

I. Abschnitt.

Die Feuerungs-Anlagen.

Erstes Kapitel.

Allgemeine Theorie der Feuerungs-Anlagen.

§. 1.

Definitionen.

Mit dem Namen Feuerungs-Anlage belegt man im Allgemeinen jede Vorrichtung, welche den Zweck hat, in größerem Maßstabe Wärme durch Verbrennung zu erzeugen und diese einem Körper irgend welcher Beschaffenheit mitzutheilen, sei es, um dessen Temperatur zu erhöhen, dessen Wärme zu vermehren oder eine Aenderung seines Aggregatzustandes herbeizuführen.

Der Raum, in welchem die Verbrennung sich vollzieht, heißt Feuerraum. Die Stoffe, welche verbrannt werden und die theils in ihrem primitiven Zustande, theils künstlich vorgerichtet zur Verwendung gelangen, führen den Namen Brennmaterialien; die aus ihnen sich entwickelnden luftförmigen Verbrennungsprodukte nennt man Heizgase. Diese können mit dem zu erwärmenden Körper in direkte Berührung gebracht werden, oder durch eine feste Wand — die sogenannte Heizwand — von ihm getrennt sein.

Nach möglichster Ausnützung der in den Heizgasen enthaltenen Wärme, zu welchem Behufe jene in der Regel in Kanälen (Feuerzügen, Feuerröhren) um den zu erwärmenden Körper, beziehungsweise in dem zu erwärmenden Raume herumgeführt werden, erfolgt schließlich ihre Aufwärtsleitung durch einen letzten Kanal, den Schornstein (die Esse), und ist diese Anordnung nicht allein bedingt durch die Nothwendigkeit, die unmittelbare Umgebung der Anlage vor den belästigenden und schädlichen Einflüssen der ent-

weichenden Heizgase zu bewahren, sondern hauptsächlich, um das Zuströmen der die Verbrennung unterhaltenden atmosphärischen Luft in den Feuerraum zu befördern, d. h. — wie man gewöhnlich sich ausdrückt — um den erforderlichen Zug auszuüben.

Diesen Ausführungen gemäß läßt sich der Endzweck der drei Haupttheile einer Feuerungs-Anlage, nämlich des Feuerraums, des Heizraums und des Schornsteins, als die Verrichtung folgender, ihrer Natur nach wesentlich verschiedenen Operationen definiren, und zwar:

- 1) der Wärmeerzeugung,
- 2) der Wärmeübertragung,
- 3) der Zugerzeugung.

Diese drei Funktionen, von denen die erste vorzüglich in das Gebiet der Chemie, die zweite in das der Physik zu verweisen ist, während die dritte hauptsächlich ein Problem der Mechanik und zwar speciell der Pneumatik bildet, werden es auch sein, welche wir zunächst allgemein zu besprechen haben, einestheils um die sich bei einer Feuerungs-Anlage darbietenden Erscheinungen zu erklären und im weiteren Verlaufe, um Anhaltspunkte für die Beurtheilung des commerciellen Werthes einer derartigen Anlage zu gewinnen.

Es darf hierbei nicht überraschen, daß den Ergebnissen dieser theoretischen Untersuchungen noch eine gewisse Unsicherheit anhaftet, und daß die in Folgendem entwickelten Formeln eine Reihe noch ungenügend bestimmter Erfahrungscoefficienten enthalten. Bei einem so schwer zu handhabenden, in so vielen Variationen auftretenden complicirten Versuchsapparate, wie dies eine größere Feuerungs-Anlage ist, werden noch viele Experimente erforderlich sein, um alle Vorgänge



genügend aufzuklären, und dürfte derjenige, der da glaubt, das Verständniß der Theorie befähige zum schablonenmäßigen Dimensioniren von Feuerungs-Anlagen jeder Art, sich sehr enttäuscht fühlen.

Diese Einsicht darf uns selbstverständlich nicht abschrecken, in die Theorie uns zu vertiefen; denn abgesehen davon, daß die Angaben der Empiriker in gar sehr vielen Fällen unzuverlässiger sind als die Ergebnisse der Theorie und — keineswegs auf Vernunftschlüssen basirend — innerhalb sehr weiter Grenzen sich bewegen, so liegt der Hauptwerth theoretischer Untersuchungen in der Erklärung der Erscheinungen und in der Entwicklung gesunder Principien, welche zwar nicht immer die Lösung eines Problems bedingen, aber doch die nothwendigste Grundlage für diese sind. Und — auf diesen Standpunkt uns stellend — sind wir wohl berechtigt, der Theorie einen großen Werth beizulegen, zum mindesten aber eine gedrängte Darstellung derselben in einem Werke, wie es das vorliegende sein soll, für nothwendig zu erachten.

