

$$h_r = \frac{G_l - G_g}{f_0} = \left( \frac{V \cdot p_l}{R \cdot T_l} - \frac{V \cdot p_g}{R \cdot T_g} \right) \frac{1}{f_0},$$

$$h_r = \left( \frac{f_0 \cdot H_r \cdot p_l}{R \cdot T_l} - \frac{f_0 \cdot H_r \cdot p_g}{R \cdot T_g} \right) \frac{1}{f_0}.$$

Da der Druckunterschied gering ist, setzt man

$$p_l = p_g = p \approx 1 \text{ kg/qcm} = 10000 \text{ mm WS},$$

$$h_r = \frac{H_r \cdot p}{R} \left( \frac{1}{T_l} - \frac{1}{T_g} \right) \text{ in kg/qcm},$$

$$h_r = \frac{H_r \cdot 10000}{29,3} \left( \frac{1}{T_l} - \frac{1}{T_g} \right) \text{ in mm WS}.$$

Wegen der Reibungsverluste muß mit einem Wirkungsgrade gerechnet werden, so daß nur der Teil  $\eta \cdot H_r$  der Schornsteinhöhe für die Druckhöhe in Betracht kommt, während  $(1 - \eta) \cdot H_r$  zur Überwindung der Reibungswiderstände dient; man setzt diesen letzteren Betrag mit  $6 d_0$  in Rechnung.

Daher

$$\left. \begin{aligned} h_r &= \eta H_r \frac{1000}{2,93} \left( \frac{1}{T_l} - \frac{1}{T_g} \right), \\ h_r &= (H_r - 6 d_0) \frac{1000}{2,93} \left( \frac{1}{T_l} - \frac{1}{T_g} \right). \end{aligned} \right\} \quad (59)$$

Hieraus findet sich durch einfache Umformung

$$H_r = \frac{2,93 h_r}{1000 \left( \frac{1}{T_l} - \frac{1}{T_g} \right)} + 6 d_0. \quad (60)$$

Nach von Reiche ist

$$H_r = 0,00277 \left( \frac{B}{R} \right)^2 + 6 d_0, \quad (61)$$

worin  $B$  die Brennstoffmenge in kg/Std.,  $R$  die Rostfläche ist.

In der Praxis benutzt man mit Erfolg folgende gegenüber der von G. Lang<sup>1)</sup> aufgestellten noch etwas vereinfachte Annäherungsformel

$$H_r = [15 \text{ bis } 20 \times d_0 + 5 + 0,05(l - 20)] \frac{700 - t_g}{200 + t_g}, \quad (62)$$

worin  $l$  die Länge des Weges, welchen die Rauchgase zurücklegen müssen, und  $t_g$  die mittlere Rauchgastemperatur im Schornstein beträgt.

Die Zahl 15 bis 20 vor  $d_0$  muß nach der Erfahrung eingesetzt werden; man wählt einen höheren Wert bei engen Zügen und dort, wo größere Reibungswiderstände auftreten, z. B. bei kombinierten Kesseln mit Heizröhren.

Wenn Rauchgasvorwärmer in Frage kommen, so macht man zweckmäßig den Schornstein um etwa 5 m höher, um den Zugverlusten Rechnung zu tragen, die man zu 2 bis 3 mm WS annehmen kann.

Den Temperaturabfall vom Fuß des Schornsteines bis zur Mündung nimmt man, wie in Beispiel 20 bereits erwähnt, zu etwa 10 v. H. an.

Beispiel 21. Für die im Beispiel 20 gegebenen Verhältnisse ist die Schornsteinhöhe zu berechnen für  $h_r = 13$  mm WS Zugstärke.

Es sei

$$t_l = 17^\circ \text{ C}, \quad T_l = 290^\circ, \quad t_g = \approx 170^\circ \text{ C}, \quad T_g = 443^\circ; \quad d_0 = 1,3 \text{ m},$$

dann ist nach Gl. (60)

$$H_r = \frac{2,93 \cdot 13}{1000 \left( \frac{1}{290} - \frac{1}{443} \right)} + 6 d_0 = 32 + 7,8 = 39,8 \text{ m} \approx 40 \text{ m}.$$

<sup>1)</sup> Z. Ver. deutsch. Ing. 1899, S. 896.

Nach Gl. (62) ist mit  $l = 50$  m und  $18 d_0$

$$H_r = 18 \cdot 1,3 + 5 + 0,05(50 - 30) \frac{700 - 170}{200 + 170} = 41,4 \approx 42 \text{ m}.$$

Zusammenfassend sei wiederholt:

Die Austrittsgeschwindigkeit und die Höhe des Schornsteines richten sich nach den örtlichen Verhältnissen; es muß unter anderem berücksichtigt werden: die Zuglänge, die Fuchsform, die Temperatur der abziehenden Gase, ob ein Vorwärmer oder Überhitzer vorhanden ist und die Schichthöhe des Brennstoffes auf dem Rost. Ferner, ob die Gase Feuchtigkeit enthalten, wie z. B. bei der erdigen Rohbraunkohle, die meist mit 50 bis 60 v. H. Wassergehalt verfeuert wird. Als kleinste Schornsteinhöhe gilt etwa 16 m. Innerhalb der Städte sind jedoch die jeweils geltenden baupolizeilichen Vorschriften maßgebend, welche z. B. für Hannover fordern, daß kein Schornstein unter 35 m Höhe gebaut werden darf. Auch die Nähe von Bergen ist für die Höhenbemessung in Rücksicht zu ziehen.

