

**Mitteilungen**  
über  
**Forschungsarbeiten**

auf dem Gebiete des Ingenieurwesens

insbesondere aus den Laboratorien  
der technischen Hochschulen

herausgegeben vom

**Verein deutscher Ingenieure.**

**Heft 78.**

**Eberle: Versuche über den Wärme- und Spannungsverlust bei der Fortleitung gesättigten und überhitzten Wasserdampfes.**

**Biel: Ergänzung hierzu.**

**1909**

**Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH**

# Mitteilungen über Forschungsarbeiten.

Die bisher erschienenen Hefte enthalten :

## Heft 1.

- Bach:** Untersuchungen über den Unterschied der Elastizität von Hartguß (abgeschrecktem Gußeisen) und von Gußeisen gewöhnlicher Härte.  
— Zur Frage der Proportionalität zwischen Dehnungen und Spannungen bei Sandstein.  
— Versuche über die Abhängigkeit der Festigkeit und Dehnung der Bronze von der Temperatur.  
— Versuche über das Arbeitsvermögen und die Elastizität von Gußeisen mit hoher Zugfestigkeit.  
— Versuche über die Druckfestigkeit hochwertigen Gußeisens und über die Abhängigkeit der Zugfestigkeit desselben von der Temperatur.  
— Untersuchung über die Temperaturverhältnisse im Innern eines Lokomobilkessels während der Anheizperiode.

## Heft 2. vergriffen.

- Striebeck:** Kugellager für beliebige Belastungen.  
**Göpel:** Die Bestimmung des Ungleichförmigkeitsgrades rotierender Maschinen durch das Stimmgabelverfahren.  
**Holborn und Dittenberger:** Wärmedurchgang durch Heizflächen.  
**Lüdicke:** Versuche mit einem Lufthammer.

## Heft 3. vergriffen.

- Meyer:** Untersuchungen am Gasmotor.  
**Martens:** Zugversuche mit eingekerbten Probekörpern.  
**Werkzeugstahl-Ausschuß:** Schnelldrehstahl.

## Heft 4. vergriffen.

- Bach:** Versuche über die Abhängigkeit der Zugfestigkeit und Bruchdehnung der Bronze von der Temperatur.  
**Lindner:** Dampfhammer-Diagramme.  
**Bach:** Eine Stelle an manchen Maschinenteilen, deren Beanspruchung aufgrund der üblichen Berechnung stark unterschätzt wird.  
**Körting:** Untersuchungen über die Wärme der Gasmotorenzylinder.  
**Claaßen:** Die Wärmeübertragung bei der Verdampfung von Wasser und von wässrigen Lösungen.

## Heft 5. vergriffen.

- Bach:** Die Elastizität der an verschiedenen Stellen einer Haut entnommenen Treibriemen.  
**Staus:** Beitrag zur Wärmebilanz des Gasmotors.  
**Pfarr:** Bremsversuche an einer New American Turbine.  
**Bach:** Zur Frage des Wärmewertes des überhitzten Wasserdampfes.

## Heft 6. vergriffen.

- Schröder:** Versuche zur Ermittlung der Bewegungen und Widerstandsunterschiede großer gesteuerter und selbsttätiger federbelasteter Pumpen-Ringventile.  
**Westberg:** Schneckengetriebe mit hohem Wirkungsgrade.  
**Frahm:** Neue Untersuchungen über die dynamischen Vorgänge in den Wellenleitungen von Schiffsmaschinen mit besonderer Berücksichtigung der Resonanzschwingungen.

## Heft 7. vergriffen.

- Striebeck:** Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager.  
**Schröder:** Untersuchung einer Tandem-Verbundmaschine von 1000 PS.  
**Austin:** Ueber den Wärmedurchgang durch Heizflächen.

## Heft 8.

- Langen:** Untersuchungen über die Drücke, welche bei Explosionen von Wasserstoff und Kohlenoxyd in geschlossenen Gefäßen auftreten.  
**Meyer:** Untersuchungen am Gasmotor.

## Heft 9.

- Lasche:** Die Reibungsverhältnisse in Lagern mit hoher Umfangsgeschwindigkeit.  
**Dittenberger:** Ueber die Ausdehnung von Eisen, Kupfer, Aluminium, Messing und Bronze in hoher Temperatur.

- Bach:** Die Elastizitäts- und Festigkeitseigenschaften der Eisensorten, für welche nach dem vorhergehenden Aufsatz die Ausdehnung durch die Wärme ermittelt worden ist.  
— Versuche zur Klarstellung der Verschwächung von Indrischer Gefäße durch den Mannlochausschnitt.

## Heft 10.

- Günther:** Verfahren zur Gewinnung von Kupfer und Nickel aus kupfer- und nickelhaltigen Magnetkiesen.  
**Grübler:** Versuche über die Festigkeit von Schmirgel- und Karborundmischeiben.  
**Klein:** Reibungsziffern für Holz und Eisen.

## Heft 11.

- Schmidt:** Untersuchungen über die Umlaufbewegung hydrometrischer Flügel.  
**Bach und Roser:** Untersuchung eines dreigängigen Schneckengetriebes.  
**Frank:** Neuere Ermittlungen über die Widerstände der Lokomotiven und Bahnzüge mit besonderer Berücksichtigung großer Fahrgeschwindigkeiten.  
**Bach:** Abhängigkeit der Wirksamkeit des Oelabscheiders von der Beschaffenheit des den Dampfzylindern zugeführten Oeles.

## Heft 12.

- Lewicki:** Die Anwendung hoher Ueberhitzung beim Betrieb von Dampfmaschinen.

## Heft 13.

- Griessmann:** Beitrag zur Frage der Erzeugungswärme des überhitzten Wasserdampfes und sein Verhalten in der Nähe der Kondensationsgrenze.  
**Diegel:** Der Einfluß von Ungleichmäßigkeiten im Querschnitte des prismatischen Teiles eines Probestabes auf die Ergebnisse der Zugprüfung.  
**Schimanek:** Versuche mit Verbrennungsmotoren.  
**Striebeck:** Der Warmzerreißversuch von langer Dauer. Das Verhalten von Kupfer.

## Heft 14 bis 16. vergriffen.

- Berner:** Die Erzeugung des überhitzten Wasserdampfes.

## Heft 17.

- Meyer:** Versuche an Spiritusmotoren und am Dieselmotor.  
**Pfarr:** Bremsversuche an einer Radialturbine.  
**Bach:** Versuche mit Granitquadern zu Brückengelenken

## Heft 18.

- Schlesinger:** Die Passungen im Maschinenbau.  
**Brauer:** Leistungsversuche an Linde-Maschinen.  
**Büchner:** Zur Frage der Lavalschen Turbinendüsen.

## Heft 19.

- Schröder und Koob:** Untersuchung einer von Van den Kerchove in Gent gebauten Tandemmaschine von 250 PS.  
**Gutermuth:** Versuche über den Ausfluß des Wasserdampfes. Die Abmessungen der Steuerkanäle der Dampfmaschinen.  
**Strahl:** Vergleichende Versuche mit gesättigtem und mäßig überhitztem Dampf an Lokomotiven.

## Heft 20.

- Bach:** Versuche mit Sandsteinquadern zu Brückengelenken.  
**Stahl:** Untersuchung des Auslaufweges elektrischer Aufzüge.

## Heft 21.

- Berner:** Die Fortleitung des überhitzten Wasserdampfes  
**Knoblauch, Linde, Klebe:** Die thermischen Eigenschaften des gesättigten und des überhitzten Wasserdampfes zwischen 100° und 180° C. I. Teil.  
**Linde:** Die thermischen Eigenschaften des gesättigten und des überhitzten Wasserdampfes zwischen 100° und 180° C. II. Teil.  
**Lorenz:** Die spezifische Wärme des überhitzten Wasserdampfes.

**Mitteilungen**  
über  
**Forschungsarbeiten**

auf dem Gebiete des Ingenieurwesens

insbesondere aus den Laboratorien  
der technischen Hochschulen

herausgegeben vom

**Verein deutscher Ingenieure.**

**Heft 78.**



1909  
Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

ISBN 978-3-662-01693-0      ISBN 978-3-662-01988-7 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-662-01988-7

# Inhalt.

	Seite
Versuche über den Wärme- und Spannungsverlust bei der Fortleitung gesättigten und überhitzten Wasserdampfes. Von Chr. Eberle . . . . .	1
Ergänzung hierzu. Von Biel . . . . .	74

# Versuche über den Wärme- und Spannungsverlust bei der Fortleitung gesättigten und überhitzten Wasserdampfes,

durchgeführt im Auftrage des Vereines deutscher Ingenieure in der Dampftechnischen  
Versuchsanstalt des Bayerischen Revisions-Vereines in München.

Von **Chr. Eberle.**

Die Erhebungen, die der Verein deutscher Ingenieure über die Fortleitung des überhitzten Dampfes hatte anstellen lassen, haben nach dem in den Mitteilungen über Forschungsarbeiten Heft 21<sup>1)</sup> veröffentlichten Bericht ein wenig befriedigendes Ergebnis geliefert. Der vorhandene Versuchstoff war im wesentlichen bei gewöhnlichen Leistungsversuchen an Dampfanlagen gewonnen worden. Der Genauigkeitsgrad solcher Versuche ist aber für den vorliegenden Zweck nach den jetzigen Erfahrungen in den meisten Fällen viel zu klein. Es wäre wohl nie möglich gewesen, an Hand der widerspruchsvollen Ergebnisse ein zuverlässiges Bild von den tatsächlichen Vorgängen zu gewinnen.

Der Verein deutscher Ingenieure entschloß sich deshalb, auf eigene Kosten neue Versuche in größerem Maßstab anzustellen, und beauftragte den Bayerischen Revisions-Verein in München auf dessen Antrag mit ihrer Durchführung. Der Auftrag erfolgte zu einer Zeit, als dieser Verein im Begriff stand, sich eine eigene dampftechnische Versuchsanstalt zu errichten. Es war ihm somit die Möglichkeit gegeben, gleich bei der Einrichtung der Anstalt, die an anderer Stelle<sup>2)</sup> eingehender beschrieben ist, auf die Durchführung dieser Versuche Bedacht zu nehmen. Die Versuche sind im wesentlichen in den Jahren 1905 und 1906 unter der Leitung des Berichterstatters vorgenommen, dem als Mitarbeiter der vom Verein deutscher Ingenieure abgeordnete Dr.-Ing. Berner und der damalige Vereinsingenieur Fr. Seufert, jetzt Oberlehrer an der Königl. Maschinenbauschule zu Stettin, zur Seite standen. Diesen beiden Herren wird für ihre tatkräftige und unermüdliche Mitwirkung auch an dieser Stelle gedankt.

Aufgabe der Versuche war es, möglichst zuverlässige Grundlagen für die Berechnung der Wärme- und Spannungsverluste bei der Fortleitung gesättigten und überhitzten Wasserdampfes zu gewinnen.

---

<sup>1)</sup> s. a. Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1904 S. 473.

<sup>2)</sup> Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1905 S. 1294; s. a. Z. Bayer. Revisions-Verein 1905 S. 83.

Erster Abschnitt.

Versuchseinrichtungen und Versuchsverfahren.

1) Die Versuchsleitung.

Die zu den Versuchen sowie auch zum Betrieb der Anlage verwendete schmiedeeiserne Dampfleitung ist in den Figuren 1 und 2 dargestellt. Hinter der Vereinigung der von den beiden Kesseln und ihren Ueberhitzern abgehenden Leitungen ist ein Wasserabscheider, Fig. 3, angeordnet, in dem der Dampf vor Eintritt in die

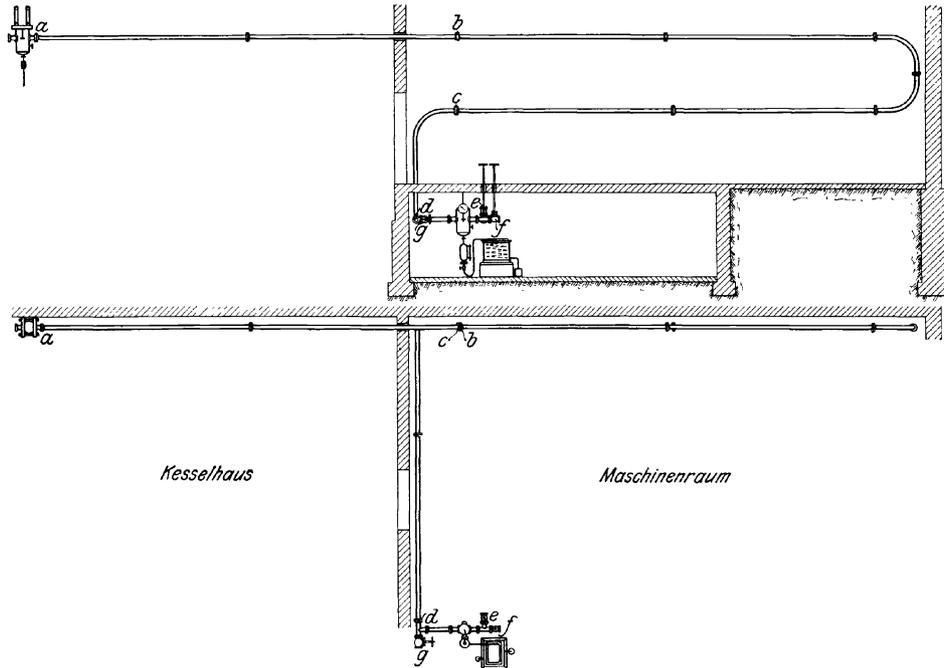


Fig. 1 und 2. Versuchsleitung.