Für die nachstehenden Untersuchungen setzen wir voraus, daß der zu erwärmende Körper luftförmig oder tropfbar flüchtig, im Allgemeinen also eine Flüssigkeit sei, dem Umstande Rechnung tragend, daß es Zweck vorliegenden Werkes ist, in erster Linie die zur Beheizung von Gebäuden nöthigen Anlagen und von den, gewerblichen Zwecken dienenden, nur die Dampfkessel-Feuerungen zu besprechen. Eine ausführliche Darlegung der Verhältnisse der in industriellen Etablissements anzutreffenden und für besondere Zwecke bestimmten Anlagen würde außerhalb des Rahmens einer Bau-Constructiionslehre liegen und um so weniger erfolgen können, als dieselben mit der Technologie der betreffenden Gewerbe in zu engem Zusammenhange stehen, als daß es erfolgreich wäre, auf ihre Construction einzugehen, ohne gleichzeitig die Technologie in dem erforderlichen Umfange vorzutragen. Wir werden uns daher darauf beschränken, einige dem Bautechniker häufig vorkommende Anlagen zu behandeln.

§. 2.

Temperatur im Feuerraum.

Die zunächst sich uns darbietende, die „Wärmeerzeugung“ betreffende Frage ist die nach der in dem Verbrennungsraume herrschenden Temperatur, dem sogenannten pyrometrischen Effecte, dessen Größe offenbar von der Beschaffenheit des Brennstoffes und von der Construction des Feuerraumes abhängt und von letzterer insofern stark beeinflusst wird, als die mehr oder minder vollkommene Verbrennung lediglich eine Folge der Anordnung des Feuerraumes und dessen Bedienung ist.

Einen Maßstab für die Qualität des Brennstoffes bildet dessen calorimetrischer Effect. (Heizeffect), d. i. diejenige Anzahl K von Wärmeeinheiten (Calorien), welche durch die Gewichtseinheit — nämlich 1 Kilogramm — des Brennstoffes bei vollkommener Verbrennung erzeugt wird, wobei unter vollkommener Verbrennung diejenige verstanden ist, bei welcher der in dem Brennstoff enthaltene Kohlenstoff und Wasserstoff vollständig zu Kohlenensäure und Wasser verbrennen. Als Wärmeeinheit ist allgemein diejenige Wärmemenge eingeführt, welche im Stande ist, die Temperatur eines Kilogrammes destillirten Wassers um 1° C. zu erhöhen.

Bezeichnet man nun mit:

c die spezifische Wärme der Heizgase, d. i. diejenige Anzahl von Wärmeeinheiten, welche genügt, 1 Kilgr. dieser Produkte um 1° C. zu erwärmen;

G das Gewicht der aus einem Kilogramme Brennstoff sich entwickelnden Verbrennungsprodukte;

T_0 die Temperatur dieser Heizgase in Graden Celsius, und zwar dicht über dem Brennmaterial gemessen,

so ist die Anzahl der entstehenden Wärmeeinheiten gleich

$$c T_0 G$$

und es müßte, wenn der calorimetrische Effect nicht durch andere Umstände gemindert würde,

$$c T_0 G = K$$

sein.

Nun wird aber eine vollkommene Verbrennung thatsächlich nicht eintreten, es wird vielmehr — abgesehen von jeder Rauchentwicklung — ein großer Theil des Kohlenstoffes nicht zu Kohlenensäure, sondern zu Kohlenoxyd — unter gleichzeitiger Entwicklung von Kohlenwasserstoff — verbrennen, woraus folgt, daß K durch $\eta_1 K$ zu ersetzen ist, unter η_1 einen Coefficienten verstanden, der kleiner ist als 1 und welcher der Wirkungsgrad des Feuerraumes genannt wird. Aber selbst diese Wärmemenge kommt nicht zur Geltung und wird nicht unwesentlich geschmälert, sobald ein Theil der Umfassungswände des Feuerraumes gleichzeitig Heizwand ist, und dieser sogenannten indirekten Heizfläche ein Theil der entstehenden Wärme zustrahlt. Wird alsdann vorausgesetzt, daß die so den Heizgasen entzogene Wärmemenge direkt proportional ist der Wärmemenge $\eta_1 K$, und wird ferner der Proportionalitätsfactor — Strahlungscoefficient — mit s bezeichnet, so ergibt sich

$$c G T_0 = \eta_1 K - s \eta_1 K$$

und hieraus

$$T_0 = \frac{\eta_1 K (1-s)}{c G}$$

und es erübrigt nur noch, nachdem η_1 , s und c experimentell bestimmt sind, das Gewicht G der Heizgase zu ermitteln.

Bezeichnet man zu diesem Zwecke mit L die zur vollständigen Verbrennung eines Kilogramms Brennstoff erforderliche theoretische Luftmenge und setzt hiergegen die tatsächlich verwendete Luftmenge = $m L$, so erhält man, wenn A den Gehalt an Asche bedeutet,

$$G = m L + 1 - A$$

und es wird unter Vernachlässigung der nur kleinen Größe A

$$1) \quad T_0 = \frac{\eta_1 (1 - s) K}{c (m L + 1)}.$$

Noch genauer wird

$$T_0 = \frac{\eta_1 (1 - s) K}{c (m L + 1)} + \tau$$

wo τ die Mischungstemperatur von Brennstoff und Verbrennungsluft vor Beginn des Verbrennungsprocesses ist; doch wird die Größe τ in der Regel vernachlässigt.

