

kann. Die Überhitzerrohre sind deshalb möglichst so anzuordnen, daß alles, während des Betriebsstillstandes sich etwa ansammelnde Niederschlagwasser nach einer Stelle hin abfließen kann. Wo dieses nicht zugänglich, bei hängenden Flach- oder Spiralschlangen, ist auf der Dampfaustrittsseite der Sammelkammer ein genügend großes Ventil anzubringen, welches gestattet, den Überhitzer vor Inbetriebnahme energisch auszublasen.

### D. Reinigungsvorrichtung.

Eine innere Reinigung der Überhitzerrohre ist gewöhnlich nicht erforderlich, da sich in den beheizten Rohrschlangen Kesselstein nicht, oder, in seltenen Fällen, in denen der Dampf außergewöhnlich viel mitgerissenes Wasser führt, nur in unbedeutendem Maße absetzt. Dagegen kann es vorkommen, daß sich größere Mengen Schlamm ablagern, wenn der Überhitzer beim Anheizen des Kessels mit Wasser aus dem Kessel gefüllt wird. Bei der Entleerung bleibt Schlamm haften und brennt fest, sobald der Überhitzer höheren Temperaturen ausgesetzt wird.

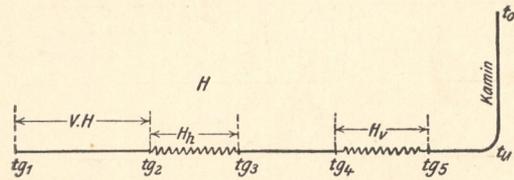
Die gründliche äußere Reinigung der Überhitzerheizfläche von Ruß und Flugasche ist von großem Wert, weil sonst die Wärmeübertragung sehr beeinträchtigt wird, denn Ruß und Flugasche sind so schlechte Wärmeleiter, daß grobe Verunreinigungen leicht am Zurückgehen der Überhitzungstemperatur erkannt werden können.

Ausblasevorrichtungen unter Benutzung eines Dampfstrahles ähnlich Fig. 669 sind am gebräuchlichsten. Bei ihrer Anwendung muß darauf geachtet werden, daß kein nasser Dampf oder gar Wasser an die Rußschicht gelangt, da Ruß bei Berührung mit Wasser eine feste Kruste bildet, die nur schwer wieder beseitigt werden kann. Steht keine Druckluft zum Reinigen der Überhitzer zur Verfügung, so kann man die Rohrschlangen zweckmäßig durch Abklopfen von anhaftendem Ruß und Flugasche befreien, indem man durch die Reinigungsöffnungen ein Stück Holz gegen die Überhitzerrohre setzt und auf dieses mit einem Holzhammer schlägt. Da der Ruß an der stets trockenen Überhitzerwandung nicht so fest anbackt wie an den Kessel- oder Vorwärmerwandungen, fällt er durch die Vibration, die die Schläge verursachen, ab. Überhitzer, bei denen die Rohrschlangen nicht in dieser Weise zugänglich sind, können natürlich nur durch Abblasen gereinigt werden.

## 12. Bezeichnungen für die Abschnitte VIII und IX.

- $p$  = Dampfspannung in at Überdruck, bzw. in at abs.
  - $v_s$  = spez. Volumen des gesättigten Wasserdampfes, Sattdampfes.
  - $v_h$  = spez. Volumen des überhitzten Dampfes.
  - $g$  = Volumengewinn durch Überhitzung.
  - $\gamma_s$  = Gewicht von 1 cbm Sattdampf.
  - $\gamma_h$  = Gewicht von 1 cbm überhitzten Dampfes.
  - $t_s$  = Temperatur des Sattdampfes.
  - $t_h$  = Temperatur des überhitzten Dampfes.
  - $t_x$  = Temperaturabfall des überhitzten Dampfes bis zur Verwendungsstelle.
  - $t_{w_1}$  = Temperatur des Speisewassers (nicht vorgewärmt).
  - $t_{w_2}$  = Temperatur des vorgewärmten Speisewassers.
- Spalckhaver-Schneiders, Dampfkessel.

- $tg_1$  = Anfangstemperatur der Heizgase, Verbrennungstemperatur.
- $tg_2$  = Temperatur der Heizgase beim Eintritt in den Überhitzer siehe Fig. 182.
- $tg_3$  = Temperatur der Heizgase hinter dem Überhitzer siehe Fig. 182.
- $tg_4$  = Temperatur der Heizgase am Ende der Kesselheizfläche und vor dem Vorwärmer.
- $tg_5$  = Temperatur der Heizgase hinter dem Vorwärmer.