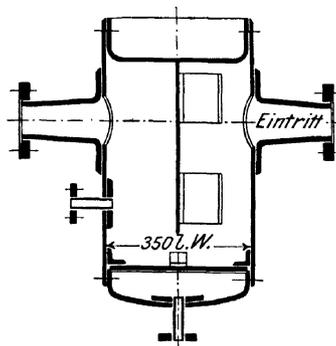


Fig. 3. Wasserabscheider.

eigentliche Versuchsleitung entwässert wird. Das hinter dem Wasserabscheider beginnende Rohrleitungsstück *ab* verläuft zum größten Teil im Kesselhaus; die Rohr-  
schleife *bc* befindet sich vollständig im Maschinenraum und das an diese anschließende Stück *cd* im Keller des Maschinenraumes; das Rohrstück *defg*, in dem ein zweiter, dem ersten gleicher Wasserabscheider sitzt, ist als Verteilstück zu

bezeichnen. Die ganze Leitung ist mit Gefälle in der Richtung des Dampfweges verlegt; ihre Hauptabmessungen sind folgende:

lichter Durchmesser . . . . .	70 mm
Wandstärke . . . . .	3 »
äußerer Durchmesser . . . . .	76 »

Länge der Strecken:

<i>a b</i>	11,48 m	mit 2 Flanschen.
<i>b c</i>	26,57 »	» 6 »
<i>c d</i>	11,57 »	» 2 »

Zur Durchführung von Versuchen mit einer Leitung von wesentlich größerem Durchmesser wurde die Strecke *b c* nach Maßgabe der Fig. 4 durch eine Leitung von 150 mm l. W. mit folgenden Abmessungen ersetzt:

lichter Durchmesser . . . . .	150 mm
Wandstärke . . . . .	5 »
äußerer Durchmesser . . . . .	160 »
Länge der Strecke <i>b c</i> . . . . .	26,02 m mit 6 Flanschen.

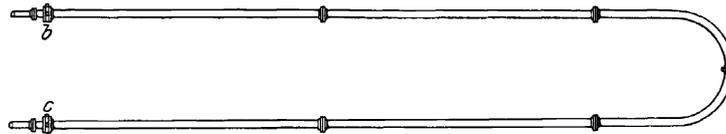


Fig. 4. Versuchsschleife von 150 mm l. W.

Alle Flansche der Versuchsleitungen sind aufgewalzt und haben zur Dichtung Nut und Feder. Durch die Ventile *e* und *f* gelangt der Dampf zu einer Dampfmaschine oder zu einem Zwischenüberhitzer, während das Ventil *g* unmittelbar in die Auspuffleitung führt. Es sind zum Teil Klingerit-, zum Teil Götze-Dichtungen verwendet.

### 2) Temperaturmessungen.

Zur Messung der Lufttemperaturen wurden nur Quecksilberthermometer benutzt. Die Dampftemperatur wurde im allgemeinen durch Quecksilberthermometer mit Stickstofffüllung ermittelt, die teils in der Versuchsanstalt, teils in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt geeicht worden waren. Die Fadenverbesserung *f* wurde nach der Formel

$$f = \frac{n(T-t)}{6300}$$

vorgenommen; hierbei ist *n* die in Graden ausgedrückte Länge des herausragenden Teiles des Fadens, *T* die zu messende Temperatur und *t* die mittlere Temperatur des herausragenden Fadens. Wie Fig. 1 zeigt, sind in die Versuchsleitung bei *b*, *c* und *d* besondere Zwischenflansche zur Aufnahme der Meßvorrichtungen eingebaut.

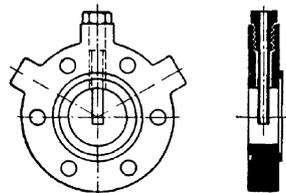


Fig. 5 und 6. Meßflansch.

baut. Fig. 5 und 6 zeigen einen solchen Flansch mit dem für die Thermometer bestimmten Einsatzröhrchen, das mit hochsiedendem Zylinderöl gefüllt wurde. Diese Röhrchen sind so lang, daß sich die Thermometerkugel fast genau in der Rohr-

mitte befindet. Messungen der Dampftemperatur, die den Zweck hatten, die Temperaturverteilung über den Rohrquerschnitt zu bestimmen, wurden mit Thermoelementen durchgeführt; hierauf ist noch besonders zurückzukommen. Die Thermolemente wurden in der Versuchsanstalt aus Kupfer- und Konstantandraht hergestellt, indem die beiden Drahtenden zunächst zusammengedreht und sodann in einer reduzierenden Gebläseflamme verlötet wurden. Zur Bestimmung des Thermostromes benutzte man ein sehr empfindliches Galvanometer mit dem großen Widerstand von 220 Ohm, dem gegenüber der Widerstand der beiden Elementendrähte im allgemeinen für diese Messungen vernachlässigt werden konnte. Der Kupferdraht hat bei 1,1 mm Dmr. und 1 m Länge einen Widerstand von 0,018 Ohm, der Konstantandraht bei 1 mm Dmr. und 1 m Länge 0,62 Ohm. Die Beziehung zwischen Thermostrom bezw. Galvanometerausschlag und Temperaturunterschied zwischen der Lötstelle und dem offenen Ende des Elementes wurde durch Eichung ermittelt. Fig. 7 stellt die Eichkurve für eine Anzahl solcher Elemente dar. Nach dieser besteht zwischen Galvanometerausschlag und Temperaturunterschied die aus den für die Temperaturen von 100°, 200° und 300° C beobachteten Galvanometerausschlägen abgeleitete Beziehung:

$$\alpha = 0,752 t + 0,0003 t^2 + 0,000000177 t^3.$$

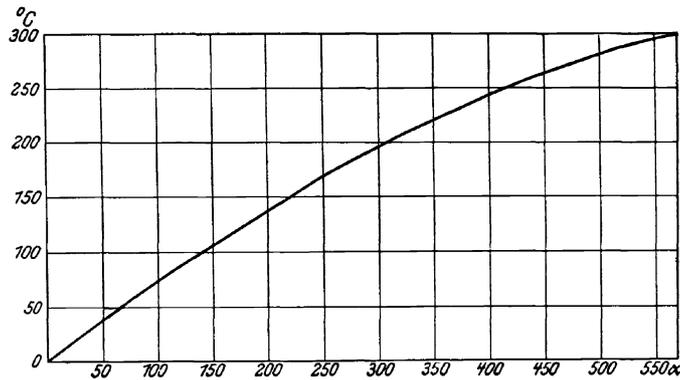


Fig. 7. Eichkurve der Thermolemente.

Zur Messung von Temperaturen, für die der Meßbereich des Galvanometers nicht genügte, wurden dem Galvanometer Widerstände von 220, von  $2 \times 220$  Ohm usw. vorgeschaltet.

Durch die Elementendrähte können, wenn sie auf kurzem Weg aus dem Temperaturgebiet der Lötstelle in eine wesentlich niedrigere Temperatur geführt werden, so erhebliche Wärmemengen abgeleitet werden, daß das Element zu niedrige Temperaturen anzeigt. Um dies zu verhindern, ist es notwendig, die Elementendrähte von der Lötstelle aus auf einem größeren Wege durch einen Raum von der zu messenden Temperatur zu leiten. Wird beispielsweise eine Dampftemperatur in der Nähe der Rohrwand gemessen, Fig. 8, so ist das Element nicht nach *a*, sondern nach *b* anzuordnen.

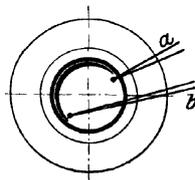


Fig. 8. Anordnung der Thermolemente.

Zur Messung der Temperatur der Rohrwand und der Isolierung benutzte man ebenfalls Thermoelemente, die nach Fig. 9 angebracht waren; dazu ist zu bemerken, daß die Elemente auf der Rohrwand sehr gut und sicher anliegen müssen, um richtige Temperaturen anzeigen zu können.

Um dies zu erreichen, wurde die in Fig. 10 dargestellte Einrichtung geschaffen. Das Element wurde durch ein genau und metallisch auf die Rohraußenfläche aufgepaßtes Eisenstück an die Rohrwand angepreßt. Da das Eisenstück bei guter Anpassung die Temperatur der Rohrwand annehmen mußte, war sonach das Element vollständig in die zu messende Temperatur eingebettet. Mit dieser Anordnung lassen sich bei sorgfältiger Ausführung des Anschlusses des Druckstückes sehr zuverlässige Messungen machen, während bei bloßem Auflegen des Elementes auf die Rohrwand erhebliche Fehler entstehen können.

Um mehrere Elemente mit einem Galvanometer beobachten zu können, führte man alle zu einem Quecksilberumschalter, an den das Galvanometer angeschlossen war.

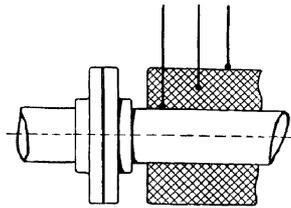


Fig. 9. Temperaturmessung der Isolierung.

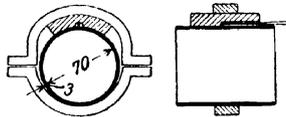


Fig. 10. Anpressung der Thermolemente.

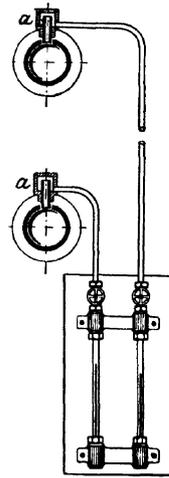


Fig. 11. Quecksilber-Differenzmanometer.

### 3) Messungen des Dampfdruckes.

Zur Feststellung des Dampfdruckes in der Versuchsleitung benutzte man Doppel-Federmanometer. Vor und nach jedem Versuch wurden sämtliche Manometer untereinander in der gleichen Stellung, in der sie sich beim Versuch befunden hatten, verglichen. Für die Messung der Druckverluste in der Versuchsleitung genügte das Federmanometer nur noch bei sehr großen Dampfgeschwindigkeiten; für die meisten Versuche wäre die Unsicherheit der Ablesung gegenüber den wirklichen Druckverlusten viel zu erheblich gewesen. Man benutzte deshalb das in Fig. 11 dargestellte Quecksilber-Differenzmanometer, dessen beide Schenkel an die Meßflansche *b* und *c* der Versuchsleitung, Fig. 1 und 2, angeschlossen wurden, so daß der Druckverlust in der Schleife *bc* genau bestimmt werden konnte.

Zu Fig. 11 ist noch zu bemerken, daß sich die Zuleitröhrchen zwischen den Glasrohren und den Stützen *a* mit Wasser füllen. Diese Wassersäulen sind zu berücksichtigen; insbesondere ist genauestens darauf zu achten, daß bei Versuchen die Röhrchen ganz mit Wasser gefüllt sind, was oft nur durch starke Abkühlung der Niveaugefäßchen *a* erreicht werden kann.