Folgende Zahlentafel Nr. 56 ist nach den Gleichungen (58) und (61) berechnet, und zwar sind diese Gleichungen deshalb gewählt, weil sie die Abmessungen nur als Funktionen der Brennstoffmengen und Brenngeschwindigkeiten, also in möglichst allgemeinen Werten geben, ohne irgend welche besonderen Verhältnisse zu berücksichtigen; die Tafel ist daher geeignet, bei Überschlagsrechnungen und zum Vergleich zu dienen.

Will man die Schornsteinabmessungen für die Dampfmenge einer Kesselanlage bestimmen, so ist zu berücksichtigen, daß bei einer angenommenen Kohle von 7300 WE Heizwert und bei Erzeugung von Heißdampf von  $300^\circ \text{ C}$  aus vorgewärmtem Speisewasser sich eine etwa 8fache Verdampfung ergibt, so daß man also nur die Dampfmenge durch 8 zu teilen hat, um die Werte für  $B$  zu erhalten.

Werden Sägespäne, Holz u. a., überhaupt trockene minderwertige Brennstoffe verfeuert, so kann der Schornstein wie für Steinkohle berechnet werden, indem man von der Dampfmenge ausgeht. Bei minderwertiger Braunkohle mit 40 bis 50 v. H. Wassergehalt wählt man den Schornstein um 3 v. H., bei 50 bis 60 v. H. Wassergehalt um 5 v. H. im Durchmesser größer.

## 4. Der gemauerte Schornstein.

### A. Berechnung auf Standfestigkeit.<sup>1)</sup>

Zum Bau eines Schornsteines ist die Genehmigung der zuständigen Behörde erforderlich, welche auf Grund einer Prüfung der Stabilitätsberechnung erteilt wird. Als Grundlage zu dieser Berechnung dient in Preußen der Ministerialerlaß vom 30. April 1902<sup>2)</sup>.

Außerdem seien die Beschlüsse der „Kommission zur Beratung der Grundsätze für die Berechnung der Standfestigkeit von Schornsteinen“<sup>3)</sup>, welche teilweise über die Forderungen des Ministerialerlasses hinausgehen, der Beachtung empfohlen, ebenso die Ausführungen von C. Gaab<sup>4)</sup>, welche eine Kritik einzelner Bestimmungen des Ministerialerlasses enthalten.

<sup>1)</sup> J. Goebel, Standfestigkeit eines Schornsteines. Zeitschr. d. Ver. deutsch. Ing. 1898, S. 180 u. f.; G. Lang, Einheitliche Bestimmungen usw. Z. Ver. deutsch. Ing. 1899, S. 894 u. f.

<sup>2)</sup> Abgedruckt in Z. Ver. deutsch. Ing. 1902, S. 1171.

<sup>3)</sup> Abgedruckt in Z. Ver. deutsch. Ing. 1900, S. 842 u. f.

<sup>4)</sup> C. Gaab, Die Berechnung von Fabrikschornsteinen. Z. Ver. deutsch. Ing. 1907, S. 646 u. f.

Zahlentafel Nr. 56

über Schornsteinabmessungen, bezogen auf den stündlichen Kohlenverbrauch, berechnet nach v. Reiche.

Kohlenverbrauch		Ohne Reserve		Mit Reserve		Kohlenverbrauch		Ohne Reserve		Mit Reserve	
in 1 Stunde (gesamt) $\frac{B}{R}$	in 1 Stunde auf 1 qm Rostfläche $\frac{B}{R}$	obere lichte Weite $d_0$	Höhe $H_r$	obere lichte Weite $d_0$	Höhe $H_r$	in 1 Stunde (gesamt) $\frac{B}{R}$	in 1 Stunde auf 1 qm Rostfläche $\frac{B}{R}$	obere lichte Weite $d_0$	Höhe $H_r$	obere lichte Weite $d_0$	Höhe $H_r$
kg	kg/qm	m	m	m	m	kg	kg/qm	m	m	m	m
50	60	0,6	13,6	0,60	14 <sup>1)</sup>	1400	100	1,64	37,6	1,85	40
100	70	0,6	17,2	0,63	18	1500	105	1,68	40,4	1,90	42
150	„	0,68	17,6	0,75	19	1600	„	1,71	40,9	1,95	44
200	80	0,75	22,2	0,85	23	1700	„	1,77	41,2	2,00	44
250	„	0,82	22,6	0,90	24	1800	„	1,81	41,5	2,00	44
300	„	0,88	23	1,00	24	1900	„	1,85	41,7	2,05	44
350	„	0,98	23,6	1,05	24	2000	110	1,88	44,6	2,10	46
400	„	0,99	23,7	1,10	25	2100	„	1,92	44,8	2,15	47
450	„	1,04	24,0	1,15	25	2200	„	1,96	45,1	2,20	47
500	90	1,08	28,7	1,20	30	2300	„	1,99	45,2	2,25	47
600	„	1,16	29,2	1,30	30	2400	„	2,03	45,5	2,25	47
700	„	1,24	27,7 <sup>1)</sup>	1,40	32	2500	115	2,06	49,0	2,30	50
800	„	1,31	30	1,45	32	2600	„	2,09	49,1	2,35	50
900	„	1,37	30,4	1,55	32	2700	„	2,13	49,4	2,40	51
1000	100	1,42	36,2	1,60	38	2800	„	2,16	49,6	2,45	51
1100	„	1,48	36,6	1,65	38	2900	„	2,19	50	2,45	52
1200	„	1,54	37	1,70	38	3000	120	2,20	53,2	2,50	55
1300	„	1,59	37,3	1,80	40						

Der Querschnitt des Schornsteines an irgendeiner Stelle wird durch das Eigengewicht  $G$  des über ihm liegenden Schornsteinkörpers und durch das Moment des Winddruckes beansprucht.