- $\Delta t$  = mittlerer Temperaturunterschied zwischen Heizgasen und Wasserdampf bzw. Speisewasser.
- $D$  = Dampfmenge in kg/Std.
- $B$  = Brennstoffmenge in kg/Std.
- $x$  = Verdampfungsziffer =  $\frac{D}{B}$ .
- $y$  = Wärmeersparnis bezogen auf Sattdampfwärme.
- $z$  = Wärmeersparnis bezogen auf den Heizwert des Brennstoffes.
- $w$  = Wassergehalt des Dampfes in v. H.
- $Q$  = beliebige Wärmemenge.
- $i_s$  = Gesamtwärme des Sattdampfes bezogen auf 1 kg.
- $i_h$  = Gesamtwärme des überhitzten Dampfes.
- $i' = i_h - i_s$  = Überhitzungswärme.
- $H$  = Kesselheizfläche in qm.
- $VH$  = Vorheizfläche in qm.
- $H_h$  = Überhitzerheizfläche in qm.
- $H_v$  = Vorwärmerheizfläche in qm.
- $k$  = Wärmedurchgangszahl in WE für 1 Std., 1 qm Heizfläche und 1° mittleren Temperaturunterschied.
- $k'$  = CO<sub>2</sub>-Gehalt der Rauchgase.
- $n$  = Luftüberschußverhältnis.
- $R$  = Rostfläche des Kessels in qm.
- $R_h$  = Rostfläche des direkt gefeuerten Überhitzers in qm.
- 0,32 = spez. Wärme der Heizgase für 1 cbm (Durchschnittswert).
- 0,264 = spez. Wärme der Heizgase für 1 kg (Durchschnittswert).
- $G_v$  = Heizgasmenge für 1 kg Kohle in cbm.

## 13. Der überhitzte Wasserdampf.

Wasser, gesättigter und überhitzter Wasserdampf können in demselben Raume nebeneinander vorhanden sein, weshalb auch beobachtet wird, daß aus Leitungen, die überhitzten Dampf führen, Kondenswasser abgeleitet werden kann. Für die Erzeugung überhitzten Dampfes ist es erforderlich, daß zunächst gesättigter Wasserdampf vorhanden ist, dem in einem besonderen, in der Regel aus Rohren gebildeten Apparat — dem Überhitzer — durch Bespülen der Heizgase weiter Wärme zugeführt und der dadurch überhitzt wird.

### A. Spezifische Wärme $c_p$ des überhitzten Wasserdampfes.

Bei gesättigtem Wasserdampf kann man von spez. Wärme nicht sprechen, da dessen Temperatur bei

gleichem Druck konstant ist. Die spez. Wärme des überhitzten Dampfes dagegen ist abhängig vom Druck und der Temperatur. Die Schwankungen sind in der Nähe des Sättigungszustandes recht beträchtlich; die Werte von  $c_p$  wachsen allgemein mit der Spannung und fallen anfangs mit der Temperatur, um bei weiterer Temperaturzunahme annähernd proportional zu derselben anzusteigen, wie aus Fig. 183 ersichtlich.

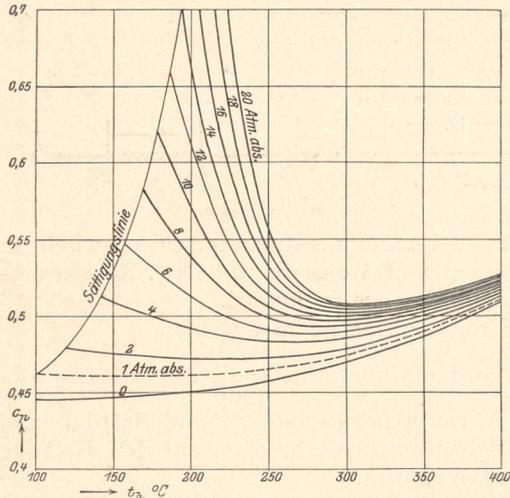


Fig. 183.

Diese Abbildung ist den Veröffentlichungen von Knoblauch und Jakob<sup>1)</sup> entnommen, welche durch eingehende Versuche die Werte  $c_p$  für den Bereich von 0 bis 20 at und vom Sättigungszustand bis 400° C festgestellt haben.