§. 3.

Heizeffect der Brennstoffe. Werthe für η_1 und s .

Den nachstehenden Ermittlungen liegen folgende Werthe K zu Grunde, welche für einige Brennstoffe von Favre und Silbermann ermittelt worden sind, und wonach für:

Wasserstoffgas	$K = 34462$
Stumpfgas	$K = 13063$
Delbildendes Gas	$K = 11858$
Holzkohle (stark calcinirt) . .	$K = 8080$
„ (aus Gasretorten)	$K = 8047$
Zuckerkohle	$K = 8040$
Graphit (natürlicher)	$K = 7796$
„ (aus Hochofen)	$K = 7762$
Diamant	$K = 7770$
Kohlenoxydgas	$K = 2403$

ist. Den Heizeffect eines zusammengesetzten Brennstoffes findet man, indem man die den einzelnen brennbaren Bestandtheilen entsprechenden Werthe K addirt und hiervon diejenige Wärmemenge in Abzug bringt, welche zur Zerlegung der chemischen Verbindungen einerseits und zur etwaigen Veränderung des Aggregatzustandes (z. B. der Verdampfung des Wassers) andererseits erforderlich ist. Da es nun aber in den meisten Fällen ungewiß bleibt, auf welche Weise die chemischen Elemente in dem vorliegenden Brennstoffe verbunden sind, da ferner — wie aus obiger Zusammenstellung hervorgeht — dem Kohlenstoffe, je nach dem Grade seiner Dichtigkeit, ein verschiedener und zwar mit der Dichtigkeit abnehmender Werth K entspricht, der Dichtigkeitsgrad des in einem Brennstoffe enthaltenen Kohlen-

stoffes aber unbekannt ist, so ist man zu einer Reihe von Annahmen gezwungen, um überhaupt die Ermittlung des Heizeffects möglich zu machen.

Diese Hypothesen sind folgende:

- 1) Für Kohlenstoff werde stets der Werth $K = 8000$ eingeführt.
- 2) Bei Bestimmung der Heizeffecte der gewöhnlichen festen Brennstoffe, als: Steinkohle, Coks, Braunkohle, Holzkohle, Holz und Torf, sind der Kohlenstoff und der Wasserstoff als alleinige brennbare Bestandtheile anzusehen und möge von den anderen brennbaren Beimischungen, als: Schwefel, Phosphor zc. abstrahirt werden.
- 3) Bezüglich des Sauerstoffes werde die den Heizeffect jedenfalls schmälernde Annahme gemacht, daß der gesammte Sauerstoff an Wasserstoff gebunden vorkomme.

Enthält dann 1^k Brennstoff

C Kilogramme Kohlenstoff,
H „ Wasserstoff,
H_2O „ Gemisch gebundenes Wasser,
W „ hygroskopisches Wasser,

so ist, da 1^k Wasserstoff zu 9^k Wasser verbrennt, zunächst der in vorstehender Tabelle angegebene Heizeffect $34462 H$ zu vermindern um die Verdampfungswärme von 9^k Wasser. Diese Verdampfungswärme beträgt nach Clausius pro 1^k Wasserdampf von der Temperatur t^0 Celsius

$$607 - 0,708 t,$$

möge indeß (nach Grashof*) mit Rücksicht auf die dem Verfahren anhaftenden Ungenauigkeiten durch die Constante 600 ausgedrückt werden, wonach der Heizeffect des freien Wasserstoffes sich gleich

$$34462 H - 600 \cdot 9 H = 29062 H$$

ergibt. Die zur Verdampfung des chemisch gebundenen Wassers nöthige Wärmemenge setzen wir (ebenfalls Grashof folgend) gleich 680 Calorien, indem wir die Schmelzwärme festen Wassers hinzufügen. Wir erhalten dann für den Heizeffect des Brennstoffes die Formel

$$K = 8000 C + 29060 H - 680 H_2O - 600 W,$$

nach welcher jener ermittelt werden kann, sobald die Zusammensetzung des Brennstoffes bekannt ist. Im Anschluß hieran möge noch eine von Grashof berechnete Tabelle reproducirt werden, und sei ferner auf das Werk Grothe's: „Brennmaterialien und Feuerungen“ hingewiesen, das auf Seite 73 ffg. die Ergebnisse einer langen Reihe von Brennstoffanalysen zusammengestellt hat.

*) Grashof, Theoretische Maschinenlehre. Leipzig 1875. Abschnitt III., „Heizung.“

Tabelle I. Heizeffekte fester Brennstoffe.

