Eintrittstemperatur. Dies ist indessen auch von der Größe der Heizfläche und der Länge des Rauchgasweges abhängig.

Diese zahlreichen und vielfältigen Rückwirkungen des Heißluftbetriebes auf die Feuerung haben zur notwendigen Folge, daß man auch die Konstruktion der Feuerungen den veränderten Umständen anpaßt. Die größere Wärmezufuhr zur Feuerung gestattet auch eine größere Wärmeabfuhr von der Feuerung, d. h., die Feuerung kann zur kalten Heizfläche weiter geöffnet, die Zündgewölbe können verkürzt oder ganz weggelassen werden, und Vorfeuerungen können weiter unter den Kessel geschoben werden als bei kalter Luft. Daraus ergeben sich Ersparnisse an Raum und Grundfläche, Wegfall von teurem, feuerfesten Mauerwerk und vereinfachter Feuerungsaufbau. Bei nachträglichem Einbau von Luftvorwärmern sind solche Änderungen meist schwierig, aber in gewissem Maße doch wohl durchführbar. Auf den Wert einer Zoneneinteilung der Roste wurde bereits hingewiesen.

III. KAPITEL.

Luftvorwärmer verschiedener Systeme.

Zur Abwärmeausnutzung und zur Luftvorwärmung stehen verschiedene Hilfsmittel zur Verfügung. Es sind hier in erster Reihe zu nennen: Röhrenluftvorwärmer und Taschenluftvorwärmer, beides Bauarten des sogenannten Rekuperativsystems (Wärmeübertragung durch eine Heizfläche), sowie Regenerativluftvorwärmer, als deren Repräsentant der Luftvorwärmer Bauart Ljungström zu nennen ist. Um sich ein Bild über die Vor- und Nachteile dieser verschiedenen Bauarten machen zu können, genügt es, 3 Punkte hervorzuheben, die den Mittelpunkt des baulichen und betrieblichen Erfahrungsmaterials der letzten Jahre auf dem Gebiet der Luftvorwärmer bilden:

1. Wirkungsgrad und Raumbedarf,
2. Heizflächenverschmutzung und Verstopfung,
3. Korrosion und Heizflächenzerstörung (Lebensdauer und Betriebssicherheit).

Die Wirksamkeit eines Luftvorwärmers hängt nicht allein von den vorliegenden Temperaturverhältnissen, sondern auch von dem Mengenverhältnis zwischen Gas und Luft ab; zur Festlegung eines Luftvorwärmereigenschaftsgrades bedarf es daher einer Zusammenfassung der gasseitigen, wie auch der luftseitigen Verhältnisse. Definiert man als „gasseitigen Wirkungsgrad“

$$\eta_g = \frac{t_{g_1} - t_{g_2}}{t_{g_1} - t_{l_1}} \quad (4)$$

und analog als „luftseitigen Wirkungsgrad“

$$\eta_l = \frac{t_{l_2} - t_{l_1}}{t_{g_1} - t_{l_1}} \quad (5)$$

so ist dann der „mittlere Wirkungsgrad“ definiert als das arithmetische Mittel aus η_g und η_l oder

$$\eta_m = \frac{\eta_g + \eta_l}{2} = \frac{t_{g_1} - t_{g_2} + t_{l_2} - t_{l_1}}{2(t_{g_1} - t_{l_1})} \quad (6)$$

Ein Zahlenbeispiel wird die Bedeutung des mittleren Wirkungsgrades am besten erläutern und die Unterschiede der einzelnen Bauarten am besten in Erscheinung treten lassen.

Die Rauchgastemperatur beim Eintritt in den Luftvorwärmer betrage $t_{g_1} = 320^\circ$, beim Austritt dagegen $t_{g_2} = 200^\circ$, und das Verhältnis der Wasserwerte von Luft zu Gas betrage

$$\frac{L \cdot c_p}{G \cdot c_p} = \frac{p_1}{p_2} = 0,85, \quad (7)$$

also 1° Luftaufwärmung $= 0,85^\circ$ Gasabkühlung (gültig für die Verhältnisse bei Steinkohle von 7000 kcal/kg Heizwert und 12% CO_2 am Kesselende, 13% CO_2 in der Feuerung). Dann entspricht der angenommenen Gasabkühlung von 120° , einer Luftaufwärmung von

$$\frac{120}{0,85} = 140^\circ, \text{ also z. B. } t_{l_1} = 20^\circ, t_{l_2} = 160^\circ.$$

Es ist nunmehr nach Gl. (4)

$$\eta_g = \frac{320 - 200}{320 - 20} = 0,400$$

nach Gl. (5)

$$\eta_l = \frac{160 - 20}{320 - 20} = 0,466$$

folglich

$$\eta_m = \frac{40 + 46,6}{2} = 43,3\% \text{ (Fall 1)}$$

Kühlt man dagegen dasselbe Gas von 320 auf 155° ab, wobei sich die Luft von 20 auf 214° erwärmt, so ist

$$\eta_g = 55,0\%, \eta_l = 65,0\%, \eta_m = 60,0\% \text{ (Fall 2).}$$

Bei Abkühlung auf $t_{g_2} = 110^\circ$, dagegen ist

$$\eta_g = 70,0\%, \eta_l = 82,4\%, \eta_m = 76,2\% \text{ (Fall 3).}$$

Sehr interessant ist die konstruktive Ausbildung der einzelnen Vorwärmer für verschieden hohe Vorwärmerwirkungsgrade, wobei darauf hingewiesen sei, daß in den Anfängen der Warmluftverwendung im Kesselbetrieb nur mit außerordentlich niedrigen und daher auch nur wenig wirtschaftlichen Vorwärmerwirkungsgraden gearbeitet wurde. Heute macht sich in Erkenntnis ihres wirtschaftlichen Wertes allgemein eine Tendenz zu höheren Wirkungsgraden bemerkbar. Zahltentafel 3 gibt eine vergleichende Übersicht für die 3 bereits durch ihre Temperaturgrenzen gekennzeichneten Fälle: 1 bis 3 mit 200° , 155° und 110° Abgastemperatur für 3. Vorwärmerbauarten für einen 500 m^2 -Kessel an:

Zahlentafel 3.