Als Winddruck  $\mathfrak{W}$  ist nach dem erwähnten Ministerialerlaß bei der Berechnung der Druckspannungen 150 kg/qm, bei der Prüfung, wie weit die Fugen klaffen 125 kg/qm anzunehmen. Für Schornsteine an der Seeküste ist, den baupolizeilichen Vorschriften der Küstenstädte entsprechend,  $\mathfrak{W} = 200$  kg/qm zu nehmen.

Dem Umstand, daß die Windstärke mit dem Abstand vom Erdboden zunimmt, wird durch die sächsische Vorschrift  $\mathfrak{W} = 115 + 0,6 H_r$  Rechnung getragen, worin  $H_r$  die Schornsteinhöhe ab Flur bedeutet.

Ist  $F$  der Vertikalschnitt der vom Wind getroffenen Schornsteinsäule bei acht- und sechseckigem Querschnitt in der Diagonale, bei rechteckigem in der Hauptachse gemessen, so ist der Gesamtwinddruck  $P$

- bei runden Säulen . . . . .  $P = 0,67 \mathfrak{W} \cdot F$ ,
- „ achteckigen Säulen . . . . .  $P = 0,71 \mathfrak{W} \cdot F$ ,
- „ rechteckigen Säulen . . . . .  $P = 1,00 \mathfrak{W} \cdot F$ .

In diesen Werten für  $P$  ist auch der etwaige Einfluß einer Saugwirkung auf der Leeseite enthalten.

Die Fläche  $F$  ist ein Trapez von der Größe

$$F = (R_u + R_o) \cdot h. \tag{63}$$

Die Entfernung des Schwerpunktes dieser Fläche, welcher Angriffspunkt des Winddruckes ist, beträgt

$$s = \frac{h}{3} \cdot \frac{R_u + 2 R_o}{R_u + R_o}, \tag{64}$$

worin  $h$  die Schafthöhe,  $R_u$  den äußeren Halbmesser an der Sohle,  $R_o$  den äußeren oberen Halbmesser bedeuten.

In Fig. 350 sei der obere Teil eines Schornsteines skizziert, dessen untere Querschnittsfläche untersucht werden soll. Dabei sind folgende Bedingungen zu erfüllen:

1. mit einer Zugspannung auf der Windseite, also an der Stelle  $A$  darf nicht gerechnet werden;
2. die Fugen dürfen sich auf der Windseite bei einem Winddruck  $\mathfrak{W} = 125$  kg/qm höchstens bis zum Schwerpunkt öffnen; d. h. während die auf der Windseite gelegene Hälfte des Querschnittes spannungslos ist, verteilt sich der gesamte Druck auf die andere Hälfte;
3. die Kantenpressungen sollen unter Annahme eines Winddruckes von 150 kg/qm bestimmte Werte nicht überschreiten.

Für diese Werte ist weniger die Festigkeit der Mauersteine als diejenige des Mörtels maßgebend, da erstere in der Regel die letztere weit übertrifft.

Es ist zugelassen:

Für gewöhnliches Ziegelmauerwerk mit Kalkmörtel 1 R.-T. Kalk und 3 R.-T. Sand

$$\sigma_m \leq 7 \text{ kg/qcm};$$

für Mauerwerk aus Hartbrandsteinen mit Kalk-Zementmörtel 1 : 2 : 6 bis 8 (1 R.-T. Zement, 2 R.-T. Kalk und 6 bis 8 R.-T. Sand)

$$\sigma_m \leq 12-15 \text{ kg/qcm}.$$

Mit Rücksicht auf die Zeit, welche der Mörtel zum Abbinden braucht, die häufig länger als die Bauzeit des Schornsteines ist, wird empfohlen,

$\sigma_m$  kg/qcm  $\leq 5 + 0,15 \times$  Schornsteinhöhe in m festzusetzen.

1. Ist kein Winddruck vorhanden, so erfährt der Querschnitt durch das Eigengewicht  $G$  die Druckbelastung

$$\sigma_0 = \frac{G}{f}, \tag{65}$$

welche gleichmäßig über den Querschnitt verteilt ist (Fig. 350c).

2. Wird der Schornstein vom Winddruck getroffen, so entsteht ein Kippmoment

$$M = P \cdot s,$$

<sup>1)</sup> Für die auszuführende Höhe sind die örtlichen Vorschriften zu berücksichtigen.

welches im Querschnitt die Randspannung

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (66)$$

hervorrufft;

$$W = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{R^4 - r^4}{R}$$

ist das Widerstandsmoment des Kreisrings.

Wirkt nur das Moment  $M$ , so würde die Nullachse des Querschnittes mit einem Durchmesser zusammenfallen, entsprechend der Spannungsverteilung nach Fig. 350d, die auf der einen Hälfte Druckbelastung  $+\sigma$ , auf der anderen Hälfte Zugbelastung  $-\sigma$  ergibt.

Nun wirken aber Druck und Biegung zusammen auf den Querschnitt, und wir erhalten demnach die Randspannungen:

An der Stelle  $A$

$$\sigma' = \sigma_0 - \sigma = \frac{G}{f} - \frac{M}{W} \quad (67)$$

und an der Stelle  $B$

$$\sigma'' = \sigma_0 + \sigma = \frac{G}{f} + \frac{M}{W} \quad (68)$$

Dabei kann die Spannungsverteilung nach Fig. 350e erfolgen, wenn

$\frac{M}{W} > \frac{G}{f}$ ; dann erhalten wir auf der Windseite Zugspannung, was nach Bedingung 1 nicht zulässig ist.

Den Fall  $\frac{M}{W} < \frac{G}{f}$  veranschaulicht Fig. 350f; hier gibt es nur Druckspannungen.