Wegen der Veränderlichkeit des Wertes von  $c_p$  muß man, um die zur Erwärmung einer Dampfmenge von  $t_1$ ° auf  $t_2$ ° nötige Wärmemenge zu berechnen, den Mittelwert von  $c_p$  für den Temperaturbereich von  $t_1$  bis  $t_2$  kennen. Solche Mittelwerte sind nach der erwähnten Quelle in folgender Zahlentafel enthalten.

**Zahlentafel Nr. 48.**

Mittlere spezifische Wärme für die Überhitzung von  $t_s$ ° auf  $t_h$ °.

$p = \begin{cases} \text{at abs.} \\ \text{at Überdr.} \end{cases}$	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$t_s = \dots\dots\dots$	99	120	143	158	169	179	187	194	200	206	211
$t_h = 100^\circ$	0,463	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
150	0,462	0,478	0,515	—	—	—	—	—	—	—	—
200	0,462	0,475	0,502	0,530	0,560	0,597	0,635	0,677	[0,751]	—	—
250	0,463	0,474	0,495	0,514	0,532	0,552	0,570	0,588	0,609	0,635	0,664
300	0,464	0,475	0,492	0,505	0,517	0,530	0,541	0,550	0,561	0,572	0,585
350	0,468	0,477	0,492	0,503	0,512	0,522	0,529	0,536	0,543	0,550	0,557
400	0,473	0,481	0,494	0,504	0,512	0,520	0,526	0,531	0,537	0,542	0,547

Für Überschlagsrechnungen kann man  $c_p = 0,54$  verwenden, während der früher viel gebrauchte Wert  $c_p = 0,48$  nur für überhitzten Dampf von atmosphärischer Spannung gelten kann.

**B. Erzeugungswärme  $i'$  der Überhitzung.**

Diese ist, wenn man von trocken gesättigtem Wasserdampf ausgeht,

$$i' = c_p(t_h - t_s). \tag{31}$$

Enthält aber der Dampf übergerissenes Wasser oder ist auf dem Wege vom Kessel zum Überhitzer infolge

<sup>1)</sup> Z. Ver. deutsch. Ing. 1907, S. 128.

Wärmeabgabe der Rohrwandung eine bestimmte Menge Kondensat entstanden, so muß damit gerechnet werden, daß dieses Wasser im Überhitzer erst wieder verdampft und dann auch die daraus entstandene Dampfmenge mit überhitzt werden muß.

In nachfolgendem soll angenommen werden, daß das etwa im Dampf enthaltene Wasser auf seinem Wege zum Überhitzer nicht wesentlich unter die Temperatur der dem Drucke entsprechenden Flüssigkeitswärme abgekühlt wird, daß also für die Verdampfung im Überhitzer nur noch die dem Arbeitsdrucke entsprechende Verdampfungswärme in Frage kommt. Nach Zahlentafel Nr. 3 sind hierfür — nach oben abgerundet — etwa 500 WE erforderlich, die demnach aufzuwenden wären, um 1 kg des im Naßdampf enthaltenen Wassers im Überhitzer nachverdampfen zu können.

Da in der Regel der Wassergehalt  $w$  des Dampfes in v. H. der Sattdampfmenge ausgedrückt wird, so ist die für die Verdampfung von  $w$  aufzuwendende Wärmemenge bei  $D$  kg Dampfgewicht:

$$Q = \frac{D \cdot w}{100} \cdot 500 \tag{32}$$

und die vom Überhitzer überhaupt aufzunehmende Wärme:

$$Q = D \left( \frac{w}{100} \cdot 500 + c_p(t_h - t_s) \right) = D[5 \cdot w + c_p(t_h - t_s)]. \tag{33}$$

Beispiel 14. Es soll 1 kg trockner, gesättigter Dampf von 12 at Überdruck auf 350° C überhitzt werden; wieviel Erzeugungswärme für den überhitzten Dampf ist hierfür erforderlich?

$$i' = c_p(t_h - t_s) = 0,533(350 - 190,6) = 85,2 \text{ WE.}$$

Beträgt aber der Wassergehalt des Dampfes 2 v. H., so sind

$$Q = D[5w + c_p(t_h - t_s)] = 1[5 \cdot 2 + 0,533(350 - 190,6)] = 95,2 \text{ WE aufzuwenden.}$$

Da die Verdampfung des überhitzten Wassers eine immerhin erhebliche Wärmemenge erfordert, wodurch die eigentliche Leistung des Überhitzers beeinträchtigt wird, so ist es ratsam, dafür Sorge zu tragen, daß der Wassergehalt der zu überhitzenden Dampfmenge so niedrig wie möglich gehalten wird. Andererseits kann es sehr oft erwünscht sein, wenn beispielsweise der Überhitzer hohen Gastemperaturen ausgesetzt ist, daß ein geringerer Wassergehalt im Sattdampf enthalten ist, der dann, dem vorderen Teil der Heizfläche zugeführt, zur Schonung der Überhitzerwandungen beiträgt. In letzterem Falle muß natürlich die Heizfläche des Überhitzers entsprechend groß gewählt werden.