	Heizfläche m ²	gas. u. luft- seitiger Wi- derst. mmWS	Σ	Bauhöhe m	Raumbedarf m ³	Gewicht t
Fall 1: $\eta_m = 43,3\%$						
Vorwärmer-Bauart:						
Röhrenvorwärmer	431	18		5,2	33,7	11,2
Taschenvorwärmer	400	16		2,0	8,7	12,0
Ljungström-Vorwärmer	243	17		0,65	4,06	5,5
Fall 2: $\eta_m = 60\%$						
Röhrenvorwärmer	860	29		10,4	67,3	22,4
Taschenvorwärmer	800	30		4,0	17,4	24,0
Ljungström-Vorwärmer	450	25		0,85	6,25	6,2
Fall 3: $\eta_m = 76,2\%$						
Röhrenvorwärmer	1860	60		22,45	145,2	48,4
Taschenvorwärmer	1720	75		8,65	37,6	51,6
Ljungström-Vorwärmer	930	55		1,50	9,37	8,5

Hierzu ist ergänzend zu sagen, daß mit Gas- und Luftgeschwindigkeiten von ca 8 m/sec gerechnet ist und daß die Heizflächenangabe bei Ljungström-Luftvorwärmern einseitig gerechnet ist (also eine Blechtafel von 1 m² zählt nur als 1 m², obwohl auf der Vorder- und Rückseite Wärme zu und abgeführt wird; dafür befindet sich andererseits jeweils nur die Hälfte der Heizfläche im Gas, die andere Hälfte in der Luft), nur so ist ein Vergleich mit Rekuperativ-Luftvorwärmern möglich. Die Vorwärmer, die alle für etwa gleichen Kraftaufwand für Gas- und Luftbewegung ausgelegt sind, zeigen außerordentliche Verschiedenheiten in ihrer Bauhöhe, ihrem Raumbedarf und ihrem Gewicht. Dementsprechend, wenn auch keineswegs proportional, sind auch die Anschaffungskosten sehr verschieden und nehmen bei Ljungström-Vorwärmern mit hohem Wirkungsgrad, die sich, wie die Betrachtung des Falles 3 lehrt, gerade hier äußerst günstig gestalten, entsprechend niedrige Werte an. Dabei ist ganz besonders die Tatsache zu beachten, daß die Ersparnismöglichkeiten an umbautem Raum oder Kesselhaushöhe oft mehr ausmachen, als die Vorwärmer selbst und daß der kompakte Zusammenbau besondere Einmauerung, Isolierung usw. überflüssig macht, ohne andererseits überhaupt ins Gewicht fallende Wärmeverluste nach außen zu verursachen.

Bezüglich der Heizflächenverschmutzung durch Verrußung haben die letzteren Jahre ein reiches Erfahrungsmaterial gebracht, und zwar konnte festgestellt werden, daß in Kohlenstaub- und ebenfalls in Braunkohlenfeuerungen keine Verrußungen auftreten, sehr stark dagegen bei allen Rostfeuerungen (mechan. und

nicht mechan.). Folgt man den Ausführungen des amerikanischen Prime Movers Committee, so sind die mitunter erheblichen Schwierigkeiten am stärksten bei den schwer rein zu haltenden Taschenluftvorwärmern, bedeutend weniger bei den Röhrenluftvorwärmern aufgetreten, vorausgesetzt, daß hier von Zeit zu Zeit gründliche Reinigung durch Ausbüren der Rohre stattfindet. Nach dem Regenerativ-System arbeitende Vorwärmer haben demgegenüber den Vorteil, daß der Rußbelag nicht in dem Maße leistungsmindernd ist, wie bei Rekuperatoren, und daß die geringe Bauhöhe (s. Zahlen-tafel 3) die Reinigung ungemein erleichtert und wirksam macht.