Zahlentafel 1.  
Versuche mit strömendem gesättigtem Dampf an der Leitung *a* bis *e*.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Nr. des Versuches	Dauer des Versuches st	Art der Dampfströmung	abs. Dampfspannung			mittlere Dampftemperatur $t_m$	mittlere Lufttemperatur $t_3$	Temperaturgefälle zwischen Dampf und Luft	Dampfgewicht in 1 st kg	Niederschlagwasser aus Wasserabscheider II in 1 st kg	mittlere Dampfgeschwindigkeit m/sk	Niederschlagwasser in 1 st bei ruhendem Dampf kg	Abnahme des Niederschlagwassers durch die Strömung des Dampfes VH
			Anfang der Leitung $p_1$ kg/qem	Ende der Leitung $p_4$ kg/qem	mittlere Spannung $p_m$ kg/qem								
1	1,5	Dampf strömt in die Luft, gleichmäßige Strömung	6,06	6,06	6,1	158,6	23,5	135,1	260	22,5	5,6	24,4	7,8
2	1,5	Dampf strömt in die Maschine, unterbrochene Strömung	6,01	5,82	5,9	157,3	25,0	132,3	1000	20,9	22,9	24,0	12,9
3	1,33	Dampf strömt in die Maschine, unterbrochene Strömung	11,05	11,08	11,1	183,5	24,3	159,2	520	26,3	6,5	30,4	13,5
4	1,5	Dampf strömt in die Maschine, unterbrochene Strömung	11,02	11,02	11,0	183,1	26,5	156,6	720	25,6	9,1	30,0	14,7
5	1,67	Dampf strömt in die Luft, gleichmäßige Strömung	11,00	10,98	11,0	183,1	27,5	155,6	790	28,2	10,0	29,8	5,4
Stärke der Umhüllung { Leitungsstück <i>a b</i> und <i>c d</i> 60 mm } Flansche frei » <i>b c</i> <i>30</i> » Niederschlagwasser durch den Kondensationsstopf selbsttätig ausgeschieden.													
6	1,08	Dampf strömt in die Luft, gleichmäßige Strömung	6,36	6,01	6,19	159,2	18	141,2	1716,5	11,3	37,9	16,7	32,3
7	1,02	Dampf strömt in die Luft, gleichmäßige Strömung	3,85	3,04	3,45	137,6	18	119,6	1920,5	5,56	73,5	11,8	52,6
Stärke der Umhüllung für die ganze Leitung 60 mm, Flansche umhüllt. Niederschlagwasser im geschlossenen Gefäß aufgefangen.													

4) Bestimmung des in der Versuchsleitung entstandenen Dampfwassers.

a) Unvollkommene Wirkung der Wasserabscheider.

Für die Berechnung des Wärmeverlustes in der Leitung ist eine zuverlässige Bestimmung des entstandenen Dampfwassers erforderlich. Dies ist aber nur möglich, wenn die vor und hinter der Versuchsstrecke eingebauten Wasserabscheider alles im Dampf enthaltene Wasser abscheiden. Die Ergebnisse einschlägiger Versuche sind in Zahlentafel 1 zusammengestellt. Alle hier aufgenommenen Versuche 1 bis 7 wurden mit der ganzen Leitung durchgeführt. Bei den Versuchen 1 bis 5 war die Schleife *bc* mit einer 30 mm starken Isolierung umkleidet, die übrige Leitung mit einer solchen von 60 mm Stärke; die Flansche waren nicht umhüllt; das Dampfwasser wurde durch einen selbsttätigen Wasserableiter (Kondensationskopf) abgeführt; der Dampf strömte bei einigen Versuchen gleichmäßig ab, bei andern wurde er zum Betriebe der Maschine benutzt, ging also stoßweise durch die Leitung. Bei den Versuchen 6 und 7 war die ganze Leitung 60 mm stark isoliert, die Flansche umhüllt, und das Niederschlagwasser wurde durch ein geschlossenes Gefäß mit Wasserstand abgeführt. Spalte 11 enthält die stündlich abgeführten Dampfwassergewichte, Spalte 12 die mittleren Dampfgeschwindigkeiten. In Spalte 13 sind die stündlichen Dampfwassergewichte aufgenommen, die sich für die gleichen

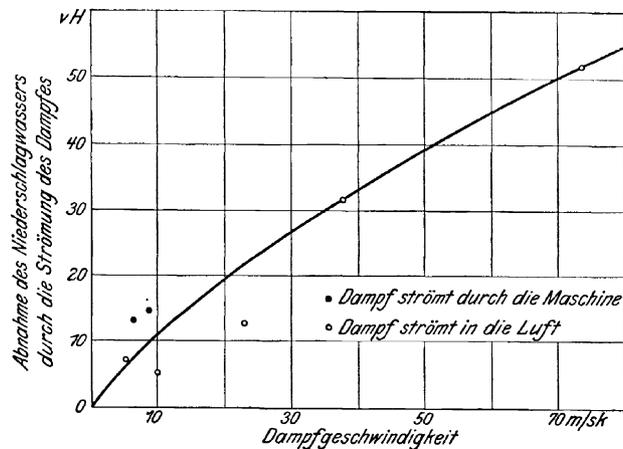


Fig. 12. Einfluß der Dampfgeschwindigkeit auf die Wirkung der Wasserabscheider.

Verhältnisse bei Versuchen mit ruhendem Dampf ergeben hatten. Da diese Versuche nicht bei den genau gleichen Temperaturunterschieden zwischen Dampf und Luft stattfanden, mußten entsprechende Umrechnungen vorgenommen werden. Wie Spalte 14 zeigt, nimmt die stündlich abgeschiedene Dampfwassermenge mit zunehmender Geschwindigkeit erheblich ab. Bei einer mittleren Dampfgeschwindigkeit von 73,5 m/sk liefert der Wasserabscheider um 52,6 vH Dampfwasser weniger als bei dem Versuch mit ruhendem Dampf. Die in Fig. 12 zeichnerisch dargestellten Ergebnisse lassen erkennen, daß schon bei Dampfgeschwindigkeiten von 5 bis 10 m die Dampfwassermenge erheblich geringer ist als bei ruhendem Dampf. An dieser Stelle soll auf die Ergebnisse hingewiesen werden, die Gutermuth über die Versuche an der Rohrleitung des Josephaschachtes der Grube Gerhard veröffentlicht hat<sup>1)</sup>. Die hier in Betracht kommenden Werte sind in Zahlentafel 2 zusammengestellt.

<sup>1)</sup> Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1887 S. 699, Zahlentafeln V und VI.

Zahlentafel 2.

Abnahme des Niederschlagwassers infolge der Dampfströmung nach Versuchen von Gutermuth an der Rohrleitung des Josephschachtes der Grube Gerhard.

1	2	3	4		5	6
Dauer des Versuches	mittlere abs. Dampfspannung	mittlere Dampfgeschwindigkeit	Niederschlagwasser in 1 st		Abnahme des Niederschlagwassers infolge der Strömung	
			bei strömendem Dampf	bei ruhendem Dampf		
st	kg/qcm	m/sk	kg	kg	vH	
8	5,00	9,1	181	181	0	
9	6,84	11,4	115	117	1,7	
9	4,77	13,1	97	100	3,0	
9	6,74	15,3	111	116	4,3	
9	3,87	15,3	92	99	7,1	
4,5	4,88	15,7	160	170	5,9	
5	3,89	16,1	148	155	4,5	
7,5	3,94	16,9	147	155	5,2	
4	4,73	17,4	66	104	36,6	
6	3,68	20,6	92	98	6,1	
2,5	5,52	20,9	107	109	1,8	
9	6,28	23,6	100	114	12,3	
8,5	3,59	23,8	82	97	15,4	
5,5	3,77	25,4	148	152	2,6	
5	5,14	46,1	65	107	39,2	
2,75	5,08	48,0	60	106	43,4	
9	5,05	48,3	59	106	44,3	

Die Darstellung in Fig. 13 zeigt, daß auch bei diesen Versuchen bei einer Dampfgeschwindigkeit von etwa 50 m der Wasserabscheider um 45 vH Dampf- wasser weniger lieferte als bei ruhendem Dampf. Für größere Geschwindigkeiten stimmen die Ergebnisse überein, während bei den Dampfgeschwindigkeiten unter 10 m insofern eine Verschiedenheit festzustellen ist, als bei unsrer Einrichtung auch schon bei Geschwindigkeiten unter 10 m/sk eine Abnahme des Dampf- wassers festzustellen war, während die Gutermuthschen Versuche erst von 10 m/sk Dampf- geschwindigkeit ab eine solche Abnahme erkennen lassen. Wie weit dieser Unter- schied durch die Bauart der Wasserabscheider verursacht wird und welchen Anteil die Versuchsgenauigkeit daran hat, kann hier nicht festgestellt werden.

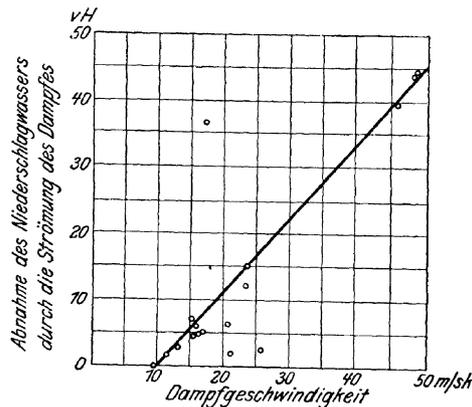


Fig. 13. Einfluß der Dampfgeschwindigkeit auf die Wirkung der Wasserabscheider. (Versuche von Gutermuth.)

Die Versuche lassen mit Sicherheit erkennen, daß die gebräuchlichen Wasserabscheider schon bei verhältnismäßig geringen Dampfgeschwindigkeiten eine vollständige Entwässerung des Dampfes nicht ermöglichen, sondern daß ein Teil des in den Leitungen entstandenen Wassers zu den Verwendungsstellen mitgerissen wird.

b) Unvollkommenheit der selbsttätigen Wasserableiter.

Zur Abführung des abgeschiedenen Dampfes sind in der Anlage gewöhnliche Kondensationstopfe mit Schwimmern angeordnet. Man wollte feststellen, welche Zuverlässigkeit in der Wasserabführung von einem solchen Wasserableiter, wenn er im besten Dichtheitszustande erhalten wird, zu erwarten ist. Die Ergebnisse der durchgeführten Vergleichsversuche enthält Zahlentafel 3. Man benutzte die ganze zwischen den beiden Wasserabscheidern liegende Rohrleitung, welche durchgehend in 60 mm Stärke isoliert war; die Flansche waren frei. Zunächst diente der gewöhnliche, im besten Zustande befindliche Kondensationstopf, der an den zweiten Wasserabscheider angeschlossen war, zur Wasserabführung. Bei den Versuchen 8 bis 16 waren der Topf und die Verbindungsleitung zwischen Wasserabscheider und Topf von 10 mm l. W. und 3,30 m Länge nicht umhüllt. Die Versuche 17 bis 19 unterschieden sich von ersteren nur dadurch, daß diese Teile umhüllt waren; sodann ordnete man unmittelbar unter dem Wasserabscheider II nach Maßgabe der Fig. 1 ein Gefäß mit Wasserstand an, das unten durch ein sehr kleines dichtschließendes Ventilchen abgesperrt werden kann. Dieses Ventilchen wurde beim Versuch so eingestellt, daß der Wasserstand im Gefäß annähernd gleich blieb. Bei diesem wie bei allen derartigen Versuchen wurde das abgeleitete Dampf- und Wasser durch eine Kühlschlange geführt, um Dampfverluste bei der Wägung zu vermeiden.

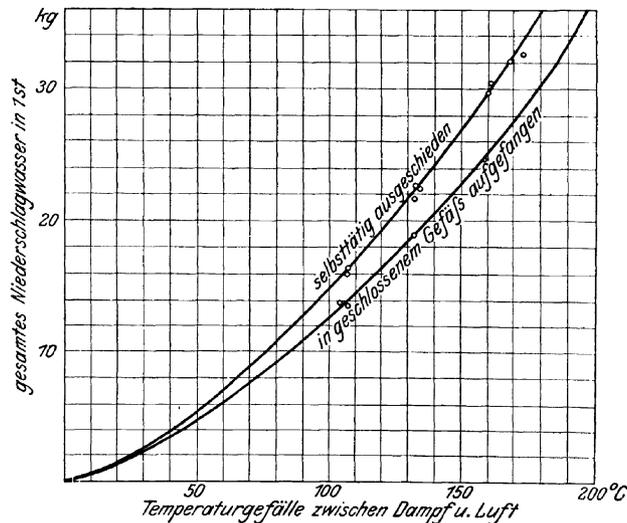


Fig. 14. Unvollkommenheit selbsttätiger Wasserabscheider.

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß der Kondensationstopf bei allen Versuchen, auf den gleichen Temperaturunterschied zwischen Dampf und Luft bezogen, mehr Dampf- und Wasser lieferte als das Gefäß; und zwar steigt die Mehrlieferung mit dem Dampfdruck. Das durch den Schwimmer des Kondensationstopfes betätigte Ventilchen läßt nicht nur Wasser, sondern auch Dampf mit austreten, und zwar um so mehr, je höher der Druck ist.