In beiden Fällen ist die Nullachse nach links verschoben und fällt im zweiten Falle ganz aus dem Querschnitt heraus.

Man erkennt daraus, daß das größte Moment  $M$  sich für die Lage der Nullachse an der Kante  $A$  und für eine Kantenpressung  $\sigma''$  gleich der doppelten vom Eigengewicht herrührenden Belastung ergeben würde; damit würde aber nicht

immer die Druckfestigkeit des Materials genügend ausgenutzt sein, daher die Bestimmung, daß die Fugen klaffen dürfen. Dadurch verschiebt sich die Nullachse wieder nach rechts, äußerstenfalls bis zur Mitte des Querschnittes, und der rechtsliegende Teil wird stärker belastet, während der linke unbelastet bleibt (s. Fig. 350g). Der Abstand der Nullachse, von  $B$  aus gerechnet, wird mit  $z$  bezeichnet. Für diesen Fall ist die größte Kantenpressung  $\sigma_m$  zu ermitteln, welche die unter 3 aufgeführten Werte nicht überschreiten soll. —

Winddruck und Eigengewicht setzen sich zu einer Mittelkraft zusammen, welche den Punkt  $E$  des Querschnittes im Abstand  $a$  vom Schwerpunkt trifft.

Aus Fig. 350a ergibt sich für  $a$  die Beziehung

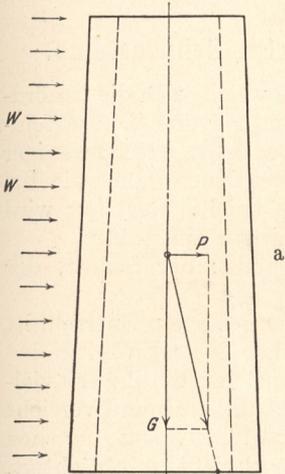
$$P : G = a : s$$

und daraus

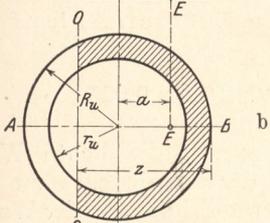
$$a = \frac{P \cdot s}{G} = \frac{M}{G} \quad (69)$$

dieses Maß  $a$ , welches als Ausschlag des Druckmittelpunktes bezeichnet wird, ist mit Rücksicht auf folgenden Satz der Kerntheorie von besonderer Wichtigkeit:

„Der Kern des Querschnittes ist die Fläche, innerhalb deren der Angriffspunkt  $E$  der Kraft liegen muß, wenn der Querschnitt ausschließlich Spannungen von einerlei Vorzeichen erhalten soll.“<sup>1)</sup>



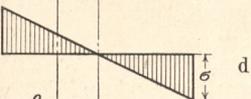
a



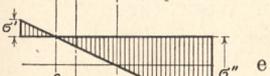
b



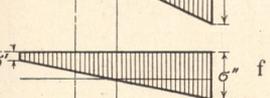
c



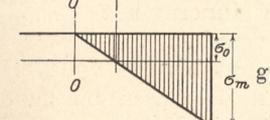
d



e



f



g

Fig. 350.

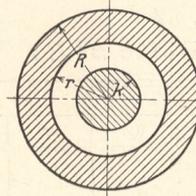


Fig. 351.

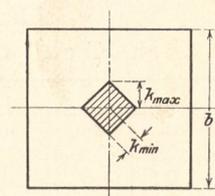


Fig. 352.

Für den Kreisring ist der Kern eine Kreisfläche mit dem Radius

$$k = \frac{1}{4} R \left( 1 + \frac{r^2}{R^2} \right), \quad (70)$$

für das Quadrat ist der Kern ein Quadrat mit

$$k_{\max} = \frac{b}{6}, \quad (71)$$

$$k_{\min} = \frac{b}{6\sqrt{2}} = 0,1179 b. \quad (72)$$

Daraus geht hervor, daß für die Spannungsverteilung nach Fig. 350f der Punkt  $E$  in der Kernfläche liegen, daß also  $a \leq k$  sein muß.

Für den Grenzfall  $a = k$  geht die Nullachse an der Stelle  $A$  durch die Kante, so daß

$$\sigma' = \frac{G}{f} - \frac{M}{W} = 0.$$

Für  $M$  kann man nach Gl. (69)  $G \cdot a$  setzen, so daß aus

$$\frac{G}{f} = \frac{G \cdot a}{W}$$

$$a = \frac{W}{f} \quad \text{oder} \quad W = a \cdot f = k \cdot f \quad (73)$$

folgt; damit erhält man aus Gl. (67) und (68)

$$\sigma' = \frac{G}{f} \left( 1 - \frac{a}{k} \right) = \sigma_0 \cdot \left( 1 - \frac{a}{k} \right) \quad (73)$$

und

$$\sigma'' = \frac{G}{f} \left( 1 + \frac{a}{k} \right) = \sigma_0 \cdot \left( 1 + \frac{a}{k} \right). \quad (74)$$

Will man nun für die Belastungsart (Fig. 350g) die Maximalspannung  $\sigma_m$  ermitteln, so liegt die Schwierigkeit darin, daß die Druckverteilung nicht über eine Fläche von regelmäßiger Figur, sondern über eine Fläche von der schraffierten Form (Fig. 350b) stattfindet.

<sup>1)</sup> Taschenbuch d. Hütte 1908, S. 477.