Eine andere Betriebsschwierigkeit, unter der Kesselanlagen leiden, die häufig unterbrochene Betriebsweise, lange Stillstände und minderwertige, besonders feuchte Brennstoffe zu verfeuern haben, ist das Auftreten von Schwitzwasser und die damit verbundene Gefahr der Korrosion und der Verstopfung; Taubildung am kalten Ende der Luftvorwärmer tritt ein bei sehr geringen Gasaustrittstemperaturen, bei ungünstiger, ungleichmäßiger Beaufschlagung des Gasquerschnittes, bei extrem kalter Lufteintrittstemperatur und bei geringer Gas- und hoher Luftgeschwindigkeit, sie wird ferner gefördert durch schlechte Ausbildung der Gas- und Luftzuleitungs- und Ableitungskanäle, durch Kreuzstromanordnung statt Gegenstrom, die das Vorhandensein toter Ecken und ganz besonders bei Luutzutritt durch Anfressungen an den Trennwänden der Gas- und Luftkanäle. Schwierigkeiten dieser Art sind von einer sehr großen Zahl von Rohbraunkohle verfeuernden Betrieben gemeldet worden; besonders nachteilig ist bei größeren Anlagen die Aufdeckung und Reparatur, die sehr schwierig ist. Dagegen beschränken sich diese ungünstigen Ergebnisse auf Rekuperativ-luftvorwärmer; beim Regenerativsystem arbeitet man im reinen Gegenstrom und hohen Gasgeschwindigkeiten (hohe Blechtemperatur), ferner ist eine Korrosion der Heizfläche, die ja nur Speichermasse darstellt, nicht betriebsstörend. So kommt es, daß eine Reihe von Anlagen bei so tiefen Abgastemperaturen in anstandslosem Betrieb sind, die bei anderen Vorwärmesystemen mit Rücksicht auf die Betriebssicherheit nicht erreicht werden können.

IV. KAPITEL.

Der Luftvorwärmer Bauart Ljungström.

Die günstigen baulichen Verhältnisse des Luftvorwärmers Bauart Ljungström, der hohe Wirkungsgrad, der geringe Raumbedarf und die betrieblichen Vorteile leichter Reinigung und größter Korrosionssicherheit geben Veranlassung, diesem Vorwärmersystem

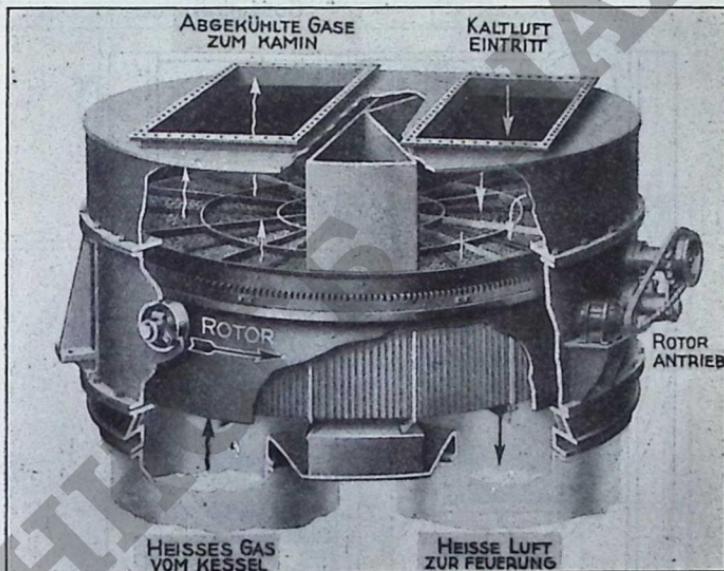


Abb. 11.
Prinzipielle schematische Darstellung des Ljungström-Luftvorwärmers.

erhöhtes Interesse zuzuwenden, um so mehr, als jetzt die Konstruktionserfahrung von fast 900 ausgeführten Anlagen vorliegt, und die anfänglich hie und da aufgetretenen Störungsquellen restlos besiegt sind.

Der Luftvorwärmer Bauart Ljungström ist ein Regenerativ-Luftvorwärmer mit konstanter Drehung und einer kontinuierlichen

Umschaltung. Dadurch besitzt er alle Vorteile eines Regenerators (konstante Wärmeleistung, kein Einfluß der Verschmutzung und

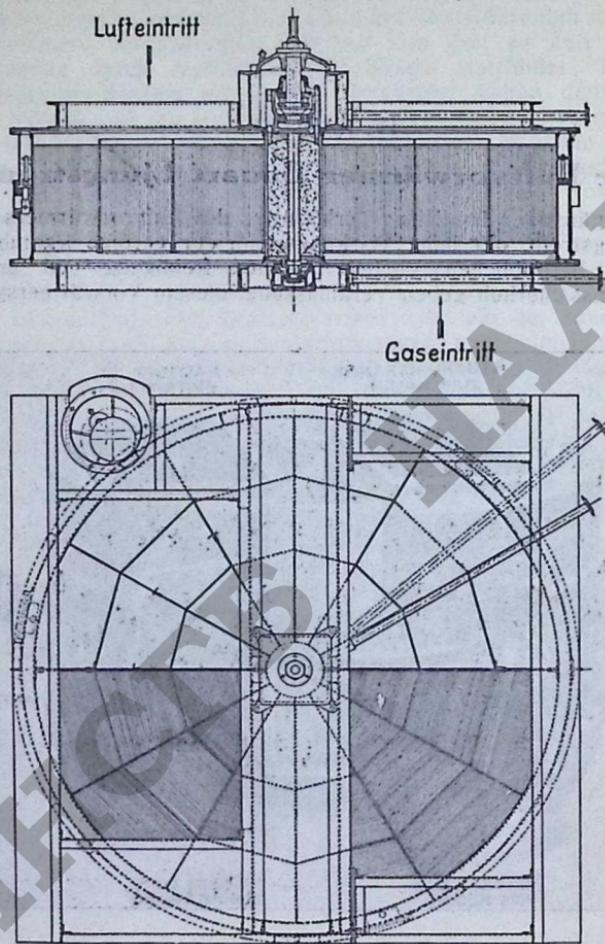


Abb. 12.
Ljungström-Luftvorwärmer CXG-Type (horizontale Bauart).

größte Wärmeübertragung bei geringsten Druckverlusten) verknüpft mit den Vorteilen des Rekuperators (konstante Gas- und Lufttemperaturen).