Zahlentafel 3. Unterschied bei der Messung des Niederschlagwassers durch den Kondensationsstopp und durch das geschlossene Gefäß.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nr. des Versuches	Dauer des Versuches st	abs. Dampfspannung $p_m$ kg/qcm	Dampf-temperatur $t_m$ $^{\circ}\text{C}$	mittlere Lufttemperatur $t_m$ $^{\circ}\text{C}$	Temperaturgefälle zwischen Dampf und Luft $^{\circ}\text{C}$	Niederschlagwasser aus Wasserabscheider II in 1 st		Mehrlieferung des Kondensationsstopfes gegenüber dem geschlossenen Gefäß vH	
						im ganzen kg	für $1^{\circ}\text{C}$ Temperaturgefälle Einzelwerte kg		
						Mittelwerte für gleiche Spannung kg			
Niederschlagwasser durch den Kondensationsstopp selbsttätig ausgeschleiden.									
Verbindungsleitung von Wasserabscheider II und Kondensationsstopp nicht umhüllt.									
8	1,5	3,1	133,9	26,9	107,0	16,3	0,1523	}	16,6
9	1,5	3,1	133,9	27,2	106,7	15,7	0,1471		
10	1,5	6,5	161,1	28,3	132,8	22,5	0,1693	}	15,9
11	1,5	6,5	161,1	29,0	132,1	21,5	0,1627		
12	1,5	6,5	161,1	27,2	133,9	22,3	0,1663	}	19,2
13	1,5	13,0	190,5	29,6	160,9	30,1	0,1869		
14	1,5	13,0	190,5	30,6	159,9	29,5	0,1843	}	—
15	1,5	16,0	200,3	27,4	172,9	32,4	0,1872		
16	1,5	16,0	200,3	32,0	168,3	31,3	0,1888		
Niederschlagwasser durch den Kondensationsstopp selbsttätig ausgeschleiden.									
Verbindungsleitung von Wasserabscheider II und Kondensationsstopp umhüllt.									
17	1,5	3,1	133,9	30,4	103,5	14,0	0,1352	}	5,3
18	1,5	6,5	161,1	32,6	128,5	20,2	0,1571		
19	1,5	13,1	190,9	34,8	156,1	27,6	0,1768		13,5
Niederschlagwasser im geschlossenen Gefäß aufgefangen.									
20	1,5	3,1	133,9	29,5	104,4	13,7	0,1311	}	—
21	1,5	3,1	133,9	26,6	107,3	13,5	0,1257		
22	1,5	6,6	161,5	29,7	131,8	18,9	0,1433	}	—
23	1,5	13,1	190,9	32,4	158,5	24,7	0,1557		

Fig. 14 enthält die Ergebnisse der Versuche 8 bis 16 und 20 bis 23, und zwar sind die Temperaturgefälle zwischen Dampf und Luft als Abszissen und die stündlichen Dampf Wassermengen als Ordinaten dargestellt. Der Verlauf der durch die beiden Punktreihen gelegten Kurven läßt den Fehler erkennen, der durch die Verwendung des selbsttätigen Dampf Wasserablesers ohne Umhüllung seiner Zuleitung in die Messungen gebracht werden kann. Beachtet man, daß alle Dampf Wassermessungen bei Versuchen in der Praxis mit solchen Kondensationstöpfen ausgeführt werden, die aber keineswegs immer den höchsten Grad von Dichtheit aufweisen, so erkennt man ohne weiteres die Ursache der Unzuverlässigkeit der auf solche Weise gewonnenen Ergebnisse<sup>1)</sup>.

c) Versuchseinrichtung zur Dampf Wassermessung.

Die im Vorstehenden mitgeteilten Erfahrungen über die Wirksamkeit der Wasserabscheider und der selbsttätigen Wasserableser ließen es geboten erscheinen, alle Versuche für gesättigten Dampf mit ruhendem Dampf durchzuführen. Damit war die Möglichkeit gegeben, auch für die Dampf Wassermessung die Versuchsleitung in einfachster Weise in einzelne Meßstrecken zu zerlegen, indem die in Fig. 15 dargestellten Auffangscheiben, die unmittelbar mit den Meßflanschen verbunden werden konnten, in die Leitung eingebaut wurden. Durch Einbau eines Blindflansches in die Leitung bei *d* und durch Abführen des Dampf Wassers durch diesen Flansch war die ganze Leitung *ad*, Fig. 1, als Versuchsstrecke mit Ausschaltung des Verteilstückes gewonnen. Nach Einlegen von zwei Auffangscheiben in die Meßflansche *b* und *c* können die Leitungsstücke *ab*, *bc* und *cd* gesondert untersucht werden. Da die Leitungsstrecke *bc* ganz im Maschinenraum und damit in einer annähernd gleichen Temperatur liegt, wurde sie in erster Linie zu den Versuchen benutzt, und sie ist auch dazu bestimmt, für die Zukunft als Versuchsleitung für die Prüfung verschiedener Isoliermittel zu dienen.

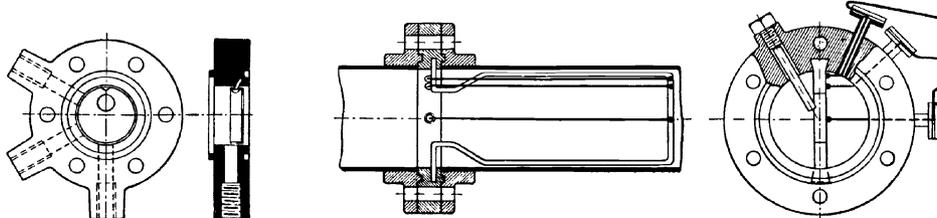


Fig. 15. Auffangscheiben. Fig. 16 u. 17. Anordnung der Thermoelemente in der Rohrleitung.

5) Temperaturverteilung über den Rohrquerschnitt.

Für die Berechnung des Wärmeverlustes bei der Fortleitung überhitzten Dampfes ist in erster Linie der Temperaturverlust in der Meßstrecke maßgebend. Dieser kann nur zuverlässig aus der mittleren Temperatur des Dampfes am Anfang und Ende der Rohrleitung bestimmt werden. Schon aus diesem Grunde war es notwendig, ein Urteil darüber zu gewinnen, in welcher Weise sich die Temperatur des überhitzten Dampfes über den Rohrquerschnitt verteilt.

Die Messungen über die Temperaturverteilung im Rohrquerschnitt wurden an der Versuchsleitung von 150 mm l. W. mit der durch Fig. 16 und 17 dargestellten Einrichtung durchgeführt. In den Meßflansch setzte man zunächst nur Meßröhrchen

<sup>1)</sup> Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1904 S. 530 u. f. Protokoll der 32. Delegierten- und Ingenieur-Versammlung des Internationalen Verbandes der Dampfkessel-Ueberwachungs-Vereine S. 130. Die von Direktor Zwianer mitgeteilten Versuchsergebnisse sind zweifellos zum großen Teil durch diesen Mangel der selbsttätigen Wasserableser und durch deren Undichtheit wesentlich beeinflusst.

Zahlentafel 4. Messung der Temperaturverteilung über den Rohrquerschnitt von 150 mm l. W.

1) Quecksilberthermometer (Messung am Flansch).

Eintauchtiefe der Meßröhren . . . . .	70	45	20	Spannung kg/qem abs.
Dampftemperatur { gesättigt . . . . . °C	161,5	162	161	6,7
{ überhitzt . . . . . »	290	283	255	6,6

2) Quecksilberthermometer und Thermoelemente mit kurzer Drahtlänge im Dampfstrom (Messung am Flansch).

Eintauchtiefe der Meßröhren bzw. Entfernung der Thermoelemente vom Rohrumfang . . . mm	Quecksilberthermometer		Thermoelemente		Spannung kg/qem abs.
	70	45	21	10	
Dampftemperaturen { gesättigt . . . . . °C	166	166,3	166	163	7,45
{ überhitzt { . . . . . »	211,5	209,4	197,5	196,5	7,15
{ . . . . . »	229	227,3	213,5	212,5	7,60

3) Thermoelemente mit großer Drahtlänge im Dampfstrom (gleichzeitige Messung in 2 Rohrquerschnitten).

Entfernung der Thermoelemente vom Rohr- umfang . . . . . mm	Rohrquerschnitt 0,5 m vor Meßflansch		Rohrquerschnitt 0,5 m hinter Meßflansch		Spannung kg/qem abs.
	75	20	10	20	
Dampftemperaturen { gesättigt . . . . . °C	185	184,5	184,5	184	11,9
{ überhitzt . . . . . »	247	245,5	244,5	243	11,7

für Quecksilberthermometer von verschiedener Länge ein. Die Ergebnisse der Messungen sind unter 1) in Zahlentafel 4 verzeichnet. Die Thermometer tauchten 70, 45 und 20 mm weit ein, d. h. das längste Röhrechen endigte in der Mitte des Rohres. Bei Fortleitung gesättigten Dampfes zeigten alle drei Thermometer sehr angenähert gleich, nämlich 161,5, 162 und 161° C bei 6,7 kg/qcm abs.; diese Werte entsprechen der Fliegnerschen Tabelle. Bei überhitztem Dampf ergaben sich sehr bedeutende Unterschiede, nämlich 290, 283 und 255° C; der Unterschied zwischen dem innersten und äußersten Thermometer war sonach 35° C. Da diese Werte äußerst unwahrscheinlich waren, vermutete man, daß durch die Einsatzröhrechen mehr Wärme nach außen abgeführt werde, als der überhitzte Dampf an die äußeren Meßröhrechen abgibt, daß sich infolgedessen in den Röhrechen eine tiefere Temperatur einstelle. Das äußerste Meßröhrechen für das Quecksilberthermometer wurde entfernt und noch drei Thermolemente eingesetzt, welche 21, 10 und 5 mm in das Rohrinne hineintraten. Die jetzt gewonnenen Ergebnisse sind unter 2 in Zahlentafel 4 zusammengestellt. Sie lassen immer noch den bedeutenden Temperaturunterschied von 22° C zwischen Rohrmitte und Rohrwand bei überhitztem Dampf erkennen, während bei gesättigtem Dampf die Elemente befriedigend übereinstimmen. Während aber bei den ersten Versuchen die Temperaturen in der Rohrmitte und in 20 mm Abstand von der Rohrwand um 35° C verschieden waren, betrug jetzt der Unterschied nur noch 15,5° C. Die Vermutung, daß die Wärmeableitung der Meßröhrechen das Ergebnis sehr stark beeinflußt, war damit bestätigt. Nun war zu untersuchen, ob nicht auch die Zuleitungsdrähte der Thermolemente bei den außenliegenden Elementen mehr Wärme abführen, als von dem überhitzten Dampf an die Lötstelle abgegeben wird. Um jeden derartigen Fehler auszuschalten, wurden nun zwei Meßstellen im Rohr angeordnet, von denen die eine 500 mm vor, die andre 500 mm hinter dem Meßflansch lag; alle Elementendrähte wurden an der Meßstelle zunächst 500 mm durch das Rohr zum Meßflansch geleitet, um so eine starke Wärmeabführung nach außen auszuschließen. Die nun gewonnenen Ergebnisse sind unter 3 in Zahlentafel 4 enthalten. Bei gesättigtem Dampf zeigten alle Elemente auf rd. 1° C gleich, bei überhitztem Dampf war der Unterschied zwischen der Rohrmitte und 10 mm Abstand von der Rohrwand rd. 2° C. Damit dürfte nachgewiesen sein, daß die großen Temperaturunterschiede, welche ursprünglich festgestellt wurden, lediglich eine Folge der starken Wärmeableitung durch die Meßröhrechen bzw. die Elementendrähte waren.

Diese eingehenden Untersuchungen über den Temperaturverlauf im Querschnitt einer Rohrleitung zeigen, daß die Temperatur von der Mitte nach dem Umfang einer Leitung zwar abnimmt, daß diese Abnahme aber gering ist und wohl bei vielen technischen Messungen vernachlässigt werden kann.

Andererseits zeigten diese Messungen aber auch, welche große Sorgfalt der Anbringung von Thermometern in den Rohrleitungen für überhitzten Dampf zuzuwenden ist, wenn auf zuverlässige Ergebnisse gerechnet wird.

#### 6) Durchführung der Versuche.

Bei den Versuchen waren mit den im vorstehenden besprochenen Einrichtungen und Hilfsmitteln zu beobachten:

- die Dampfdrücke,
- die Dampftemperaturen,
- die Temperaturen der Rohrwand,
- die Temperaturen der umgebenden Luft,
- das Niederschlagwasser.