Diese Aufgabe ist von Keck und Göbel durch die Berechnung der Zahlentafeln (Nr. 57 und 58) erleichtert. Nachdem man den Ausschlag  $a$  des Druckmittelpunktes in einfacher Weise ermittelt hat, findet man in Zahlentafel Nr. 57 durch die Werte  $z$  die zugehörigen Lagen der Nullachse, und aus Zahlentafel Nr. 58 die größten Kantenpressungen aus den Werten  $\frac{\sigma_m}{\sigma_0}$ .

Nach G. Lang kann man  $\sigma_m$  berechnen nach

$$\sigma_m = \sigma'' + \sigma' \left( \frac{a - k}{c - k} \right)^2, \tag{75}$$

worin  $c = \frac{R}{2} + \frac{r}{4}$  ist, und die Bedingung, daß die Fugen nicht weiter als bis zur Mitte klaffen, durch die Gleichung  $a \leq c$  gegeben ist.

**Zahlentafel Nr. 57**

nach Keck<sup>1)</sup> für die Werte  $z:R$ .

$a:R$	$r:R$						
	0,0	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,25	2,00						
0,30	1,82						
0,35	1,66	1,89	1,98				
0,40	1,51	1,75	1,84	1,93			
0,45	1,37	1,61	1,71	1,81	1,90		
0,50	1,23	1,46	1,56	1,66	1,78	1,89	2,00
0,55	1,10	1,29	1,39	1,50	1,62	1,74	1,87
0,60	0,97	1,12	1,21	1,32	1,45	1,58	1,71
0,65	0,84	0,94	1,02	1,13	1,25	1,40	1,54
0,70	0,72	0,75	0,82	0,93	1,05	1,20	1,35
0,75	0,59	0,60	0,64	0,72	0,85	0,99	1,15
0,80	0,47	0,47	0,48	0,52	0,61	0,77	0,94
0,85	0,35	0,35	0,35	0,36	0,42	0,55	0,72
0,90	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,32	0,49
0,95	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,25

**Zahlentafel Nr. 58**

nach Göbel<sup>2)</sup> für die Werte  $\sigma_m:\sigma_0$ .

$a:R$	$r:R$						
	0,0	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,05	1,20	1,16	1,15	1,13	1,12	1,10	1,10
0,10	1,40	1,32	1,29	1,27	1,24	1,22	1,20
0,15	1,60	1,48	1,44	1,40	1,37	1,33	1,30
0,20	1,80	1,64	1,59	1,54	1,49	1,44	1,40
0,25	2,00	1,80	1,73	1,67	1,61	1,55	1,50
0,30	2,23	1,96	1,88	1,81	1,73	1,66	1,60
0,35	2,48	2,12	2,04	1,94	1,85	1,77	1,70
0,40	2,76	2,29	2,20	2,07	1,98	1,88	1,80
0,45	3,11	2,51	2,39	2,23	2,10	1,99	1,90
0,50	3,55	2,80	2,61	2,42	2,26	2,10	2,0
0,55	4,15	3,14	2,89	2,67	2,42	2,26	2,17
0,60	4,96	3,58	3,24	2,92	2,64	2,42	2,26
0,65	6,00	4,34	3,80	3,30	2,92	2,64	2,42
0,70	7,48	5,40	4,65	3,86	3,33	2,95	2,64
0,75	9,93	7,26	5,97	4,81	3,93	3,33	2,89
0,80	13,87	10,05	8,80	6,53	4,93	3,96	3,27
0,85	21,08	15,55	13,32	10,43	7,16	4,50	3,77
0,90	38,25	30,80	25,80	19,85	14,60	7,13	4,71
0,95	96,10	72,20	62,20	50,20	34,60	19,80	6,72
1,00	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞

<sup>1)</sup> Zeitschr. d. hannoverschen Architekten- und Ingenieur-Vereins 1882, S. 627.

<sup>2)</sup> Z. Ver. deutsch. Ing. 1898, S. 180.

Nach vorstehenden Ausführungen wird nun die Berechnung der Kantenpressungen  $\sigma_m$  für verschiedene Querschnitte vorgenommen, wie später noch an einem Beispiel erläutert werden wird; von besonderer Wichtigkeit ist die Sohle des Schaftes und die Fundamentsohle; außerdem genügt es, die Sohlflächen der einzelnen Schafttrommeln zu untersuchen.

Für die Fundamentsohle darf bei gutem Baugrunde  $\sigma_m=3$  kg/qcm sein (ausnahmsweise ist  $\sigma \leq 4$  kg/qcm zugelassen). Ein Abheben der Kante auf der Windseite darf nicht erfolgen, es muß also der Ausschlag „ $a$ “ innerhalb des Kernes bleiben. Die Standsicherheit muß ohne Hinzurechnung der Erdlast erreicht sein.

**B. Ausführung gemauerter Schornsteine.**

Außer der Standfestigkeit, auf welche sich die behördliche Prüfung allein erstreckt, sind für den Schornsteinbau eine Reihe von Punkten zu beachten, welche weniger der Rechnung zugänglich sind, bei denen daher die Erfahrung des Erbauers eine Rolle spielt. Der Bau wird daher am besten durch Sonderfirmen ausgeführt.

Die Teile des Schornsteines sind: der Schaft, der Sockel und der Unterbau.

Der Sockel von 4eckigem oder 8eckigem Querschnitt und etwa  $\frac{1}{6}$  der Schornsteinhöhe hat eigentlich keinen besonderen Zweck. Man führt auch bei neueren Bauten vielfach den Schaft bis auf den Unterbau herab und versieht ihn in Höhe von etwa 1 m mit einem Wulst. Das Aussehen wird durch diese einfachere Gestaltung nicht beeinträchtigt.