Abb. 11 zeigt das Prinzip des Vorwärmers in anschaulicher Darstellung, ohne für die heutige Konstruktion maßgebend zu sein.

In Abb. 12 und 13 sind indessen zwei moderne Konstruktionen in liegender und stehender Anordnung dargestellt.

Er besteht aus einem kräftigen schmiedeeisernen Gehäuse, in welchem sich ein mit dünnen Heizblechen besetzter Rotor langsam

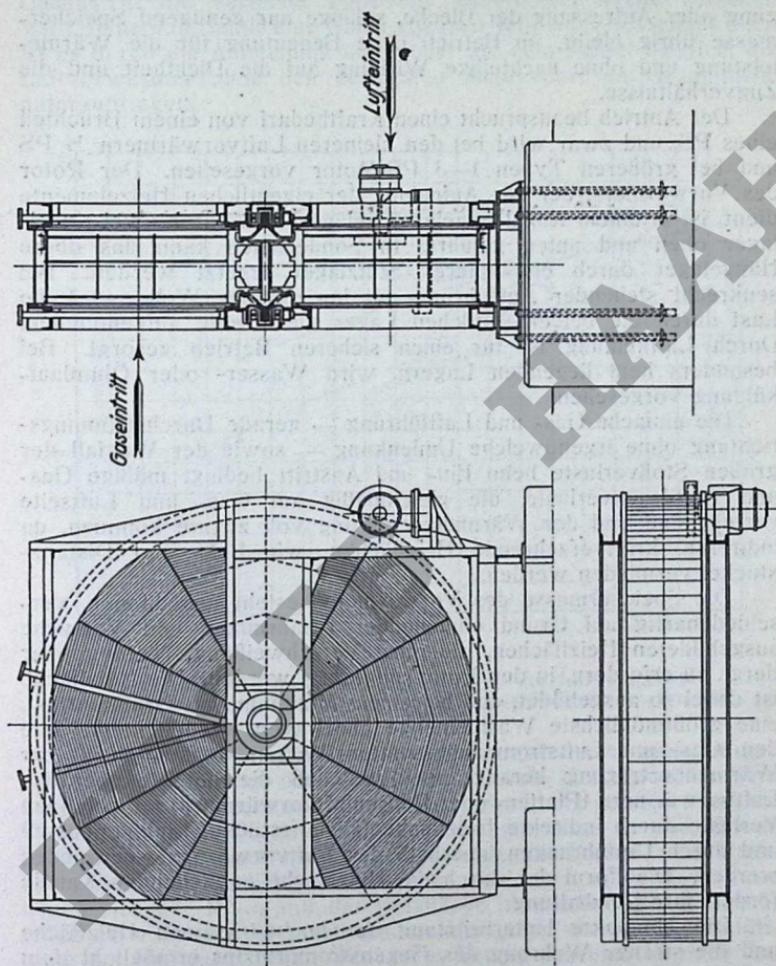


Abb. 13. Ljungström-Luftvorwärmer CH-Type (vertikale Bauart).

mit 2-4 U/min. dreht. Die abzukühlenden Rauchgase und die aufzuwärmende Luft werden im Gegenstrom durch den Rotor gesaugt, bzw. gedrückt, so daß auf der einen Seite die Heizfläche erwärmt, auf der anderen Seite die warmen Bleche abgekühlt und dadurch die Luft vorgewärmt wird.

Da die Bleche nur als Wärmespeicher, nicht als Trennwand zwischen Gas und Luft dienen, bleibt die Wärmeleistung des Vorwärmers gänzlich unberührt von dem Grade der Verschmutzung, da ein etwaiger Ruß- und Staubansatz ebenfalls zur Wärmespeicherung herangezogen wird. Aus demselben Grunde ist eine Beschädigung oder Anfressung der Bleche, solange nur genügend Speichermasse übrig bleibt, im Betrieb ohne Bedeutung für die Wärmeleistung und ohne nachteilige Wirkung auf die Dichtheit und die Zugverhältnisse.

Der Antrieb beansprucht einen Kraftbedarf von einem Bruchteil eines PS, und zwar wird bei den kleineren Luftvorwärmern $\frac{1}{2}$ PS und bei größeren Typen 1—3 PS-Motor vorgesehen. Der Rotor des Vorwärmers, der zur Aufnahme der eigentlichen Heizelemente dient, ist in einem Kugelhängelager gelagert und durch zwei Kugellager oben und unten geführt. In Sonderfällen kann das obere Hängelager durch ein unteres Stützlager ersetzt werden. Bei senkrecht stehender Ausführung mit horizontaler Welle wird die Last durch die beiden seitlichen Lager gleichzeitig aufgenommen. Durch Luftkühlung ist für einen sicheren Betrieb gesorgt. Bei besonders heiß liegenden Lagern, wird Wasser- oder Ölumlaufkühlung vorgesehen.

Die einfache Gas- und Luftführung — gerade Durchströmungsrichtung ohne irgendwelche Umlenkung — sowie der Wegfall der großen Stoßverluste beim Ein- und Austritt bedingt mäßige Gas- und Luftdruckverluste, die gleichmäßig auf Gas- und Luftseite verteilt sind und der Wärmeübertragung voll zugute kommen, da indirekte, kraftverzehrende Heizflächen, wie Leit- und Distanzstücke, vermieden werden.