**C. Die Gesamtwärme  $i_h$  des Heißdampfes**

setzt sich zusammen aus der

$$\text{Erzeugungswärme } i_s \text{ des Sattdampfes} \\ + \text{Erzeugungswärme } i' \text{ der Überhitzung,}$$

demnach ist

$$i_h = i_s + i' \tag{34}$$

oder

$$i_h = i_s + c_p(t_h - t_s). \tag{35}$$

In nebenstehender Zahlentafel Nr. 49 ist die Gesamtwärme für 1 kg überhitzten Dampfes für verschiedene Drücke und Temperaturen zusammengestellt, mit Benutzung des Wertes  $c_p$  nach Zahlentafel Nr. 48.

Zahlentafel Nr. 49.

at		Sattdampf		Gesamte Erzeugungswärme $i_h$ von 1 kg überhitzten Dampfes und einer Heißdampftemperatur von				
abs.	Überdruck	Temperatur °C	Erzeugungswärme WE	200°	250°	300°	350°	400°
8	7	169,5	663,5	680,6	706,3	731	756	781,5
9	8	174,4	664,9	679,7	705,9	730,5	755,6	781,1
10	9	178,9	666,1	678,7	705,3	730,4	755,5	781,1
11	10	183,1	667,1	677,5	704,6	729,8	755,1	780,1
12	11	186,9	668,1	676,4	704,1	729,4	754,5	780,1
13	12	190,6	668,9	675	703,3	728,5	753,9	779,6
14	13	194,0	669,7	673,8	702,7	728	753,3	778,7
15	14	197,2	670,5	672,4	702,1	727,5	753	780,5
16	15	200,3	671,2		699,6	725,5	751,2	776,6

**D. Das Volumen des überhitzten Dampfes.**

Für die Berechnung des spez. Volumens ist die genaueste Gleichung auf Grund von Versuchen von R. Linde und Klebe<sup>1)</sup> von ersterem aufgestellt, wie folgt:

$$v = \frac{47,1 T}{p} - (1 + 0,00002 \cdot p) \left[ 0,031 \left( \frac{373}{T} \right)^3 - 0,0052 \right], \quad (36)$$

worin  $p$  in kg/qm abs. gemessen und

$$T = 273 + t^\circ$$

ist. Auf Grund dieser Gleichung sind die Werte der folgenden Zahlentafel Nr. 50 berechnet worden. Für höhere Temperaturen von etwa 400° C an nähert sich das letzte Glied der Gleichung dem Werte Null, so daß die Gleichung dann die Form der einfachen Zustandsgleichung für permanente Gase

$$v = \frac{47,1 \cdot T}{p} \quad (37)$$

annimmt.

Gleichung (36) und nachstehende Zahlentafel Nr. 50 gelten in der Voraussetzung, daß während der Überhitzung der Druck konstant bleibt, sich also nur die Volumen ändern, was im Kesselbetriebe ja auch stets der Fall ist.

Zahlentafel Nr. 50

über spezifische Volumen cbm/kg.

at		Rauminhalt $v_h$ von 1 kg Dampf in cbm bei einer Heißdampftemperatur von					
abs.	Überdruck	Sattdampf $v_s$ cbm/kg	200°	250°	300°	350°	400°
8	7	0,2458	0,266	0,301	0,333	0,365	0,396
9	8	0,2200	0,235	0,267	0,296	0,324	0,352
10	9	0,1993	0,211	0,239	0,266	0,291	0,316
11	10	0,1822	0,19	0,217	0,241	0,265	0,288
12	11	0,1678	0,174	0,198	0,221	0,242	0,264
13	12	0,1556	0,158	0,182	0,203	0,223	0,244
14	13	0,1451	0,146	0,168	0,189	0,207	0,226
15	14	0,1360	0,136	0,156	0,176	0,194	0,212
16	15	0,1279	—	0,146	0,164	0,181	0,198

**E. Volumengewinn durch die Überhitzung.**

Ist in dem Heißdampfvolumen  $v_h$  die Wärmemenge  $i_h$  enthalten, so entspricht einer WE das Heißdampfvolumen  $\frac{v_h}{i_h}$ , ebenso wie beim gesättigten Dampf eine WE dem Volumen  $\frac{v_s}{i_s}$  gegenübersteht.