Brennstoff.	C	H	H ₂ O	W	A	K
Lufttrockenes Holz	0,39	—	0,40	0,195	0,015	2731
Lufttrockener Torf	0,35	0,01	0,29	0,25	0,10	2743
Lufttrockene Braunkohle	0,50	0,015	0,205	0,20	0,08	4176
Steinkohle	0,80	0,04	0,09	0,03	0,04	7483
Holzkohle	0,85	0,01	0,03	0,06	0,05	7034
Coaks	0,87	0,005	0,015	0,05	0,06	7065

Es ist nun die Frage nach dem Verhältnisse des praktischen Heizeffectes zu dem theoretischen, d. i. nach dem Wirkungsgrade η_1 des Feuerraumes zu beantworten. Daß nur das Experiment befriedigende Auskunft zu geben vermag, ist evident; trotzdem aber wollen wir uns wenigstens ein ungefähres Bild davon machen, wie man aus der Zusammensetzung der Heizgase auf die Größe von η_1 schließen könnte, hauptsächlich um darzutun, in welchem Maße eine unvollkommene Verbrennung des Hauptbestandtheiles unserer Brennstoffe, nämlich des Kohlenstoffes, den Heizeffect beeinflusst. Dazu ist nöthig, diejenige Wärmemenge zu ermitteln, welche durch Verbrennung von 1^k Kohlenstoff zu Kohlenoxydgas nutzbar gemacht wird. Der Heizeffect des Kohlenoxydgases ist = 2400 und muß deßhalb, da 1^k Kohlenstoff $\frac{7^k}{3}$ Kohlenoxydgas liefert,

$$K' + \frac{7}{3} 2400 = 8000$$

sein, woraus

$$K' = 2400$$

sich ergibt. Ist nun die Construction des Feuerraumes und die Bedienung des Herdes eine solche, daß von C^k Kohlenstoff $\frac{1}{n}$ C^k nur zu Kohlenoxyd verbrennen, daß jedoch ein Ausschleiden von Kohlenstofftheilchen und von Kohlenwasserstoffgasen nicht stattfindet, so ist der theoretische Heizeffect zu vermindern um

$$\frac{1}{n} C (8000 - 2400) = \frac{5600 C}{n}$$

und es ist dann der Wirkungsgrad des Feuerraumes

$$\eta_1 = \frac{K - \frac{5600 C}{n}}{K}$$

wo K und C aus Tabelle I. zu entnehmen sind.

Wird beispielweise Steinkohle als Brennstoff vorausgesetzt und $n = 2$ angenommen, so ist

$$\eta_1 = \frac{7483 - 2800 \cdot 0,80}{7483} = 0,701$$

während für $n = 1$

$$\eta_1 = \frac{7483 - 5600 \cdot 0,80}{7483} = 0,401$$

sich ergibt. Das Beispiel zeigt zur Genüge — da auf Rauchentwicklung gar keine Rücksicht genommen wurde — wie gering der Heizeffect in unrationell betriebenen Feuerungsanlagen (z. B. in Stubenöfen), in denen bedeutende Quantitäten Kohlenoxydgas erzeugt werden, sein wird, und wie gerechtfertigt das Bestreben ist, die Leistungsfähigkeit der Anlagen nach dieser Richtung hin zu steigern. Ob es jedoch gerathen ist, unter Hintanzetzung aller Rücksichtnahmen lediglich die Vergrößerung des calorimetrischen und pyrometrischen Effectes anzustreben, — dies ist eine Frage, die keineswegs zu bejahen ist, und werden wir später noch darauf hinzuweisen haben, daß nicht allein die Vergrößerung des Anlagekapitals es ist, welche oftmals gegen die Einführung der Vorrichtungen und Anordnungen spricht, die dem Trachten nach vollkommener Verbrennung ihre Entstehung danken.

Zur Angabe einiger Versuchsergebnisse übergehend, führen wir an, daß bei Dampfkesselanlagen behufs Ermittlung des Werthes η_1 Experimente in der Art angestellt wurden, daß aus der mittels 1^k Brennstoff verdampften Wassermenge auf den nutzbaren Heizeffect geschlossen wurde. Hierbei ergab sich im Allgemeinen η_1 als zwischen 0,40 und 0,80 schwankend, doch lehrten die Versuche, daß bei guten Anlagen $\eta_1 = 0,75 - 0,80$ gesetzt werden darf. Selbstverständlich hängt η_1 , wie schon hervorgehoben wurde und später noch ausführlicher dargelegt werden soll, sehr von der Bedienung des Herdes ab, z. B. von der Höhe der Brennstoffschicht, von den Zeitintervallen, innerhalb deren der Brennstoff erneuert wird, von der Regulirung des Luftzutrittes zc., so daß bei approximativer Berechnung der Feuerungsanlagen nur dann der Werth $\eta_1 = 0,75 - 0,80$ in Anwendung gebracht werden darf, wenn sorgfältige Wartung durch einen geschickten Heizer bestimmt in Aussicht steht, wie dies ja bei Dampfkesselanlagen, größeren Centralheizungen zc. der Fall ist. Auch dürften es grade diese Anlagen sein, welche eine sorgfältigere Dimensionirung wünschenswerth machen.