Die Speichermasse des Vorwärmers besteht aus dünnen, verschiedenartig auf Grund eingehender Erfahrungen und Versuche ausgebildeten Heizflächen, die ohne Verschweißung, Nietung oder dergl. zu erfordern, in den Rotor eingesetzt werden. Die Heizfläche ist dabei so ausgebildet, daß bei einem Minimum von Druckverlust, eine größtmögliche Wärmemenge übertragen werden kann. Alle dem Gas- und Luftstrom ausgesetzten Massen werden direkt zur Wärmeübertragung herangezogen, so daß die bei Rekuperativ-Luftvorwärmern (Platten- oder Röhrenluftvorwärmern) auftretenden Verluste durch indirekte Heizfläche (Distanzstücke, Einlagen usw.) und durch Umführungen innerhalb des Luftvorwärmers vermieden werden. Die Form der durch die Heizbleche entstehenden Kanäle fördert ihre Reinhaltung.

Die kompakte Unterbringung der hochwirksamen Heizfläche und die strenge Wahrung des Gegenstromprinzips ermöglicht dem Luftvorwärmer Bauart Ljungström so hohe Wirkungsgrade zu erreichen, die bei anderen Systemen unwirtschaftliche Ausmaße, Gewichte und Anschaffungskosten verursachen müssen, und trotzdem mit geringstem Raumbedarf, erstaunlich niedrigen Bauhöhen (800—1000 mm), sehr mäßigen Anschaffungskosten und Vorwärmergewichten auszukommen.

Der geringe Raumbedarf des Luftvorwärmers ermöglicht in allen Fällen einen sehr einfachen, bequemen und billigen Einbau, wobei man je nach den örtlichen Verhältnissen, bei oberem Gasaustritt die horizontale Type mit senkrechter Welle und bei unterem Gasaustritt die vertikale Type mit wagerechter Welle vorsehen wird, ohne daß damit eine Norm gegeben sein soll. In vielen Fällen ist es durch die Aufstellung unter oder auf dem Kessel möglich, die Luftvorwärmer ohne den geringsten Mehrbedarf an Grundfläche unterzubringen.

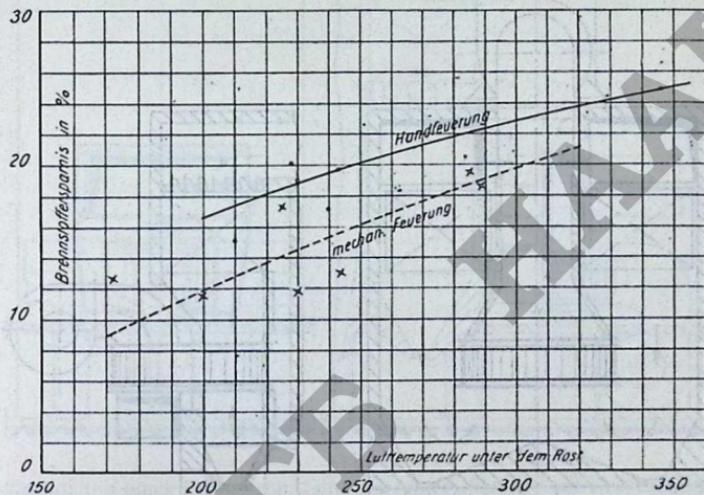


Abb. 14.
Brennstoffersparnis in Abhängigkeit von der Lufttemperatur
(auf Grund zahlreicher Versuche mit Ljungström-Luftvorwärmern).

Die geringe Höhe der Heizelemente gestattet eine einfache und wirksame Reinigung der Heizfläche. Durch das Rotieren wird bereits alle 7—10 Sekunden die Strömungsrichtung geändert und die Wellenform der Bleche verhindert Schmutzansatz in den Ecken. Außerdem wird durch zwei Fußbläserrohre (für Dampf- oder Preßluftbetrieb), die radial fest eingebaut sind, und unter bzw. über denen sich der Rotor mit der Heizfläche hinwegbewegt, in Bruchteilen einer Minute eine vollständige Reinigung erzielt. Die Betätigung der Fußbläser durch Öffnen des Ventils geschieht je nach den örtlichen Betriebs- und Brennstoffverhältnissen täglich bis wöchentlich einmal. Ein eingegebauter Differenz-Zugmesser dient zur dauernden Kontrolle der Heizflächenreinheit.

Eine Einsteigeluke ermöglicht die eingehende Besichtigung der Heizfläche auch in kurzen Betriebspausen, ebenso ist es möglich, die Heizfläche einfach und schnell mit einem Bruchteil der An-

schaffungskosten zu ersetzen, oder Änderungen vorzunehmen, etwa durch Herausnahme von Blechen jede gewünschte Vorwärmung von der Raumluft bis zur Maximallufttemperatur für den Dauerbetrieb einzustellen.