Der Schaft wird mit einem äußeren Anlauf von der Größe

$$\text{tg } \alpha = \frac{R_u - R_o}{h} = 0,015 \text{ bis } 0,025$$

ausgeführt. An der Mündung soll die lichte Weite nicht unter 0,6 m sein, damit der Schornstein ohne Gerüst von innen gemauert werden kann. Die Wandstärke, die an der Mündung 15, 20 und 25 cm bei einer lichten Weite  $d_0 \leq 1,5$  m,  $d_0 = 1,5$  bis 2 m und  $d_0 \geq 2$  m beträgt, nimmt nach unten in Absätzen von 4 bis 7 m Höhe um je 5,0 cm zu.

Die Abstufungen werden Schüsse oder Schafttrommeln genannt. Der innere Anlauf ist wegen der nach unten zunehmenden Wandstärke um 0,012 bis 0,007 geringer als der äußere.

Rauchgase von sehr hoher Temperatur rufen am Schaft Wärmespannungen hervor, welche ein Reißen des Mauerwerks verursachen können, saure Gase greifen das Mauerwerk an. Zum Schutz gegen diese Einwirkungen wird der Schaft im Innern mit einem feuerfesten Futter versehen, welches im ersteren Falle jedoch nicht bis zur vollen Höhe aufgeführt zu werden braucht. Bei Gasen bis zu 350° kann man jedoch unbedenklich ein Futter aus Radial- bzw. Hartbrandsteinen nehmen. Futter und Außenmantel müssen vollständig voneinander getrennt sein, damit sich das erstere frei ausdehnen und zusammenziehen kann. Der Spielraum beträgt etwa 2 cm, der Zwischenraum kann mit Sand oder Kieselgur ausgeführt sein oder bleibt leer; am besten, aber auch am teuersten ist die Ausfüllung mit gesinterten Kieselgurplatten.

Auch bei Rauchgasen von nicht zu hoher Temperatur wirkt das Futter wärmeisolierend und hat somit einen günstigen Einfluß auf die Zugstärke.

Der Schornsteinkopf wird mit einer leichten einfachen Bekrönung aus Sandstein oder Zement nach Fig. 353

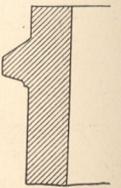


Fig. 353.

versehen, welche durch Ablenkung des Windes die Zugwirkung verstärkt. Eine eiserne Bekrönung sollte vermieden werden, da die Gefahr besteht, daß sie durchrostet und ev. herunterfällt. Der Schornstein ist mit einem Blitzableiter ausgerüstet und sollte ferner, damit er jederzeit untersucht werden kann, nicht nur innen, sondern auch außen mit  $\square$ -förmigen Steig- und Schutz-eisen versehen sein, und zwar derart, daß der Mann im Innern der Schutz-eisen hinaufsteigt. Die Eisen sind gut gegen Rost zu schützen, am besten zu verzinken.

Durch die Einmündung des Fuchses in den Schornstein entsteht eine Unterbrechung des Mauerwerkes, die eventuell durch Einziehen von Trägern oder Mauerverstärkungen auszugleichen ist. Auf jeden Fall soll

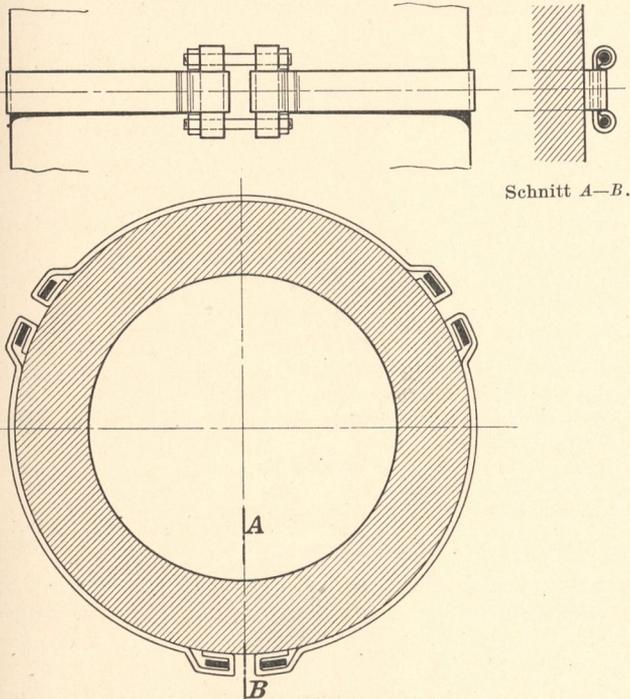


Fig. 354. Eisenband mit Spannschlössern.  
Ausführung: Friedrich von Hadeln, Hannover.

jedoch auf der gegenüberliegenden Seite, auch wenn dort eine Einsteigeöffnung nicht notwendig ist, eine später zu vermauernde Unterbrechung von gleicher Größe angebracht werden, damit das Mauerwerk beim Bau sich gleichmäßig setzt.

Wenn heißgehende oder feuchte Gase vorkommen, also bei Braunkohlen, oder wenn die Brennstoffe zu verpuffender Verbrennung neigen, versieht man den Schornstein gern mit eisernen Querbändern, d. h. man „bindet ihn ein“, um ein Reißen zu verhindern. Fig. 354 stellt ein Eisenband mit Spannschlössern dar, welche den Vorteil einer bequemen und sicheren Montage bieten. Es ist zu beachten, daß alle Eisenbänder leitend mit dem Blitzableiter verbunden werden müssen.

Beispiel 22. In Fig. 355 ist ein Schornstein von 40 m Höhe und 1,5 m oberer lichter Weite dargestellt. Es sollen nach vorstehender Entwicklung die Kantenpressungen in der Lagerfuge I-I und der Grundplatte berechnet werden.