Was nun den für die Bestimmung des pyrometrischen Effectes T_0 wichtigen Strahlungscoefficienten s anbetrifft, so sind brauchbare Angaben kaum zu finden. Derselbe wird jedenfalls außer von der Beschaffenheit des Feuer-raumes noch von der in der Zeiteinheit zu consumirenden Brennmaterialmenge abhängen und fehlt es namentlich an einer sicheren Grundlage für die Bestimmung des letztgenannten Einflusses. Da der Coefficient s desto größer ist, je größer die durch Strahlung zu heizende sogenannte directe Heizfläche wird, so ergibt er sich bei der Innenfeuerung am größten, bei der Unterfeuerung kleiner, bei der Vorfeuerung gleich Null, und zwar ist hiebei als Innenfeuerung diejenige Anordnung des Feuerraumes definiert, bei der außer der oberen noch theilweise seitliche Begrenzungen direkte Heizfläche sind, während bei der Unterfeuerung nur die Decke, bei der Vorfeuerung aber keine der Begrenzungen des Feuerraumes direkt durch Strahlung geheizt werden.

Wird nun mit B_1 die pro \square^m Kofstfläche in der Stunde zu verbrennende Brennstoffmenge bezeichnet, so empfiehlt Grashof

bei Unterfeuerung

$$s = \frac{1,4}{\sqrt{B_1}}$$

bei Innenfeuerung

$$s = \frac{2,1}{\sqrt{B_1}}$$

Schönflies hält bei Innenfeuerung $s = \frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{8}$,

bei Unterfeuerung $s = \frac{1}{5}$ bis $\frac{1}{8}$ für passende Coefficienten.

Durchschnittswerthe wie:

$$s = 0,2 \text{ bei Unterfeuerung}$$

$$s = 0,3 \text{ bei Innenfeuerung}$$

dürften bei approximativen Rechnungen (und von solchen kann mit Rücksicht auf die hinsichtlich der Strahlung gemachte nicht ganz zutreffende Annahme überhaupt nur die Rede sein) genügend sichere Resultate liefern.

§. 4.

Ermittelung der zur Verbrennung erforderlichen Luftmenge.

Die Bestimmung der zur Verbrennung nöthigen Menge Sauerstoff unterliegt keinerlei Schwierigkeit, sobald sie unter der Annahme durchgeführt wird, daß lediglich der Kohlenstoff und der Wasserstoff die brennbaren Bestandtheile des Brennstoffes bilden.

Es ist bekannt, daß

1^k Wasserstoff mit 8^k Sauerstoff zu 9^k Wasser und ferner daß

3^k Kohlenstoff mit 8^k Sauerstoff zu 11^k Kohlenäure verbrennen, daß also zur vollständigen Verbrennung von 1^k Kohlenstoff $\frac{8}{3}$ Sauerstoff nöthig sind.

Enthält deßhalb der Brennstoff:

C^k Kohlenstoff,

H^k freien Wasserstoff,

so ist behufs vollständiger Verbrennung desselben die Zuführung von

$$\left(\frac{8}{3} C + H\right) \text{ Kilogr.}$$

Sauerstoff geboten und läßt sich hiernach leicht die Menge der zuzuführenden Luft bestimmen. Wird nämlich die atmosphärische Luft lediglich als aus 77 Theilen Stickstoff und 23 Theilen Sauerstoff bestehend gedacht, wird also von den übrigen Beimischungen (Wasser, Kohlenäure etc.) abgesehen, so beträgt das theoretische Luftquantum:

$$3) \quad L = \frac{100}{23} \left(\frac{8}{3} C + 8 H\right),$$

welches durch das thatsächlich zuzuführende Quantum

$$L' = m L$$

zu ersetzen ist, wobei passend

$$\text{für Holz und Torf} \quad m = 1,5$$

$$\text{für Kohlen} \quad m = 2,0$$

zu wählen sind.

Mit Hilfe von Formel 3 hat Grashof nachstehende Tabelle berechnet, welche nicht nur das Gewicht der Heizgase in Kilogrammen, sondern außerdem die Dichtigkeit δ derselben, bezogen auf die atmosphärische Luft als Einheit und ihre mittlere specifische Wärme c enthält und zwar für $m = 1$ und $m = 2$. Für $m = 1,5$ wird man Mittelwerthe nehmen.

Tabelle II.

Brennstoff.	L	m = 1			m = 2		
		G	δ	c	G	δ	c
Holz	4,52	5,50	1,003	0,266	10,02	1,002	0,254
Torf	4,41	5,31	0,993	0,268	9,72	0,996	0,256
Braunkohle	6,32	7,24	1,023	0,258	13,56	1,012	0,250
Steinkohle	10,67	11,63	1,043	0,250	22,30	1,022	0,245
Holzkohle	10,20	11,15	1,071	0,244	21,35	1,036	0,242
Coks	10,26	11,20	1,077	0,242	21,46	1,039	0,241

§. 5.

Dimensionen des Verbrennungsraumes.