Die theoretisch und bei der Projektierung der Anlagen erwarteten Vorteile konnten durch die Versuchsergebnisse an ausgeführten

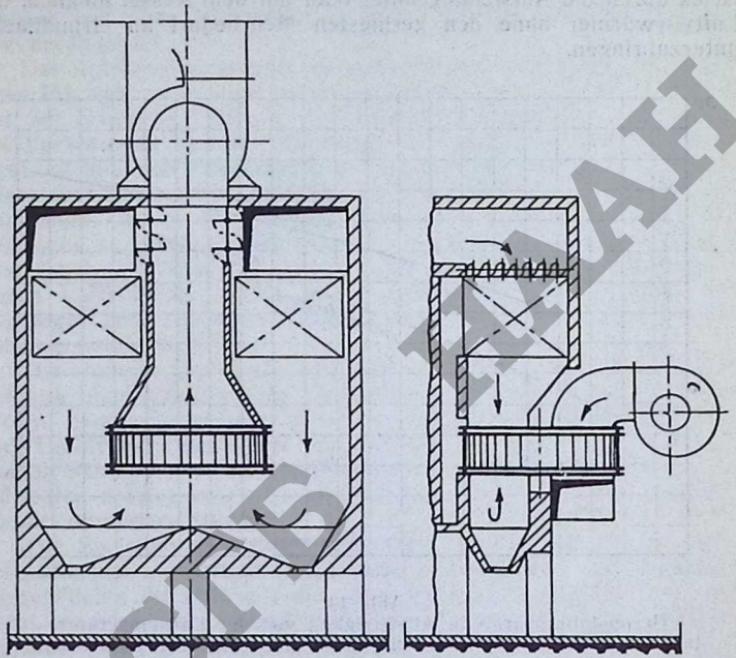


Abb. 15.

Einbau eines Ljungström-Luftvorwärmers in eine Kesselanlage, CXG-Type.

Anlagen bestätigt werden. (S. Abb. 14.*.) Auf ein aus der Praxis der Zuckerindustrie entnommenes Untersuchungsmaterial sei besonders hingewiesen. Es handelt sich um die Raffinerie Göteborg der Svenska Sockerfabriks A. B., bei welcher durch den nachträglichen Einbau von Ljungström-Luftvorwärmern in eine vorhandene, schon recht alte und unwirtschaftliche Kesselanlage, bestehend aus 3 Wasserrohr- und Flammrohr-Rauchrohrkesseln von zusammen 634.5 m^2 , die Ergebnisse der Zahlentafel 4 erreicht wurden. Diese Resultate wurden statistisch und durch Stichproben im Dauerbetrieb nachgeprüft und zu Recht befunden (vergl.

*) Vergl. G umz : „Die Luftvorwärmung im Dampfkesselbetrieb“, Leipzig 1927, Verlag O. Spamer, S. 156/57, Zahlentafel 8.

Abb. 15 und 16 zeigen zwei Möglichkeiten der Anordnung von Luftvorwärmern.

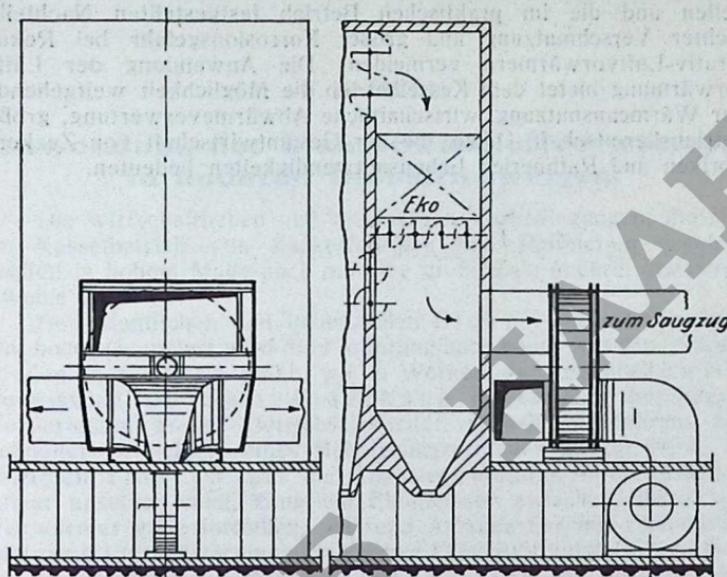


Abb. 16.
Anordnung eines Ljungström-Luftvorwärmers hinter einer Kesselanlage,
CH-Type.

Zahlentafel 4.

Wärmebilanz der Zuckerraffinerie Göteborg.

Versuch Nr.	1	2	3	4
Erzeugte Dampfmenge kg/h	12 124	12 356	11 996	12 798
Verdampfungsziffer kg/h (bei etwa $H_u = 7400$ kcal/kg)	11,66	10,97	11,08	11,77
Lufttemperatur °C.	184	170	173	182
Übertragene Wärmemenge:				
im Kessel %	84,1	83,2	84,8	84,9
im Überhitzer %	2,6	2,4	2,5	2,0
zusammen (Gesamtwirkungsgrad bezogen auf H_u) %	86,7	85,6	87,3	86,9
Verluste:				
im Abgas %	6,5	6,4	6,6	5,6
Restverluste %	6,8	8,0	6,1	7,5

Zusammenfassend kann man sagen, daß die rein wirtschaftlich gerechtfertigte und begründete Tendenz der Wirkungsgradsteigerung an Luftvorwärmern und Kesselanlagen zu einer zunehmenden Verbreitung der Ljungström-Luftvorwärmer führt, da diese die geeignete konstruktive Lösung zur Erreichung dieses Ziels darstellen und die im praktischen Betrieb festgestellten Nachteile leichter Verschmutzung und großer Korrosionsgefahr bei Rekuperativ-Luftvorwärmern vermeiden. Die Anwendung der Luftvorwärmung bietet dem Kesselbetrieb die Möglichkeit weitgehender Wärmeausnutzung, wirtschaftliche Abwärmeverwertung, große Betriebsbereitschaft, Dinge, die der Gesamtwirtschaft von Zuckarfabriken und Raffinerien Lebensnotwendigkeiten bedeuten.