Form und Abmessungen des Schornsteines gehen aus der Figur hervor, die Querschnittsformen von Schaft, Sockel und Grundplatte sind rund.

Folgende Abmessungen seien hervorgehoben:

Schafthöhe . . . . .	$h = 39$	m
oberer äußerer Halbmesser . . . . .	$R_o = 1,0$	„
oberer innerer „ . . . . .	$r_o = 0,75$	„
unterer äußerer „ . . . . .	$R_u = 1,67$	„
unterer innerer „ . . . . .	$r_u = 1,07$	„
äußerer Anlauf . . . . .	$tg \alpha = 0,016$	
Wandstärke der obersten Trommel	$= 0,25$	m

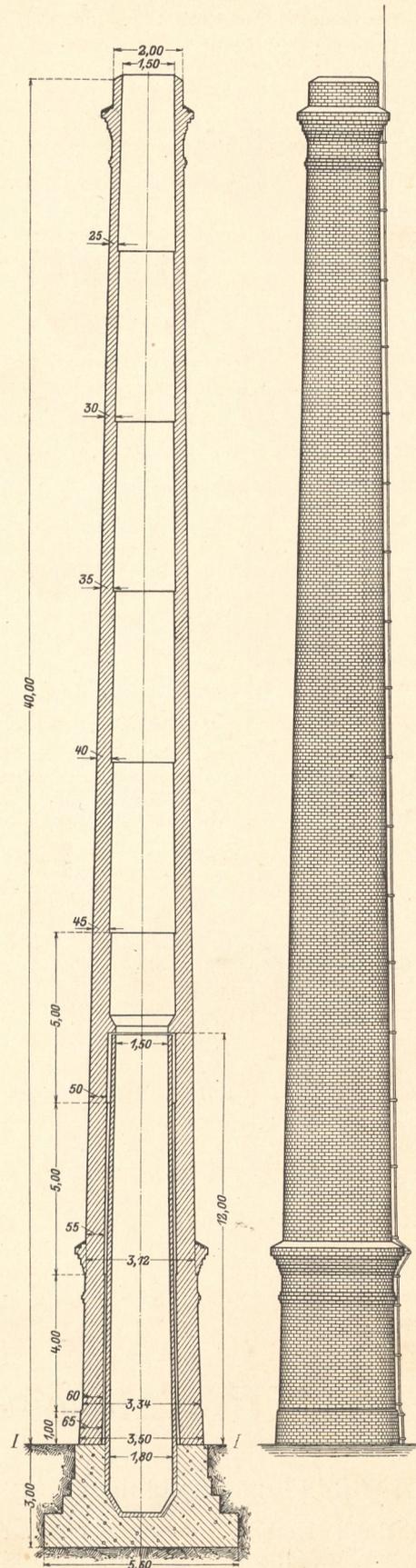


Fig. 355. Schornstein von 40 m Höhe und 1,5 m oberer lichter Weite.  
Ausführung: Friedrich von Hadeln, Hannover.

Zunahme der Wandstärke für die folgenden Trommeln 50 mm.  
Das Mauerwerk von Schaft und Sockel besteht aus Radialsteinen in Kalk-Zementmörtel (1 R.-T. Zement, 2 R.-T. Kalk, 6 R.-T. Sand), spez. Gew.  $\gamma = 1700$  kg/cbm.  
Das Grundbaumauerwerk besteht aus Zementbeton 1:7 mit  $\gamma = 2000$  kg/cbm.

Gewicht des Schaftes  $G = 199\,784$  kg.  
 Querschnitt der Schaftsohle  $f = 51\,648$  qcm.  
 Druckspannung durch das Eigengewicht

$$\sigma_0 = \frac{G}{f} = \frac{199\,784}{51\,648} = 3,87 \text{ kg/qcm.}$$

Angriffsfläche des Winddruckes

$$F = (R_u + R_o) h = 2,67 \cdot 39 = 104,13 \text{ qm.}$$

Schwerpunkthöhe

$$s = \frac{h}{3} \frac{R_u + 2 R_o}{R_u + R_o} = \frac{39}{3} \cdot \frac{1,67 + 2}{1,67 + 1} = 17,87 \text{ m.}$$

Winddruck:

$$\text{(bei } \mathfrak{B} = 125 \text{ kg/qm)} \quad P = 0,67 \cdot 125 \cdot 104,13 = 8\,721 \text{ kg,}$$

$$\text{(bei } \mathfrak{B} = 150 \text{ kg/qm)} \quad P' = 0,67 \cdot 150 \cdot 104,13 = 10\,465 \text{ kg.}$$

Moment des Winddruckes:

$$\text{(bei } \mathfrak{B} = 125 \text{ kg/qm)} \quad M = P \cdot s = 8\,721 \cdot 17,87 = 155\,844 \text{ m/kg,}$$

$$\text{(bei } \mathfrak{B} = 150 \text{ kg/qm)} \quad M' = P' \cdot s = 10\,465 \cdot 17,87 = 187\,010 \text{ m/kg.}$$

Widerstandsmoment des Querschnittes

$$W = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{167^4 - 107^4}{167} = 3\,020\,000 \text{ cm}^3.$$

Daraus ergibt sich für  $M'$  die Biegungsbeanspruchung

$$\sigma = \frac{M'}{W} = \frac{18\,701\,000}{3\,020\,000} = 6,2 \text{ kg/qcm}$$

und die Gesamtspannungen:

$$\sigma' = \sigma_0 - \sigma = -2,33 \text{ kg/qcm (Zug),}$$

$$\sigma'' = \sigma_0 + \sigma = +10,07 \quad \text{,,} \quad \text{(Druck).}$$

Diese treten jedoch nicht auf, wenn die Fugen klaffen; für diesen Fall sei die große Kantenpressung  $\sigma_m$  berechnet.

a) Mit Hilfe der Zahlentafeln Nr. 57 und 58.