Bei der Durchführung der Versuche mußte der größte Wert auf die Erreichung und Erhaltung des Beharrungszustandes in der Rohrleitung gelegt werden. Ein Versuch wurde erst begonnen, wenn die Messungen ergaben, daß sich die Temperaturen der Rohrwand und der Umhüllung nicht mehr änderten. Dieser Zustand wurde bei gesättigtem Dampf nach 1½ bis 2 st, bei überhitztem Dampf oft erst nach 4 st erreicht. Während des Versuches wurden Dampfdruck und -temperatur am Anfang der Leitung möglichst gleich erhalten. Durch Fig. 18 und 19, in denen die Meßergebnisse je eines vollständigen Versuches mit gesättigtem und überhitztem Dampf dargestellt sind, wird gezeigt, in welchem Maße die Versuchseinrichtungen das erstrebte Ziel erreichen ließen. Bei Versuchen mit ruhendem gesättigtem Dampf sind die Schwankungen nahezu verschwindend; bei überhitztem Dampf ließen sie sich nicht vollkommen vermeiden und erreichten Werte von 2 bis 3 vH.

Die Versuche mit ruhendem gesättigtem Dampf wurden auf 1 bis 2 st ausge-  
dehnt; der in Fig. 18 dargestellte Versuch dauerte 1½ st. In der Messung des

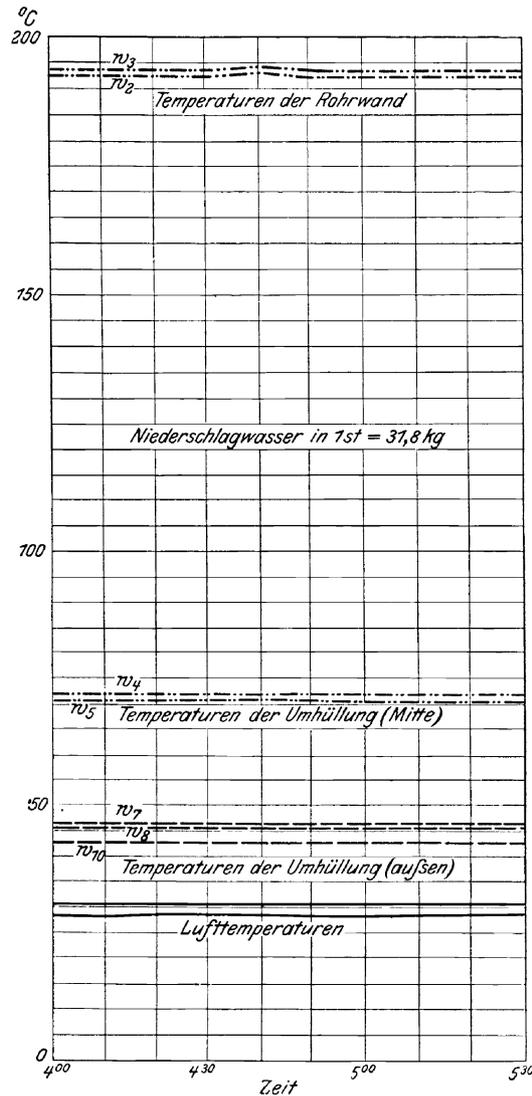


Fig. 18. Darstellung eines Versuches mit gesättigtem Dampf.

Niederschlagwassers wurden halbstündlich Zwischenabschlüsse gemacht; ein Versuch galt nur als brauchbar, wenn die so gewonnenen Einzelergebnisse unter sich auf 2 vH übereinstimmten; jeder Versuch wurde außerdem wiederholt. Außer einem vorzüglichen Beharrungszustande war bei den Versuchen mit ruhendem Dampf vor Beginn der Versuche eine vollkommene Entlüftung der Leitung anzustreben. Um ein Urteil über den Einfluß eines ungenügenden Beharrungszustandes der Rohrleitung auf das Ergebnis der Versuche zu gewinnen, wurde die folgende Rechnung an Hand des in Fig. 18 dargestellten Beispielen durchgeführt. In einer Stunde wurden 31,8 kg Dampfwater abgeführt. Der Dampf hatte 12 kg/qcm Ueberdruck, sonach einen Wärmeinhalt von 665 WE; die Flüssigkeitswärme beträgt 193 WE, der Wärmeverlust der Leitung sonach 31,8 (665-193) = 15000 WE.

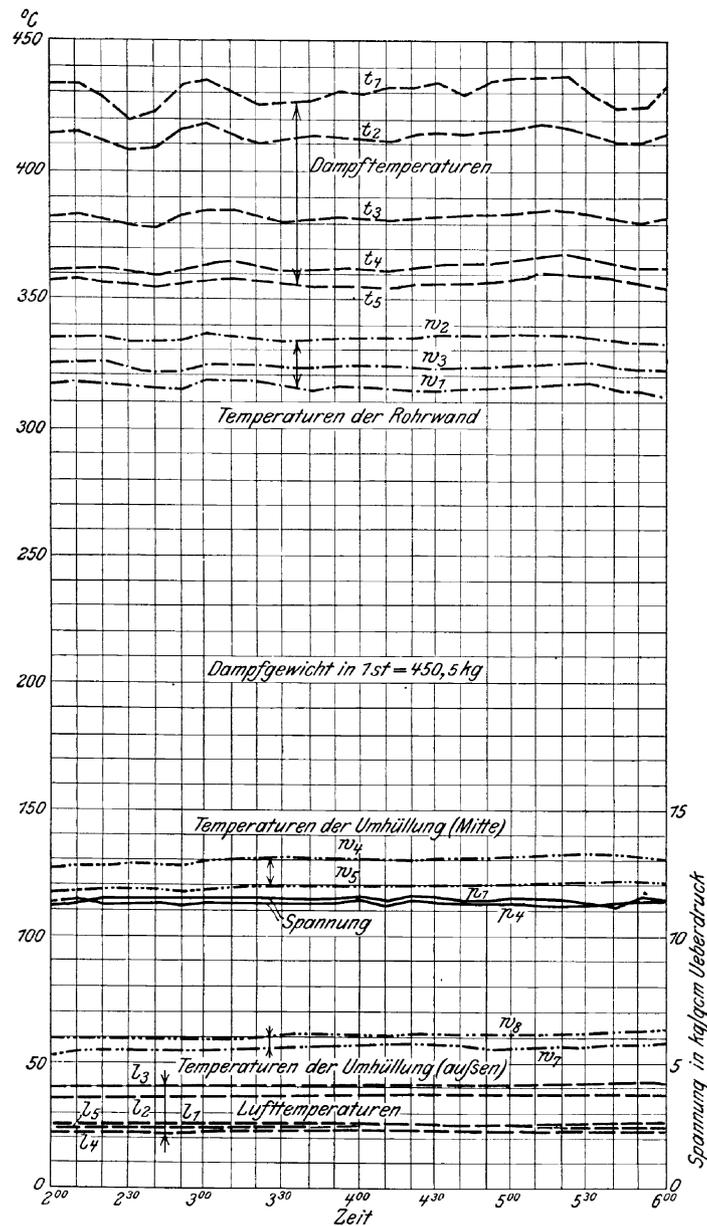


Fig. 19. Darstellung eines Versuches mit überhitztem Dampf<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> Die Meßstellen 1 bis 5 entsprechen den Buchstaben a bis d in den Fig. 1 und 2.

Der Wärmewert der ganzen Leitung  $a d$ , welche bei dem Versuch benutzt wurde, berechnet sich zu 117 WE unter folgenden Annahmen:

spez. Gewicht des Eisens . . . . .	7,6
» » der Isolierung . . . . .	0,32
spez. Wärme des Eisens . . . . .	0,12
» » der Isolierung . . . . .	0,20

Eine Temperaturänderung der Rohrleitung mit Isolierung um  $1^{\circ}\text{C}$  bedingt sonach bereits eine Aenderung ihres Wärmeinhaltes um 0,8 vH der abgegebenen Wärmemenge. Es war deshalb von größter Wichtigkeit, die einzelnen Versuche mit einem bestimmten Beharrungszustande durchzuführen.

Das Schaubild Fig. 19 eines Versuches mit überhitztem Dampf zeigt, daß zwar die Wandungstemperaturen während des vierstündigen Versuches befriedigend gleich erhalten werden konnten, während sich bei den Dampfeintrittstemperaturen erhebliche Schwankungen nicht vermeiden ließen; nichtsdestoweniger läßt die Figur erkennen, daß das mittlere Temperaturgefälle in der Leitung aus einem solchen Versuch mit großer Genauigkeit gewonnen werden kann. Der Verlauf der Linienzüge für die Dampftemperaturen  $t$  läßt den dämpfenden Einfluß des Beharrungsvermögens der Rohrleitungsmassen erkennen.

Die Versuche mit überhitztem Dampf mußten mit Rücksicht auf die Dampfmengenbestimmung auf eine größere Zeitdauer von 3 bis 4 st ausgedehnt werden.

Zu den in Fig. 18 und 19 eingetragenen Wandungstemperaturen ist zu bemerken, daß diese Werte hinsichtlich der wirklichen Größe auf Genauigkeit keinen Anspruch machen; für die Beurteilung des Beharrungszustandes ist jedoch lediglich die Kenntnis der Aenderungen dieser Werte während des Versuches erforderlich.

## Zweiter Abschnitt.

### Wärmeverlust bei der Fortleitung gesättigten Dampfes.

#### I. Verlust nicht umhüllter Dampfleitungen.

##### 1) Abhängigkeit des Wärmeverlustes von der Dampftemperatur.

Im allgemeinen werden im folgenden nur die an der Versuchschleife  $b c$  durchgeführten Versuche benutzt; in einzelnen Fällen soll jedoch auch von den an anderen Teilstrecken vorgenommenen Messungen Gebrauch gemacht werden.

Die Ergebnisse der an den nicht umhüllten Versuchschleifen von 70 und 150 mm l. Dmr. durchgeführten Versuche sind in Zahlentafel 5 zusammengestellt.

Bei allen diesen Versuchen, die bei 3 bis 13 kg/qem abs. stattfanden, wurde das Dampfwasser mit der in Fig. 15 dargestellten Einrichtung abgeführt, an die das Meßgefäß angeschlossen war. Für gute Entlüftung der Leitung vor Beginn der einzelnen Versuche wurde gesorgt; längere Zeit vor Beginn und während der Dauer der einzelnen Versuche wurde die Kesselspeisung vermieden, um den Dampf möglichst frei von Luft in die Leitung zu bekommen.

Die durch Wägung festgestellte Dampfwassermenge wurde nicht vollständig in der Versuchsleitung gebildet, sondern in dem gewogenen Betrag ist auch die in dem Auffanggefäß und in der kurzen Zuleitung zu diesem entstehende Dampfwassermenge enthalten. Um reine Werte zu bekommen, mußte man letztere von der Gesamtmenge in Abzug bringen. Zu diesem Zwecke bestimmte man mit der in Fig. 20 dargestellten Vorrichtung die lediglich in dem Meßgefäße mit seiner Zuleitung ge-

Zahlentafel 5.  
Wärmeverluste der nackten Leitung *b c* von 70 mm und 150 mm l. W. bei ruhendem gesättigtem Dampf.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Länge m	Versuchleitung		absolute Dampf- spannung kg/qcm	Dampf- temperatur °C	mittlere Luft- temperatur °C	Temperatur- gefälle zwischen Dampf und Luft °C	Nieder- schlag- wasser für 1 m Leitung in 1 st kg	Wärmeverlust für 1 st und			<i>k</i>	
	lichte Weite mm	Zahl der Flansche						1 m	1 qm	1 qm und 1° C		
								Rohrleitung (ausschl. Flüssigkeitswärme)				
			WE	WE	WE							
26,6	Schleife 70	6	3,17	134,7	16,1	118,6	0,770	394,1	1556	13,1	6,15	
			3,13	134,2	15,3	118,9	0,769	393,8	1555	13,1	6,16	
			3,16	134,5	16,6	117,9	0,761	117,9	389,9	1540	13,1	6,12
			6,56	161,4	18,7	142,7	1,034	142,7	509,4	2011	14,1	6,15
			6,59	161,6	17,2	144,4	1,051	144,4	517,8	2043	14,1	6,19
			6,52	161,2	21,3	139,9	21,3	139,9	512,2	2023	14,5	6,47
			12,94	190,4	24,5	165,9	24,5	165,9	638,0	2520	15,2	5,97
26,0	Schleife 150	7	13,04	190,7	21,7	169,0	1,401	660,2	2608	15,4	6,27	
			3,25	135,5	22,5	118,0	1,542	118,0	789	1474	13,1	5,97
			3,33	136,3	25,7	110,6	1,501	110,6	766	1482	13,0	5,74
			6,75	162,6	31,7	130,9	2,028	130,9	997	1863	14,2	5,85
			6,72	162,4	30,2	132,2	2,054	132,2	1011	1889	14,3	5,99
			13,07	190,8	30,6	160,2	2,875	160,2	1354	2529	15,8	6,39
			13,06	190,8	35,4	155,4	2,785	155,4	1312	2451	15,8	6,24

bildete Wassermenge bei verschiedenen Drücken; die erhaltenen Werte wurden von den Gesamtergebnissen jeweils in Abzug gebracht. Die dem letztgenannten Zweck dienende Anordnung unterscheidet sich von der in Fig. 15 (S. 11) dargestellten Versuchseinrichtung nur dadurch, daß das Röhrechen *a* in die Versuchsleitung hineinragt, wodurch verhindert ist, daß dem Meßgefäß das Dampfwater aus der Leitung zufließt.