V. KAPITEL.

Anwendung des Ljungström-Luftvorwärmers in anderen Industriezweigen.

Die wirtschaftlichen und technischen Vorbedingungen, die sich im Kesselbetrieb von Zuckerfabriken und Raffinerien ergeben, treffen in hohem Maße auch auf eine große Zahl anderer Industriezweige zu.

Bei öffentlichen und industriellen Elektrizitätswerken mit hoher Grundlast wird die Forderung nach hohen Kesselfunktionsgraden ebenso leicht erfüllt, wie in Werken, die ausschließlich oder vorwiegend der Spitzendeckung dienen, den besonderen Forderungen großer Betriebselastizität, schnellen Anfahrens und schneller Erreichung eines Beharrungszustandes genügt wird. Im letzteren Falle, wo man die Abgastemperaturen im allgemeinen höher ansetzen muß, kann ein Economiser zwischen Kessel und Vorwärmer ganz fortfallen, während Anlagen nur mit Economiser und ohne Luftvorwärmer eine geringe Elastizität aufweisen müssen.

Im Bereich der Montan-Industrien sei besonders auf die Vorteile, die eine Ljungström-Luftvorwärmieranlage zu bieten vermag, hingewiesen, die in der Verwendung minderwertiger, transportunfähiger und unverkäuflicher Kohlensorten liegen, und die mit Luftvorwärmung nicht nur mit gutem Wirkungsgrad verfeuert werden können, sondern die dann auch in der Lage sind, hohe spez. Kesselleistungen zu erzielen. Da sich in einigen Zechenbetrieben die Kohlenstaubfeuerung eingebürgert hat, sei darauf hingewiesen, daß gerade diese Feuerungsart hohe Lufttemperaturen zuläßt und die Vorteile hoher Luftvorwärmung in vollem Maße auszunutzen gestattet.

In Braunkohlegrubenbetrieben und Brikettfabriken darf die Luftvorwärmung als sicherstes Hilfsmittel zur Erzielung hoher Leistungen (bei gutem Wirkungsgrad!) gelten, derart, daß die geringwertigen Brennstoffe mit 50—60% Wassergehalt einen Gebrauchswert erhalten, der den hochwertigsten Brennstoffen ebenbürtig ist. Die korrosionssichere Konstruktion des Luftvorwärmers Bauart Ljungström bietet hier augenfällige Vorteile.

In Ölraffinerien und ähnlichen Erdölbetrieben findet der Luftvorwärmer besonders in den Vereinigten Staaten häufige Anwendung, die Unabhängigkeit der Wärmeleistung des Ljungström-

Vorwärmers von der Verrußung der Heizfläche und die bequeme Reinigungsmöglichkeit gibt ihm hier einen bedeutenden Vorsprung. Außer bei Kesselanlagen findet der Vorwärmer auch bei den Öldestillationsanlagen nutzbringend Verwendung.

Die Eisen- und Stahlindustrie stellt in erster Linie Gichtgas als Brennstoff zur Verfügung, das ebenfalls sehr hohe Lufttemperaturen zuläßt, ja, geradezu fordert! Die Parallelschaltung von Economiser mit Ljungström-Luftvorwärmer stellt hier die günstigste Lösung dar, die die Dampferzeugung derartig verbessert, daß die alte Streitfrage: Gasmaschine oder Dampfturbine, in ein neues Licht gerückt wird.

In der Cellulose-, Papier- und Holzindustrie ist die Luftvorwärmung nicht nur ein bewährtes Mittel, den Kohlenverbrauch einzuschränken, er ermöglicht vor allem, einen großen Teil des Dampfbedarfes aus den anfallenden Holzabfällen zu decken. Zahlreiche skandinavische Cellulose-Fabriken sind hier führend vorangegangen und haben durch die Einführung des Ljungström-Luftvorwärmers beachtenswerte wirtschaftliche Erfolge erzielt. In ähnlicher Weise ist auch das Problem wirtschaftlicher Lohe-Verfeuerung in der Lederindustrie zu lösen.

Anpassung an alle Brennstoffe, Verfeuerung minderwertiger, auch nasser Brennstoffsorten sind ein wichtiges Hilfsmittel, das Kohlenkonto zu senken, und hohe Wärmeausnutzung ist eine Frage, die im Konkurrenzkampf für alle Industriezweige, seien es nun chemische oder Textilbetriebe, Maschinenfabriken oder andere, mehr und mehr an Bedeutung gewinnt, nachdem die Zeit, wo aus dem Vollen gewirtschaftet werden konnte, endgültig vorüber ist. Der Luftvorwärmer Bauart Ljungström ist ein Glied in der Kette der wirtschaftlichen Betriebsmittel und Betriebsmaßnahmen, die heute eine „Tagesfrage“ jeder Industrie sind.



DEMNÄCHST ERSCHEINT

HEFT NR. 10

**DIE MECHANISCHE
FILTRATION
IN DER ZUCKERINDUSTRIE**

von

Ing. Dr. OSKAR WOHRYZEK



**DIE FILTRATION DES DICKSAFTES
ÜBER ASBEST-FILTER SYST.-SEITZ**

in der Zuckerfabrik Ungereigen

von

Ing. SIEGFRIED KÜHN, techn. Verwalter

P R E I S 3,- RM

MAGDEBURG, 1931

Schallehn & Wollbrück Verlag

Inhaltsverzeichnis.