An vorstehende Ermittlungen, welche es uns ermöglichen, annähernd die Temperatur in den Feuerstätten rationell konstruirter und sorgsam bedienter Anlagen zu bestimmen, schließen wir einige Regeln, betreffend die zweckmäßige Dimensionirung des Feuerraumes an, uns vorbehalten, späterhin weiter auf diesen Gegenstand einzugehen und die verschiedenen Constructionen zu kritisiren, welche die Erzielung eines möglichst hohen pyrometrischen Effectes bezwecken. Wir beschränken uns hiebei auf den wohl am häufigsten vorkommenden Fall der Kofstfeuerung mit Beschickung durch eine oberhalb gelegene Heizthür und Luftzutritt unterhalb des Kofstes.

Zunächst handelt es sich um Bestimmung der Größe der Kofstfläche.

Bezeichnen wir dieselbe mit R,

die pro Stunde zu verbrennende Menge Brennstoff mit B

und den auf den □^m Kofstfläche entfallenden Antheil derselben mit B₁,

so ist

$$R = \frac{B}{B_1}.$$

Hierin schwankt B₁

bei Steinkohlen . .	zwischen 20 und 150 ^k
„ Braunkohlen . .	„ 40 „ 300 ^k
„ Holz und Torf . .	„ 60 „ 450 ^k
„ Holzkohle und Coaks . .	„ 20 „ 150 ^k

und zwar ist es rathsam, B₁ möglichst klein anzunehmen, da bei zu hoher Brennstoffschicht der Widerstand, welchem die Luft bei Passiren derselben begegnet, zu bedeutend ist. Allerdings wird eine gewisse Grenze nicht überschritten werden können, da einem zu kleinen B₁ eine zu große Fläche R entspricht und dann die Bedienung des Kofstes sehr unbequem wird. Als Maximum sieht man für die Kofstbreite 0,9^m und für die Kofstlänge 1,5^m an.

Sind beispielweise 60^k Steinkohle zu verbrennen und wählt man

$$R = 1,5 \cdot 0,9 = 1,35 \square^m$$

so wird

$$B_1 = \frac{60}{1,35} = 44$$

mithin ein passender Werth erhalten.

Ist hingegen

$$B = 240^k$$

so ergibt sich

$$B_1 = \frac{240}{1,35} = 177^k$$

und dürfte sich eine Vergrößerung des Kofstes oder aber eine

Vertheilung des Brennstoffes auf zwei Kofste empfehlen. Ist beides nicht möglich, so muß man sich durch Verstärkung des Zuges, z. B. Wahl eines höheren Schornsteines, zu helfen suchen.

Die Größe der freien Kofstfläche, d. i. die Summe der Kofstspalten, ist in jedem Falle und für jedes Brennmaterial so groß wie möglich zu machen; sie hängt ab von der durch die Festigkeit der Kofststäbe bedingten Dicke dieser und richtet sich daher nach der Länge der Stäbe. Sie wird ferner beeinflusst durch die Beschaffenheit des Brennstoffes und dürfen die Spalten nur so groß sein, daß sie lediglich der Asche, nicht aber kleinen Brennstoffstückchen das Durchfallen gestatten. Meistens macht man die freie Kofstfläche:

für Steinkohlen	$\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{3}$
„ hartes Holz und Braunkohle . .	$\frac{1}{5}$ bis $\frac{1}{3}$
„ weiches Holz und Torf	$\frac{1}{6}$ bis $\frac{1}{5}$
„ Holzkohlen und Coaks	$\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{3}$

der totalen.

Auf eine gleichförmige und zweckmäßig gewählte Schichtdicke δ des Brennstoffes wird behufs Erzielung eines günstigen Heizeffectes ebenfalls Werth zu legen sein. Dieselbe richtet sich nach der Zugwirkung des Schornsteines und darf einerseits nicht zu niedrig sein, damit nicht zu viel Luft in den Feuerraum strömt, andererseits aber nicht zu hoch gewählt werden, da sonst die in den mittleren Zonen sich bildende Kohlenäure durch Berührung mit den glühenden Kohlen der oberen Schicht sich wieder in Kohlenoxyd verwandeln würde, welcher Vorgang ein Binden von Wärme zur Folge hat.

Grashof empfiehlt:*)

für Steinkohlen im Mittel . $\delta = 0,1^m$

und zwar speciell

für backende Steinkohle . . $\delta = 0,08^m$

„ staubförmige Steinkohle . . $\delta = 0,12^m$

ferner „ Holz und Torf $\delta = 0,20^m$

„ Coaks $\delta = 0,25^m$.

Zu genauerer Berechnung gibt er die Formel

$$\delta = \frac{B_1}{800} + b$$

worin

b = 0,04 für Steinkohlen,

= 0,08 „ Holz und Torf,

= 0,10 „ Coaks.

Weiß setzt für Steinkohlen**)

$$\delta = 0,002 B_1.$$

*) Grashof a. a. O.

**) Weiß, Allgemeine Theorie der Feuerungsanlagen, 1862.

Die Höhe h des Feuerraumes wird nicht allein von der Schichtdicke δ abhängen, sondern auch von der Lage des Feuerraumes gegen die Heizfläche; d. h. es wird zu unterscheiden sein, ob eine Vorfeuerung, eine Unterfeuerung oder eine Innenfeuerung vorhanden ist.