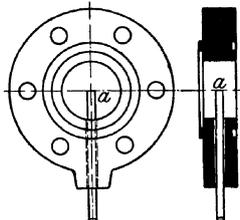


Fig. 20. Einrichtung zur Bestimmung des Wärmeverlustes im Wassersammler.

Außer den unmittelbaren Versuchszahlen sind in Zahlentafel 5 bereits verschiedene für die weitere Verwertung der Ergebnisse bestimmte Werte aufgenommen. Bei der Berechnung des Wärmeverlustes aus der Niederschlagwassermenge wurde die Flüssigkeitswärme von der Gesamtwärme in Abzug gebracht; nach angestellten Untersuchungen fließt das Dampfwater mit der Dampftemperatur aus der Leitung ab. Spalte 10 enthält die Wärmeverluste für 1 qm Leitungsoberfläche, Spalte 11 diejenigen für 1 qm Leitungsoberfläche und 1° C Temperaturgefälle zwischen Dampf und umgebender Luft. Als Leitungsoberfläche wurde die gesamte Außenfläche der Leitung einschließlich der Flansche in Rechnung gesetzt. Die Gesamtoberfläche beträgt für die 70 mm-Leitung 6,735 qm; hiervon treffen auf die Flansche 0,523 qm, also 7,8 vH. Für die 150 mm-Leitung wurde eine Gesamtfläche von 13,92 qm berechnet; davon treffen auf die Flansche 1,312 qm oder 9,4 vH; die Flanschoberfläche wurde aus dem in Fig. 21 stark ausgezogenen Umfang berechnet.

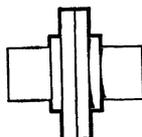


Fig. 21.

In Fig. 22 sind die aus Zahlentafel 5 berechneten Wärmeverluste für 1 qm Rohroberfläche in Abhängigkeit vom Temperaturgefälle zwischen Dampf und Luft dargestellt, während Fig. 23 die Wärmemenge, die auf 1 qm Leitungsoberfläche bei 1° C Temperaturgefälle übertragen wird, in Abhängigkeit von der Dampftemperatur darstellt.

Sowohl Zahlentafel 5 als Fig. 23 zeigen, daß der Gesamtwärmeübergang für 1 qm Leitungsoberfläche und 1° Temperaturgefälle mit zunehmender Dampftemperatur wächst.

Der Wärmeübergang von der Rohrleitung an die umgebende Luft erfolgt durch Berührung und Strahlung; unter Zugrundelegung des Stefan-Boltzmannschen Strahlungsgesetzes ist

$$K = k + \frac{c}{t_w - t_l} \left\{ \left( \frac{t_w + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_l + 273}{100} \right)^4 \right\};$$

in dieser Gleichung ist *k* der Uebergangskoeffizient für Berührung, *c* eine Konstante, die zu *c* = 4 angegeben wird, *t<sub>w</sub>* die Wandungstemperatur der Rohrleitung, *t<sub>l</sub>* die Temperatur der Luft.

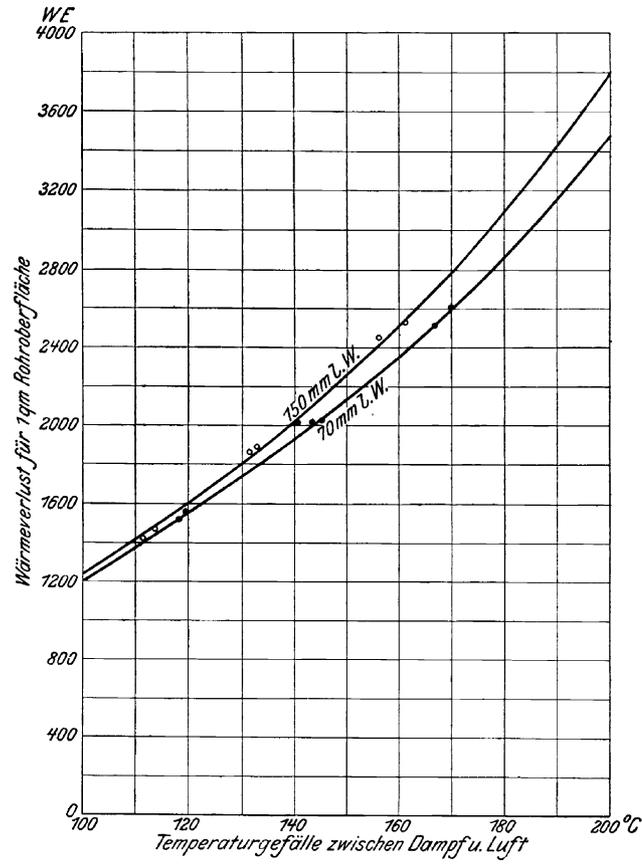


Fig. 22. Wärmeverluste nackter Rohrleitungen.

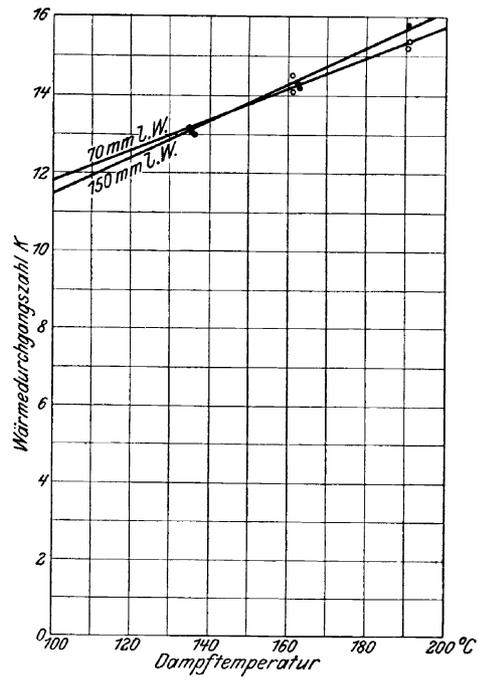


Fig. 23. Wärmedurchgangszahl für nackte Leitungen.

Zahlentafel 6.

Temperaturen der Rohraußenwand und der Flanschoberfläche.

1	2	3	4	5
Dampfdruck	Dampf- temperatur	Temperatur der Rohr- oberfläche	Temperatur der Flansch- oberfläche	Luft- temperatur
kg/qcm abs.	°C	°C	°C	°C
nackte Leitung				
4,9	150,2	149,0	—	14
5,7	156,0	155,0	—	13,5
9,0	174,4	173,2	—	11
umhüllte Leitung, Flansche frei				
3,44	137,4	137,0	120,8	6,8
6,71	163,8	162,8	140,6	9,2
13,16	191,1	190,5	163,0	9,0
umhüllte Leitung, Flansche umhüllt				
3,26	136,4	135,9	132,5	5,5
6,73	164,0	163,6	158,7	7,8
13,08	191,0	190,5	185,0	7,6

Die Ergebnisse der Messungen der Wandungstemperaturen sind in Zahlentafel 6 zusammengestellt. Diese Versuche wurden mit der in Fig. 10 (S. 5) dargestellten Einrichtung sowohl an der Rohr- als an einer Flansch-Außenfläche durchgeführt, und zwar an den nackten und an den umhüllten Flächen. Der Zahlentafel ist zu entnehmen, daß die Temperatur der Rohroberfläche bei gesättigtem Dampf sich der Dampftemperatur so annähert, daß der Unterschied zwischen beiden für die Berechnung von  $K$  vernachlässigt werden kann. Für den Flansch ergab sich bei Umhüllung ein Temperaturgefälle von 3 bis 5° C; der nackte Flansch dagegen hatte an seiner Außenfläche eine um 16 bis 17° C niedrigere Temperatur als der Dampf. Der Temperaturabfall ist sonach bei nacktem Flansch um 5- bis 6 mal größer als beim umhüllten Flansch; wie die späteren Untersuchungen zeigen werden, ist auch die durch den nackten Flansch abgeführte Wärmemenge für die Flächeneinheit etwa das 5- bis 6fache der durch den umhüllten Flansch abgegebenen. In dieser Tatsache liegt eine Bestätigung der in Zahlentafel 6 für die Flanschttemperaturen festgestellten Werte. Um festzustellen, ob die in Zahlentafel 5 Spalte 11 angegebenen Wärmedurchgangsziffern die obige Gleichung erfüllen, wurde für alle Versuchswerte  $k$  aus der Gleichung berechnet:

$$k = K - \frac{c}{t_w - t_l} \left\{ \left( \frac{t_w + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_l + 273}{100} \right)^4 \right\}.$$

Die Werte  $k$  sind in Spalte 12 der Zahlentafel 5 ebenfalls eingetragen. Für die beiden Rohrleitungen von 70 und 150 mm Dmr. steigt der Wärmeübergangskoeffizient für Berührung  $k$  mit zunehmender Temperatur ganz mäßig an, was nach sonstigen Erfahrungen und auch nach Péclets Angaben erwartet werden mußte. Die Versuchsergebnisse bestätigen sonach ganz befriedigend das Stefan-Boltzmannsche Strahlungsgesetz. Der Einfluß der Dampf- und Lufttemperatur auf  $K$  ergibt sich also aus der diese Gesetzmäßigkeit bestimmenden Formel; d. h. der Gesamt-Wärmeübergangskoeffizient  $K$  wächst mit zunehmender Dampftemperatur und mit zunehmender Lufttemperatur. Die Dampftemperatur ist von wesentlich größerem Einfluß auf  $K$  als die Lufttemperatur; da letztere sich bei den Versuchen nur wenig veränderte, so ist in allen Zahlentafeln

und Figuren  $K$  in Abhängigkeit von der Dampftemperatur dargestellt. Um den Einfluß der Temperaturen auf  $K$  darzutun, habe ich folgendes Beispiel berechnet.  $K$  ist für die Dampftemperaturen 200 und 180° C bei 20 und 40° C Lufttemperatur zu ermitteln;  $k$  sei gleich 6.

$$\begin{aligned} &\text{für } t_w = 200^\circ, \quad t_l = 20^\circ \text{ wird } K = 15,5 \\ &\text{» } t_w = 200^\circ, \quad t_l = 40^\circ \quad \text{» } K = 16,1 \\ &\text{» } t_w = 180^\circ, \quad t_l = 20^\circ \quad \text{» } K = 14,7. \end{aligned}$$

Bei gleicher Dampftemperatur und um 20° C gesteigerter Lufttemperatur hat sich  $K$  von 15,5 auf 16,1, also um 3 vH erhöht, während eine Verminderung der Dampftemperatur um 20° C bei gleicher Lufttemperatur eine Verminderung des Wertes  $K$  von 15,5 auf 14,7, d. i. um 5 vH zur Folge hat.

Aus Spalte 6 der Zahlentafel 5 geht hervor, daß die Versuche mit der 70 mm-Leitung mit Lufttemperaturen von 15 bis 25° C durchgeführt wurden, während bei den Versuchen an der 150 mm-Leitung die Lufttemperatur 22 bis 35° C betrug und gerade die Versuche mit höheren Dampftemperaturen (160 bis 190° C) bei Lufttemperaturen von 30 bis 35° C stattfanden. Die Lufttemperatur war sonach bei diesen Versuchen um mindestens 10° C höher als bei den Versuchen mit der 70 mm-Leitung. Während sich bei den Versuchen mit niedrigeren Dampftemperaturen, bei welchen auch die Lufttemperaturen noch weniger verschieden waren, für beide Leitungen ganz gleiche Werte für  $K$  ergeben, ist bei den Versuchen mit 190° C Dampftemperatur  $K$  bei der 150 mm-Leitung um 0,5, d. h. 3 vH höher. Ein Teil dieses Unterschiedes ist zweifellos durch die höhere Lufttemperatur verursacht, und es kann angenommen werden, daß die für beide Leitungen gefundenen Werte  $K$  noch viel besser unter sich übereinstimmen würden, wenn auch die Versuche mit der 150 mm-Leitung bei niedrigeren Lufttemperaturen durchgeführt worden wären. Bei Untersuchungen über den Wärmeübergangskoeffizienten  $K$  an nackten Rohrleitungen muß sonach der Einfluß der Dampf- und auch der Lufttemperatur auf diesen Wert die aus vorstehenden Darlegungen sich ergebende Berücksichtigung finden.