<sup>1)</sup> Z. Ver. deutsch. Ing. 1905, S. 1705 u. f.

Der Volumengewinn durch die Überhitzung ist demnach  $\frac{v_h}{i_h} - \frac{v_s}{i_s}$  oder in v. H. des Naßdampfvolumens ausgedrückt:

$$g = \frac{\left( \frac{v_h}{i_h} - \frac{v_s}{i_s} \right)}{\frac{v_s}{i_s}} \cdot 100 = \frac{v_h \cdot i_s - v_s \cdot i_h}{v_s \cdot i_h} \cdot 100 \quad (38)$$

Ist somit auch nachgewiesen, daß mit derselben Anzahl von Wärmeeinheiten ein größeres Volumen Heißdampf als Sattdampf erzeugt werden kann, so folgt daraus noch nicht ohne weiteres, daß als Folge dieser Volumenvergrößerung auch eine entsprechende Wärmeersparnis auf die mit dem erhitzten Dampf ausgeübte Kraftleistung erzielt werden muß. Diese Wärmeersparnis ist vielmehr bei Dampfkraftanlagen noch von dem Verlauf der Expansionskurve abhängig, woraus sich ergibt, daß z. B. bei der Einzylinderauspuflmaschine die Wärmeersparnis am größten ist, während sie bei Verbundmaschinen geringer und schließlich für 3fach-Expansionsmaschinen am niedrigsten ist. Jedenfalls hat durch Versuche noch nicht bestätigt werden können, daß ein bestimmtes Verhältnis zwischen Volumengewinn und Wärmeersparnis besteht<sup>1)</sup>. Die tatsächlich vorhandene bessere Wärmeausnutzung des überhitzten Dampfes in Dampfkraftmaschinen ist hauptsächlich auf Vermeidung der Kondensationsverluste des Dampfes während der ersten Expansionsstufe zurückzuführen, während andererseits — wenigstens bei Kesselzugüberhitzern — auch die bessere Ausnutzung des Brennstoffes in der Kesselanlage durch Angliederung der wärmeaufnehmenden Überhitzerheizfläche an die wasserbespülte Kesselheizfläche eine nicht zu unterschätzende Rolle spielt.

Beispiel 15. Im Verfolg des Beispiels auf S. 162 beträgt nach Gl. (35) die Gesamtwärme des auf 350° C überhitzten Dampfes von 12 at Überdruck

$$i_h = i_s + c_p(t_h - t_s) = 668,9 + 0,533(350 - 190,6) = 753,9 \text{ WE}$$

und das Volumen dieses überhitzten Dampfes nach Zahlentafel Nr. 50

$$v_h = 0,223$$

Der Volumengewinn ist daher laut Gl. (38):

$$g = \frac{v_h \cdot i_s - v_s \cdot i_h}{v_s \cdot i_h} \cdot 100 = \frac{0,223 \cdot 668,9 - 0,1556 \cdot 753,9}{0,1556 \cdot 753,9} \cdot 100 = 29,6 \text{ v. H. des Naßdampfvolumens.}$$

Die Fortleitung des überhitzten Dampfes gestattet gegenüber Sattdampf Rohre von geringerem Durchmesser und infolgedessen geringeren Abkühlungsflächen, da überhitzter Dampf vermöge seines geringeren Gewichtes mit größerer Geschwindigkeit durch die Leitung geführt werden kann, als Sattdampf.

**14. Berechnung der Überhitzerheizfläche.**

**A. Die Temperatur der Heizgase vor dem Überhitzer**

schwankt je nach

Art und Menge des verfeuerten Brennstoffes, der Güte der Verbrennung, d. h. der in Frage kommenden Temperatur und Menge der Heizgase und bei Kesselzugüberhitzern entsprechend dem Verhältnis der Rostfläche zur Vorheizfläche, d. h. derjenigen Heizfläche, welche die Gase bestreichen müssen, bevor sie die Überhitzerwandungen berühren.

<sup>1)</sup> Berner, Z. Ver. deutsch. Ing. 1905, S. 1117.