Zunächst ist darauf zu achten, daß die Flamme sich völlig zu entwickeln vermag, damit die Gase noch vor Verlassen des Feuerraumes vollständig zur Verbrennung gelangen. Bei der Vorfeuerung macht man dann den Verbrennungsraum so niedrig als zulässig, am vortheilhaftesten nicht höher als die Heiztür, deren Größe durch die Bequemlichkeit hinsichtlich der Einbringung des Brennstoffes vorgeschrieben ist und später angegeben werden mag. Diese Anordnung hat den Zweck, die dem neu aufgeworfenen Brennstoffe entströmenden Gase an der glühenden Decke zu entzünden oder doch zum mindesten anzuwärmen.

Bei einer Innen- und Unterfeuerung empfiehlt es sich, die Höhe h nicht zu gering zu wählen, damit die Flamme nicht zu früh an die kalte Heizwand schlage. Als Minimum ist nach v. Reiche die Höhe $0,6^m$ anzusehen.

Grashof*) empfiehlt für die Unterfeuerung und zwar für den Fall, daß die Temperatur jenseits der Heizwand zwischen 100^0 und 200^0 liege,

$h = \delta + 0,30$	Meter für	Koks,
$= \delta + 0,35$	" "	Steinkohle,
$= \delta + 0,40$	" "	Braunkohle,
$= \delta + 0,45$	" "	Torf,
$= \delta + 0,50$	" "	Holz.

§. 6.

Transmission der Wärme durch feste Wände.

Die Untersuchungen betreffend die Wärmeüberführung und die hiermit im Zusammenhang stehende Bestimmung der Größe der Heizflächen leiten wir durch folgende, die Transmissionsfähigkeit von Wänden überhaupt betreffende Ermittlungen ein.

Es seien zwei Flüssigkeiten, deren Temperaturen T und t betragen, durch eine beliebig gestaltete, aber gleichmäßig dicke Wand getrennt. Es sei ferner $T > t$ und trete in Folge dessen ein Ueberströmen von Wärme aus der wärmeren in die kältere Flüssigkeit ein. Dann wird die Quantität der in einer bestimmten Zeit transmittirten Wärme nicht allein von der Leitungsfähigkeit der Wand, sondern auch von dem Wärmeaufnahme- und Wärmeabgabe-Vermögen derselben abhängen.

Die Wärmeaufnahme wie die Wärmeabgabe geschieht theils durch Berührung, theils durch Strahlung, so zwar, daß im Allgemeinen nur die in unmittelbarem

Contact mit der Wand befindlichen Flüssigkeitstheilchen durch Leitung ihre Wärme verlieren, beziehungsweise erhalten, alle anderen lediglich durch Strahlung; denn diejenige Wärmemenge, welche die letztgenannten Theilchen durch Vermittlung der zwischen ihnen und der Wand gelegenen, nach der Heizfläche hin leiten, resp. von dieser her durch Leitung empfangen, kann, da die hier in's Auge zu fassenden Flüssigkeiten schlechte Wärmeleiter sind, vernachlässigt werden. Die Größe der Fähigkeit, Wärme aufzunehmen und abzugeben, hängt insofern von der Bewegung der Flüssigkeiten ab, als es von wesentlichem Einflusse ist, ob die mit der Wand in Contact befindlichen Flüssigkeitstheilchen schnell durch andere ersetzt werden; sie richtet sich ferner bezüglich der Strahlung nach der Gestalt der Oberfläche.

Zunächst annehmend, daß in dem Prozesse der Wärmeüberführung der Beharrungszustand eingetreten sei, daß also in der Zeiteinheit die gleiche Wärmemenge W aufgenommen, geleitet und abgegeben werde, setzen wir die Temperaturen der die Wand begrenzenden, unendlich dünnen Schichten $= \tau_1$ resp. $= \tau_2$ und stellen die Hypothese auf, daß die durch diese unendlich dünnen Schichten transmittirte Wärmemenge direkt proportional der bezüglichen Temperaturdifferenz und Wandoberfläche sei, daß also, wenn

F_1 die innere Oberfläche,

F_2 die äußere Oberfläche der Wand

bedeutet,
einerseits

$$I. \quad W = \lambda_1 F_1 (T - \tau_1)$$

andererseits

$$II. \quad W = \lambda_2 F_2 (\tau_2 - t)$$

ist. Hierin nennt man:

λ_1 den Wärmeaufnahme-coefficienten,

λ_2 den Wärmeabgabecoefficienten.

Die Wärmeleitung knüpfen wir an die Hypothese, „durch eine Platte von constanter Dicke werde in der Zeiteinheit eine Wärmemenge geleitet, welche direkt proportional ist der Oberfläche, sowie der Temperaturdifferenz zu beiden Seiten der Platte, hingegen umgekehrt proportional der Dicke der Platte.“

Es ist diese Annahme allerdings nicht genau und sogar bei gewissen Materialien, z. B. Holz, geradezu unrichtig, doch ist experimentell festgestellt — namentlich durch Pécelet — daß sie für Metalle und andere, Zwecken der Pyrotechnik dienende Materialien hinreichend genaue Resultate liefert.