Es beträgt der Ausschlag des Druckmittelpunktes:

$$\text{(für } \mathfrak{B} = 125 \text{ kg/qm)} \quad a = \frac{M}{G} = \frac{155\,844}{199\,784} = 0,78 \text{ m,}$$

$$\text{(für } \mathfrak{B} = 150 \text{ kg/qm)} \quad a' = \frac{M'}{G} = \frac{187\,010}{199\,784} = 0,936 \text{ m.}$$

Man findet nun aus Zahlentafel Nr. 57 für

$$\frac{a'}{R_u} = \frac{0,936}{1,67} = 0,56$$

und für

$$\frac{r_u}{R_u} = \frac{1,07}{1,67} = 0,64$$

durch Interpolation den Wert

$$\frac{z}{R} = 1,398,$$

woraus

$$z = 2,36 \text{ m,}$$

d. h. die Nullachse liegt um 0,69 m links von der Mitte, da dies hiermit für  $\mathfrak{B} = 150$  kg/qm nachgewiesen ist, so ist die Bedingung, daß bei 125 kg Winddruck die Fugen nicht weiter als bis zur Mitte klaffen dürfen, reichlich erfüllt.

Aus Zahlentafel Nr. 58 findet man ebenfalls für  $\frac{a'}{R_u} = 0,56$  und

$$\frac{r_u}{R_u} = 0,64$$

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_0} = 2,98$$

und

$$\sigma_m = 2,98 \cdot 3,87 = 11,5 \text{ kg/qcm;}$$

zulässig sind 12 bis 15 kg/qcm.

b) Berechnung nach Gl. (73) und (74).

Es ist die Größe des Kernhalbmessers für den Kreisring:

$$k = \frac{1}{4} 1,67 \left( 1 + \frac{1,07^2}{1,67^2} \right) = 0,59 \text{ m,}$$

$$\sigma' = \sigma_0 \left( 1 - \frac{a}{k} \right) = 3,87 \left( 1 - \frac{0,936}{0,59} \right) = -2,28 \text{ kg/qcm,}$$

$$\sigma'' = \sigma_0 \left( 1 + \frac{a}{k} \right) = 3,87 \left( 1 + \frac{0,936}{0,59} \right) = 10 \text{ kg/qcm,}$$

$$\sigma_m = \sigma'' + \sigma' \left( \frac{a - k}{c - k} \right)^2,$$

worin

$$c = \frac{R}{2} + \frac{r}{4} = \frac{1,67}{2} + \frac{1,07}{4} = 1,102 \text{ m,}$$

$$\sigma_m = 10 + 2,28 \left( \frac{0,936 - 0,59}{1,102 - 0,59} \right)^2 = 11,2 \text{ kg/qcm.}$$

Durch  $c > a$  ist die Bedingung, daß die Fugen nicht weiter als bis zur Mitte klaffen, erfüllt.

In derselben Weise werden die Lagerfugen an den übrigen Abstufungen untersucht.

Für die Fundamentsohle beträgt:

das Gesamtgewicht  $G_2 = 310\,771$  kg,

das Winddruckmoment  $M_2 = 195\,000$  m/kg,

der Ausschlag des Druckmittelpunktes  $a_2 = \frac{195\,000}{310\,771} = 0,63$  m,

der Kernhalbmesser der kreisförmigen Grundplatte von  $R_2 = 2,8$  m Halbmesser

$$k_2 = \frac{R_2}{4} = 0,7 \text{ m.}$$

Da kein Abheben vom Boden erfolgen darf, muß der Druckmittelpunkt innerhalb des Kernes bleiben, was durch  $a_2 < k_2$  erfüllt ist.

Die Druckspannung durch Eigengewicht ist

$$\sigma_0 = \frac{G_2}{\pi R_2^2} = \frac{310\,771}{246\,301} = 1,26 \text{ kg/qcm.}$$

Die größte Kantenpressung am Rande der Grundplatte

$$\sigma' = \sigma_0 \left( 1 + \frac{a_2}{k_2} \right) = 1,26 \left( 1 + \frac{0,63}{0,7} \right) = 2,4 \text{ kg/qcm.}$$

## XIV. Beseitigung der Flugasche.

### 1. Die Flugaschenablagerung

wird innerhalb der Kesselanlage besonders dort recht unangenehm empfunden, wo die Ablagerungen die Kesselheizflächen verdecken und so die Wärmeübertragung an den Kesselinhalt teilweise verhindern. Beobachtet man beispielsweise einen Flammrohrkessel nach stattgefundener Reinigung, so findet man oft schon nach 2- bis 3wöchiger Betriebszeit die Flammrohre stellenweise bis zur Hälfte mit Flugasche verlegt (Fig. 356).

Vorgenommene Messungen hinter den Flammrohren

haben ergeben, daß bei verlegten Feuerrohren die Temperatur der Heizgase allmählich um etwa 50° C gegenüber reinen Heizflächen zunimmt, was dadurch erklärlich wird, daß nach und nach etwa 20 v. H. der Flammrohrheizfläche mit Flugasche belegt bzw. fast unwirksam gemacht werden. Die Folge davon sind erhöhte Beanspruchung der übrigen reinen Heizfläche und dadurch vermehrte Verluste durch Strahlung und Abgase im Schornstein, da die Heizgase nunmehr mit höherer Temperatur die Außenzüge bestreichen, die nur auf einer Seite von nutzbringender Heizfläche gebildet werden.