## 2) Einfluß des Leitungsdurchmessers auf den Wärmeverlust.

Nach Péclet nimmt bei wagerechten Rohrleitungen der Wärmeübergang mit zunehmendem Durchmesser ab. Péclet erklärte diese Tatsache damit, daß mit wachsendem Durchmesser die Oberfläche der Rohrleitung weniger vollkommen von der Luft bestrichen werde, wodurch sich der Wärmeübergang durch Berührung vermindere. Selbst wenn ein erheblicher Einfluß des Rohrdurchmessers nachgewiesen werden könnte, so müßte dieser mit zunehmender Dampftemperatur abnehmen, da der Strahlungsanteil, welcher durch den Durchmesser auch nach Péclet nicht beeinflußt wird, mit der Dampftemperatur wesentlich rascher wächst als die durch Berührung übertragene Wärmemenge. Die in Spalte 12 der Zahlentafel 5 nach dem Stefan-Boltzmannschen Strahlungsgesetz berechneten Werte  $k$  sind für beide Durchmesser angenähert gleich;  $k$  beträgt für die 70 mm-Leitung im Mittel 6,20 und für die 150 mm-Leitung 6,03; auf den Gesamtwärmeübergang bezogen, ergibt sich demnach ein Unterschied von 1 vH. Selbst wenn man von der Anwendung des Stefan-Boltzmannschen Gesetzes ganz absieht und lediglich die durch die Messungen gewonnenen Werte  $K$  vergleicht, gelangt man ebenfalls nicht zu einer Bestätigung der Pécletschen Formel, da unsre Versuche mit Berücksichtigung der im letzten Abschnitt enthaltenen Ausführungen bei beiden Durchmessern für gleiche Temperaturen auch gleiche Werte  $k$  lieferten; das Anwachsen von  $K$  für den größeren Durchmesser bei höheren Dampftemperaturen über die Werte für die 70 mm-Leitung

ist, wie im letzten Abschnitt nachgewiesen, im wesentlichen eine Folge der größeren Lufttemperatur bei diesen Versuchen.

Unsre Versuche bestätigen also in dieser Hinsicht die Péceletsche Formel nicht; sie lassen einen Einfluß des Durchmessers auf den Wärmeverlust der nackten Leitung nicht erkennen.

In Zahlentafel 7 sind die Werte  $K$  für die beiden Leitungen in Abhängigkeit von der Dampftemperatur von 100 bis 200° C mit ihren Mittelwerten zusammengestellt. Für die 70 mm-Leitung bewegt sich  $K$  von 100 bis 200° C zwischen 11,78 und 15,80, während für die 150 mm-Leitung die beiden Grenzwerte zu 11,4 und 16,20 ermittelt wurden; im Mittel schwankt sonach  $K$  für das Temperaturgebiet zwischen 11,6 und 16,0. Dabei gilt als Voraussetzung, daß die Lufttemperatur 20 bis 30° C beträgt.

Zahlentafel 7.

Nackte Leitung *bc*.

Wärmedurchgangszahl  $K$  in Abhängigkeit von der Dampftemperatur.

1	2	3	4
Dampftemperatur °C	Wärmedurchgangszahl $K$		
	70 mm-Leitung	150 mm-Leitung	Mittelwert
100	11,78	11,40	11,59
110	12,18	11,88	12,03
120	12,58	12,36	12,47
130	12,99	12,84	12,92
140	13,39	13,32	13,36
150	13,79	13,80	13,80
160	14,19	14,28	14,23
170	14,59	14,76	14,68
180	15,00	15,24	15,12
190	15,40	15,72	15,56
200	15,80	16,20	16,00

3) Einfluß der Dampfgeschwindigkeit auf den Wärmeverlust.

Um tunlichst zuverlässige und genaue Messungen zu ermöglichen, entschloß man sich, diese Versuche mit ruhendem Dampf durchzuführen. Tatsächlich findet ja bei allen Versuchen eine Dampfbewegung in der Versuchsleitung statt, da der durch die Wärmeabführung der Oberfläche in der Leitung niedergeschlagene Dampf fortwährend nachströmen muß; aber die hierdurch entstehende Geschwindigkeit ist sehr gering im Verhältnis zu der im Betriebe der Leitung eintretenden. Ehe man die hier gewonnenen Ergebnisse auf Betriebsdampfleitungen anwenden darf, wird man deshalb die Frage nach dem Einfluß der Dampfgeschwindigkeit auf den Wärmeübergang beantworten müssen, um so mehr, als dieser von vielen Seiten sehr hoch eingeschätzt wird.

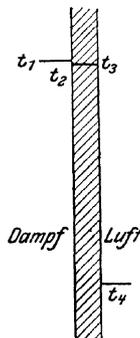


Fig. 24.

Bezeichnet in Fig. 24  $t_1$  die Dampftemperatur,  $t_2$  die Innentemperatur,  $t_3$  die Außentemperatur der Rohrwand und  $t_4$  die Lufttemperatur, so ist die stündlich auf die Flächeneinheit übertragene Wärmemenge  $Q$ , wenn  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  die Wärmeübergangskoeffizienten vom Dampf zur Rohrwand und von dieser an die Luft sind und  $\lambda$  den Wärmeleitkoeffizienten der Rohrwand darstellt:

$$Q = \alpha_1 (t_1 - t_2)$$

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} (t_2 - t_3)$$

$$Q = \alpha_2 (t_3 - t_4).$$

Nach Zahlentafel 6 liegt die Temperatur der Rohrwand für das ganze Meßgebiet gesättigten Dampfes um etwa  $1^\circ$  unter der Dampftemperatur; selbstverständlich wächst der Unterschied mit der Dampftemperatur, aber die Genauigkeit unsrer Meßeinrichtungen reichte nicht aus, um diese kleinen Abweichungen festzustellen. Nach Zahlentafel 5 wurden bei  $160^\circ$  C Dampftemperatur und  $20^\circ$  C Lufttemperatur  $Q = 2000$  WE durch  $1$  qm Rohroberfläche in der Stunde übertragen. Bei  $1^\circ$  C Temperaturverlust in der Rohrwand ist sonach

$$2000 = \alpha_2 (159 - 20)$$

$$\alpha_2 = \frac{2000}{139} = 14,4.$$

Mit  $\lambda = 50$  und  $\delta = 3$  mm ist ferner

$$2000 = \frac{50}{0,003} (t_1 - t_2);$$

$$t_1 - t_2 = 0,12^\circ \text{ C}; \text{ da } t_2 = 159^\circ \text{ C, ist } t_1 = 159,12^\circ \text{ C.}$$

Somit berechnet sich

$$\alpha_1 = \frac{2000}{160 - 159,12} = \frac{2000}{0,88}$$

$$\alpha_1 = 2270.$$

$\alpha_1$  ist aber der einzige Wert, der durch die Dampfgeschwindigkeit beeinflusst sein kann; wenn  $\alpha_1 = \infty$  würde, d. h. wenn dem Wärmeübergang vom Dampf zur Rohrwand gar kein Widerstand entgegenstände, betrüge

$$t_1 = 160^\circ, t_2 = 160 - 0,12 = 159,88^\circ \text{ C.}$$

und der Wärmeübergang  $Q$  würde sich bei gleichem  $K = 14,4$  berechnen zu  $Q = 14,4 \times (159,88 - 20) = 2014$  WE.

Selbst wenn der Widerstand  $\left(\frac{1}{\alpha_1}\right)$  für den Wärmeübergang vom Dampf zur Rohrwand durch die Dampfgeschwindigkeit vollständig zu 0 würde, was nicht möglich ist, so könnte durch die Beseitigung des Widerstandes die überströmende Wärmemenge in unserm Beispiel nur von 2000 auf 2014 WE, also um 0,7 vH erhöht werden; der wirkliche Einfluß muß somit noch wesentlich geringer sein. Es läßt sich deshalb der Satz aufstellen:

Der Einfluß der Dampfgeschwindigkeit auf den Wärmeverlust ist bei gesättigtem Dampf auf jeden Fall erheblich geringer als die Fehlerquellen, die bei der Versuchsdurchführung mit bewegtem Dampf in die Arbeit gebracht würden. Das hier gewählte Versuchsverfahren hat deshalb volle Berechtigung.

#### 4) Anteil der Flansche am Gesamtwärmeverlust einer Rohrleitung.

Zur Bestimmung des Wärmeverlustes auf die Einheit der Rohrleitungsoberfläche wurde die wirkliche Gesamtoberfläche der Versuchsleitung einschließlich der Flansche berechnet und der festgestellte Wärmeverlust auf die Gesamtoberfläche bezogen. Die so gewonnenen Einheitszahlen enthalten die Spalten 10 und 11 der Zahlentafel 5. Dieses Verfahren ist nur dann berechtigt, wenn der Verlust der Flansche auf die Flächeneinheit dem der Rohrleitung gleich ist oder sich ihm so weit nähert, daß der Unterschied für den in Frage kommenden Anwendungszweck vernachlässigt werden kann. Auf Grund der Versuchsergebnisse soll nun das Verhältnis des Flanschverlustes zu dem Rohrleitungsverlust ermittelt werden; die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Zahlentafel 8 zusammengestellt.

Zahrentafel 8.  
Wärmeverlust durch die Flansche.

1	2	3	4	5	6	7
Temperaturgefälle zwischen Dampf und Luft  °C	70 mm l. W.			150 mm l. W.		
	stündl. Wärmeverlust für 1 qm nackter Gesamtleitung	stündl. Wärmeverlust für 1 qm Flansch oberfläche	Verhältnis der Verluste von 1 qm Flansch oberfläche zu 1 qm Rohrfläche	stündl. Wärmeverlust für 1 qm nackter Gesamtleitung	stündl. Wärmeverlust für 1 qm Flansch oberfläche	Verhältnis der Verluste von 1 qm Flansch oberfläche zu 1 qm nackter Rohrfläche
	WE	WE	vH	WE	WE	vH
100	1212	1275	105	1249	1210	97
110	1386	1465	105,5	1425	1400	98
120	1567	1647	105	1610	1590	99
130	1755	1750	100	1815	1780	98
140	1947	1940	100	2035	1970	97
150	2157	2120	98	2275	2170	95,5
160	2375	2290	96	2545	2450	96
170	2626	2470	94	2815	2690	95,5
180	2893	2610	90	3125	2940	94
190	3193	2740	86	3470	3180	92
200	3523	3000	85	3850	3370	88

Aus den Versuchen mit der Isolierung I mit und ohne Flanschumhüllung läßt sich die Wärmeersparnis durch die Flanschumhüllung und durch die Isolierung der ganzen Leitung berechnen. Nimmt man nun an, daß der Wirkungsgrad der Flanschumhüllung dem Wirkungsgrade der Gesamtrohrleitungsisolierung gleich sei, so erhält man auch den Gesamtverlust der Flansche. Der Rechnungsgang wird an folgendem Beispiel erläutert. Nach Zahrentafel 8 beträgt der Wärmeverlust für 1 qm Rohrleitungsoberfläche in der Stunde bei 100° C Temperaturgefälle 1212 WE; durch die Flanschumhüllung wird eine Wärmeersparnis von  $300 - 212 = 88$  WE auf 1 qm Gesamtrohrleitungsfläche erzielt; die Gesamtersparnis durch die Flanschumhüllung ist sonach  $88 \times 6,375 = 595$  WE. Da der Wirkungsgrad der Isolierung sich zu 82,5 vH ergab, so ist der Verlust der ganzen Flanschoberfläche  $\frac{595}{0,825} = 720$  WE. In diesen Betrag ist nun aber noch der Teil der Rohrleitung mit eingeschlossen, der bei der Isolierung der glatten Leitung nicht mit bedeckt, aber bei der Flanschumhüllung mit verkleidet wird. Dieser Betrag ist bei der Versuchsleitung von 70 mm l. W. = 0,044 qm. Da auf 1 qm 1212 WE verloren werden, muß die Wärmemenge von  $1212 \times 0,044 = 53$  WE in Abzug gebracht werden, so daß noch ein Flanschverlust von  $720 - 53 = 667$  WE bleibt. Dieser Verlust trifft auf die Gesamtflanschoberfläche von 0,523 qm; auf 1 qm treffen somit  $\frac{667}{0,523} = 1275$  WE.