Bezeichnet demnach:

F_x die Oberfläche der in constantem Abstände x von F gelegenen Elementarplatte,

τ_x und

$\tau_x + d$ die Temperaturen zu beiden Seiten dieser Platte,

*) Grashof, a. a. O.

e die Dicke der Wand,
 λ den Proportionalitätsfactor, genannt: Leitungscoefficient,

so hat man

$$W = \frac{\lambda F_x [r_x - (r_x + d r_x)]}{dx}$$

und hieraus

$$-d r_x = \frac{W dx}{\lambda F_x}.$$

Nach Integration zwischen den Grenzen $x = 0$ und $x = e$ erhält man

$$r_1 - r_2 = \frac{W}{\lambda} \int_0^e \frac{dx}{F_x} \dots \text{III.}$$

Werden nunmehr die aus den Gleichungen I und II sich ergebenden Werthe:

$$r_1 = T - \frac{W}{\lambda_1 F_1}$$

$$r_2 = t + \frac{W}{\lambda_2 F_2}$$

in Gleichung III eingesetzt, so ergibt sich

$$T - t - \left[\frac{W}{\lambda_1 F_1} + \frac{W}{\lambda_2 F_2} \right] = \frac{W}{\lambda} \int_0^e \frac{dx}{F_x}$$

und hieraus die in der Zeiteinheit durch die Wand transmittirte Wärme

$$4) \dots W = \frac{T - t}{\frac{1}{\lambda_1 F_1} + \frac{1}{\lambda_2 F_2} + \frac{1}{\lambda} \int_0^e \frac{dx}{F_x}}$$

Ist $F_1 = F_2 = F_x = \text{Const} = F$, so wird

$$5) \dots W = k (T - t) F$$

worin

$$6) \dots k = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{e}{\lambda}}$$

der sogenannte Transmissionscoefficient ist.

Formel 5 ist nicht allein für eine ebene Wand, sondern stets brauchbar, sobald die Dicke e im Vergleich zum Krümmungsradius so gering ist, daß nahezu $F_1 = F_2$ wird. Dies ist der Fall bei dünnwandigen Röhren, namentlich bei Dampfkesseln.

Für eine cylindrische Röhre mit verhältnißmäßig dicker Wand, deren innerer Durchmesser d und äußerer Durchmesser D ist, findet man:

1) Für Transmission von Innen nach Außen:

$$F_1 = \pi d \quad ; \quad F_2 = \pi D$$

$$F_x = \pi (d + 2x)$$

und in Folge dessen:

$$\int_0^e \frac{dx}{F_x} = \frac{1}{\pi} \int_0^e \frac{dx}{d + 2x}$$

$$= \frac{1}{2\pi} \left[\ln (d + 2e) - \ln d \right]$$

$$= \frac{1}{2\pi} \ln \frac{D}{d}$$

weßhalb

$$7) \dots W = \frac{\pi (T - t)}{\frac{1}{\lambda_1 d} + \frac{1}{\lambda_2 D} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{D}{d}}$$

2) Für Transmission von Außen nach Innen ist:

$$F_1 = \pi D \quad ; \quad F_2 = \pi d$$

$$F_x = \pi (D - 2x)$$

$$\int_0^e \frac{dx}{F_x} = \frac{1}{\pi} \int_0^e \frac{dx}{D - 2x}$$

$$= \frac{1}{2\pi} \ln \frac{D}{d}$$

mithin

$$8) \dots W = \frac{\pi (T - t)}{\frac{1}{\lambda_1 D} + \frac{1}{\lambda_2 d} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{D}{d}}$$

Für eine quadratische Röhre, und zwar für Transmission von Innen nach Außen, ergibt sich, wenn D die äußere Quadratseite, d die innere

ist,

$$F_1 = 4d \quad ; \quad F_2 = 4D$$

$$F_x = 4 (d + 2x)$$

$$\int_0^e \frac{dx}{F_x} = \frac{1}{8\pi} \ln \frac{D}{d}$$

$$9) \dots W = \frac{4 (T - t)}{\frac{1}{\lambda_1 d} + \frac{1}{\lambda_2 D} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{D}{d}}$$

In diesen Formeln sind für λ folgende größtentheils von Pécclet angegebene Werthe zu setzen.*)

Kupfer	$\lambda = 69$
Eisen und Zink	28
Zinn	23
Blei	14
Coks	5
Marmor	2,8 bis 3,4
Kalkstein	1,2 bis 1,8
Glas	0,8
Gebrauntes Thon	0,6
Eichenholz	0,21
Tannenholz parallel zu den Fasern	0,17
Desgl. senkrecht zu den Fasern	0,10
Sand	0,27

*) Vgl. Grasshof, Theoretische Maschinenlehre 1875, pag. 939 u. f.