- I. Kapitel. Über die Filtration in der Zuckerindustrie.
Kiesfiltration von Meyer. — Die mechanische Filtration als eigene Betriebstelle. — Über das Filtrieren. — Schwierigkeiten des Filtrierens. — Beurteilung der Filtrate. — Natur der Trübungen. — Mechanik der Filtration; die technischen Faktoren der Filtration. — Filtration und Oberflächenspannung. — Die filtrationserschwerenden Bestandteile der Säfte in der Zuckerindustrie.
- II. Kapitel. Nützlichkeit und Notwendigkeit der Filtration an den einzelnen Betriebstellen.
Diffusionsaft. — Zwischenfiltration. — Dünnsaft. — Mittelsaft. — Dicksaft. — Sirupe der Nachzuckerarbeit. — Vorfiltration. — Nachfiltration der Raffinerieklären. — Deckkläre. — Betriebswasser.
- III. Kapitel. Die chemische Zusammensetzung der Filterablagerungen (Trübungsstoffe) an den einzelnen Betriebstellen. (Was wird durch die Filtration entfernt?)
Diffusionsaft. — Dünnsaft. — Mittel- und Dicksaft. — Nachzuckerklären und Sirupe. — Raffinerieklären. — Betriebswasser.
- IV. Kapitel. Die Mengen der durch Filtration entfernbarer Trübungsstoffe an den einzelnen Betriebstellen.
Der Filtrationseffekt. — Die trotz Filtration in Säften, Sirupen und Klären verbleibenden Trübungsmengen.
- V. Kapitel. Die verschiedenen Filtersysteme in der Zuckerindustrie.
Einteilungsversuch. — Kies- und Sandfilter. — Filter mit loser Filterschicht (Holzwollfilter). — Behandlung der Holzwolle. — Gewebe- (Beutel-) Filter. — Die Einlagen. — Scheibler-Kathol-Filter. — Leistungsfähigkeit. — Niederdruckfilter „Claritas“. — Hochdruckfilter. — Betrieb der Beutelfilter. — Zuckerverluste durch Filtration. — Adsorptionsfiltration (Kieselgur, Celite). — Filter mit periodisch gebildeter Filterschicht (Korkfilter, Holzcellulose, Asbest). — Asbest als Filtermittel. — Das Asbestfilter, Syst. Seitz. (Bau, Arbeitsweise.) — Das Filter in der Rohrzucker- und Rübenzuckerindustrie, in Rohzuckerfabriken und Raffinerien. — Leistungsfähigkeit. — Platzbedarf.
- VI. Kapitel. Die Filtration des Dicksaftes über Asbestfilter, Syst.-Seitz, in der Zuckefabrik Ungereigen. — Von Ing. Siegfried Kühn, techn. Verwalter.
Arbeitsweise der Fabrik. — Die Seitz'sche Filteranlage. — Die Arbeit im Betriebe. — Ergebnisse.

SCHALLEHN & WOLLBRÜCK, MAGDEBURG

TAGESFRAGEN AUS DER ZUCKERINDUSTRIE

HERAUSGEGEBEN VON

ING. DR. OSKAR WOHRYZEK

Bisher erschienen:

- Nr. 1. Ing. Dr. Oskar Wohryzek,
Auf dem Wege zur spodiumlosen Weißzuckererzeugung und Raffination.
Vergriffen.
- Nr. 2. Ing. K. Žerf und Ing. F. Nosek,
Über Entfärbungsköhlen im allgemeinen und über Carboraffin und Norit
im Besonderen. Preis 3 — RM.
- Nr. 3. Ing. Heinrich Jenisch,
Die neue Dampfturbine „Bauart Bränn“ in der Zuckerindustrie. Vergriffen.
- Nr. 4. Ing. Hermann Gutherz, Direktor,
Über die technische Organisation des Zuckersfabriks-Betriebes. Vergriffen.
- Nr. 5. Ing. Dr. Oskar Wohryzek,
Über den gegenwärtigen Stand der Anwendung von Aktivkohlen in der
Zuckerindustrie. Preis 4 — RM.
- Nr. 6. Ing. Walter Jaekel,
Dampfmesser und Dampfmessungen in der Zuckerindustrie. Preis 2.50 RM.
- Nr. 7. Dr. techn. Fr. Nosek,
Kombination Norit-Knochenkohle als Entfärbungsanlage. Preis 2.50 RM.
- Nr. 8. Ing. Max Maria Muchka,
Automatische Regelungen im Zuckersfabriks-Betriebe. Preis 2 — RM.
- Nr. 9. Dipl. Ing. W. Gumz,
Wirtschaftliche Abwärmeverwertung im Dampfkesselbetrieb der Zucker-
fabriken unter besonderer Berücksichtigung des Luftvorwärmers Bauart
Ljungström. Preis 2 — RM.

In Vorbereitung:

- Nr. 10. Ing. Dr. Oskar Wöhryzek,
Die mechanische Filtration in der Zuckerindustrie. Preis 3 — RM.

ZU BEZIEHEN DURCH:

SCHALLEHN & WOLLBRÜCK, VERLAGSBUCHHANDLUNG
MAGDEBURG (Postfach)