Das Verhältnis des Flanschverlustes zum Rohrverlust ist also  $\frac{1275}{1212} = \frac{1,05}{1}$ ; d. h. bei 100° C Temperaturgefälle verliert 1 qm Flanschoberfläche 1,05 mal soviel Wärme wie 1 qm Rohrfläche. Die Werte wurden nun für die 70 mm- und die 150 mm-Leitung für die Temperaturgefälle von 100 bis 200° C berechnet und in Zahrentafel 8 zusammengestellt. Nach den Versuchsergebnissen nimmt die Verhältniszahl mit zunehmendem Temperaturgefälle ab. Jedenfalls kann aber aus den Zahlen der Tafel 8 gefolgert werden, daß der Flanschverlust von dem Rohrleitungsverlust, auf

1 qm Oberfläche bezogen, nur unerheblich abweicht, und daß in Anbetracht des geringen Anteiles der Flanschoberfläche an der Gesamtoberfläche einer Rohrleitung dieser Unterschied für praktische Rechnungen vernachlässigt werden kann.

Der Verlauf der in Zahlentafel 8 zusammengestellten Ergebnisse über den Anteil der Flansche am Wärmeverlust der nackten Rohrleitung läßt sich nach einer einfachen Ueberlegung erwarten. Nach Zahlentafel 6 bleibt die Temperatur der Flanschoberfläche hinter der Wandungstemperatur zurück, und zwar wächst der Unterschied mit steigendem Temperaturgefälle; es soll sonach der Anteil des Flanschverlustes mit zunehmender Dampftemperatur kleiner werden. Im Mittel aus beiden Versuchsreihen nimmt er von 100 bis 200°C Temperaturgefälle von 100 auf 87 vH ab.

5) Wärmeverlust eines Ventiles.

Um Berechnungen über den Wärmeverlust ganzer Rohrleitungen anstellen zu können, ist die Kenntnis des Wärmeverlustes der Ventile erforderlich, um so mehr, als vielfach die Ventile nicht umhüllt werden und so zu dem Gesamtverlust im übrigen umhüllter Leitungen wesentlich beitragen.

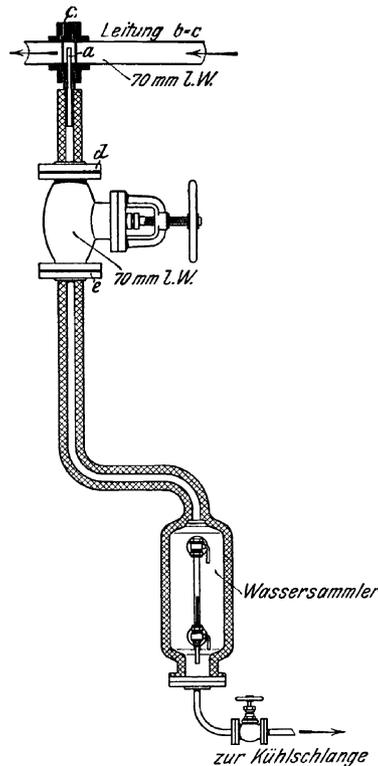


Fig. 25.

Zur Bestimmung des Wärmeverlustes eines Ventiles benutzte man die in Fig. 25 dargestellte Einrichtung. In die enge gut umhüllte Verbindungsleitung zwischen der Versuchschleife *b c* und dem Wassersammler wurde ein Ventil von 70 mm l. W. eingebaut. In die Leitung setzte man das schon in Fig. 20 besprochene Röhrchen *a* ein, so daß das Dampfwater aus der Hauptleitung nicht in die Meßleitung gelangen konnte. Bei den Drücken von 3 bis 12 kg/qcm abs. wurde nun der in der Verbindungsleitung, dem Wassersammler und dem nicht umhüllten Ventil entstehende Verlust ermittelt; hierauf nahm man das Ventil heraus und schraubte die beiden Flansche *d* und *e* unmittelbar zusammen; bei den wiederholten Versuchen erhielt man den Wärmeverlust, vermindert um den Verlust des Ventiles.

Zahlentafel 9.

Wärmeverlust eines Ventiles von 70 mm l. W.

1	2	3	4	5	6		7
absoluter Dampfdruck	Dampf- temperatur	mittlere Lufttemperatur	Temperatur- gefälle zwischen Dampf und Luft	Niederschlag- wasser in 1 st	stündlicher Wärmeverlust		
					einschl. Flüssig- keits- wärme	abzüglich Flüssig- keits- wärme	
kg/qem	°C	°C	°C	kg	WE	WE	

Verlust eines normalen Ventiles (70 mm l. W.)  
und eines normalen Flanschenpaares einschließlich  
Kondensatleitung.

3,38	136,9	7,4	129,5	1,51	979	770
6,70	162,3	9,0	153,3	2,06	1351	1013
12,40	188,4	6,4	182,0	2,86	1899	1352

Verlust eines normalen Flanschenpaares einschließlich  
Kondensatleitung.

3,40	137,1	5,0	132,1	0,76	493	388
6,65	163,0	2,0	160,0	1,19	780	532
12,60	189,1	4,9	184,2	1,42	843	671

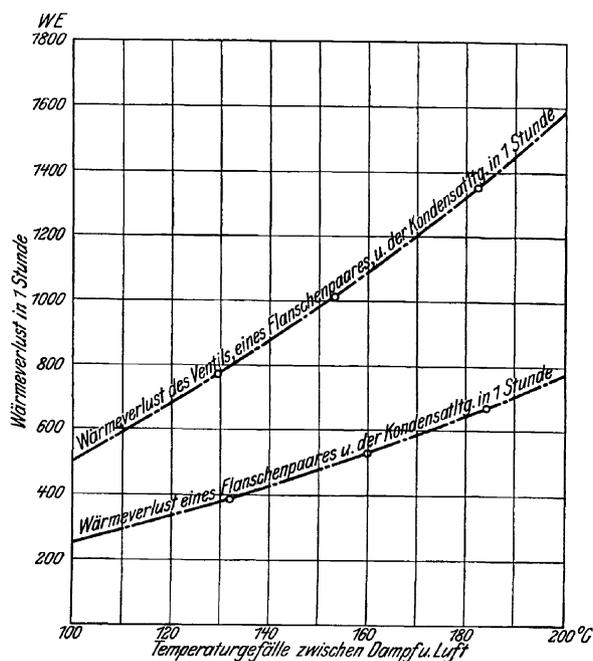


Fig. 26. Wärmeverlust eines Ventiles von 70 mm l. W.

Die Ergebnisse dieser Versuche sind in Zahlentafel 9 zusammengestellt und in Fig. 26 zeichnerisch dargestellt. Die obere Kurve stellt die Wärmeverluste der ganzen Versuchseinrichtung mit dem Ventil dar, die untere Kurve zeigt die Werte, die ohne das Ventil erhalten wurden; der Unterschied beider ist sonach der Ventilverlust. In Zahlenreihe 2 der Zahlentafel 10 sind diese Werte in Abhängigkeit vom Temperaturgefälle zwischen Dampf und Luft für das Gebiet von 100 bis 200° C zusammengestellt. Es ist gleichzeitig angegeben, welche Länge eines nackten Rohres

Zahlentafel 10.

Wärmeverlust eines normalen Ventiles von 70 mm l. W. in Abhängigkeit vom Temperaturgefälle zwischen Dampf und Luft.

1	2	3
Temperaturgefälle zwischen Dampf und Luft	stündlicher Wärmeverlust des Ventiles	Länge eines nackten Rohres von 70 mm l. W. und gleichem Wärmeverlust
°C	WE	m
100	255	0,87
110	300	0,91
120	350	0,94
130	400	0,95
140	450	0,97
150	500	0,97
160	555	0,98
170	613	0,98
180	675	0,98
190	742	0,97
200	816	0,97

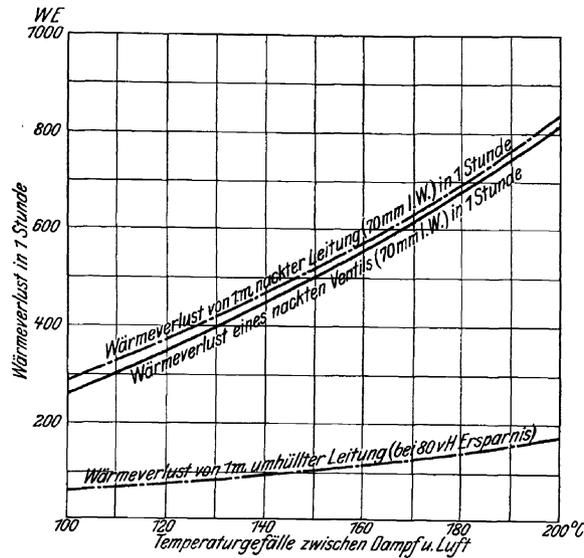


Fig. 27. Wärmeverlust eines Ventiles im Vergleich zur Rohrleitung.

von ebenfalls 70 mm l. W. den gleichen Wärmeverlust haben würde; hieraus ergibt sich, daß der Verlust eines nackten Ventiles von 70 mm l. W. sehr angenähert dem Verlust von 1 m nackter Leitung von gleichem Durchmesser gleichkommt. In Fig. 27 sind in Abhängigkeit vom Temperaturgefälle der Wärmeverlust dieses Ventiles, der Wärmeverlust von 1 m nackter Rohrleitung und der von 1 m umhüllter Rohrleitung, deren Umhüllung eine Wärmeersparnis von 80 vH bringt, dargestellt.

Das nackte Ventil hat sonach ohne das zugehörige Flanschenpaar der Rohrleitung einen Wärmeverlust, der dem von etwa 1 m nackter oder 5 m umhüllter Leitung bei 80 vH Wärmeersparnis gleichkommt.

## II. Verlust umhüllter Dampfleitungen.

### 1) Beschreibung der untersuchten Umhüllungen.

Um den Einfluß der Umhüllung einer Rohrleitung auf den Wärmeverlust festzustellen, wurden an der Rohrleitungsschleife *bc* mit verschiedenen Isoliermitteln Versuche durchgeführt. Die einzelnen, im folgenden zu besprechenden Isolierstoffe wurden mit I bis V bezeichnet.

Isolierung I. Die Isolierung bestand aus Schalen, die eine poröse, gebrannte Masse mit dem spezifischen Gewichte 0,3 bis 0,35 bilden und nach Maßgabe der Figur. 28 und 29 auf die Rohrwand aufgebracht waren. Zunächst wurden schmale Bänder von Kieselgur-Asbestmasse auf das Rohr aufgestrichen, so daß zwischen Schale und Rohr entsprechende Luftschichten von etwa 5 mm Stärke entstanden. Die Fugen zwischen den Schalen wurden mit der gleichen Masse gedichtet. Nach Aufbringen der Schalen und Glätten der Oberfläche wurde das

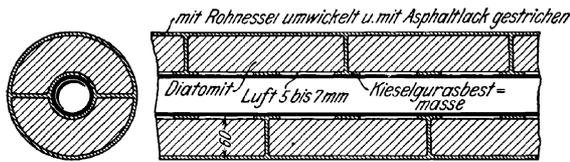


Fig. 28 und 29. Umhüllung der Rohrleitung.

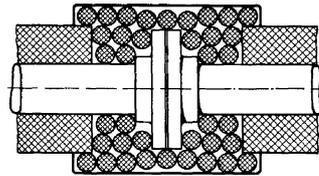


Fig. 30. Flanschumhüllung.

Ganze mit Rohnessel umwickelt und zweimal mit Asphaltlack gestrichen. Die zur Isolierung benutzten Schalen waren 50 mm stark, so daß sich eine Gesamtstärke der Umhüllung von rd. 60 mm ergab. Zur Flanschisolierung benutzte man Asbestschläuche, die mit Kieselgur-Asbestmasse gefüllt waren. Diese wurden um die Flansche gewickelt und mit einem Blechmantel umgeben, der ebenfalls mit Asphaltlack gestrichen wurde. Die Stärke der Flanschumhüllung ist aus Fig. 30 zu erkennen. Mit dieser Isolierung wurden Versuche an der 70- und der 150 mm-Leitung durchgeführt.

Isolierungen II und III. Diese Isolierungen wurden in der gleichen Weise und in der gleichen Stärke aus gebrannten Schalen wie die Isolierung I hergestellt; jedoch waren die Schalen anderer Herkunft, also voraussichtlich etwas anders zusammengesetzt und anders gebrannt; ihr spezifisches Gewicht war größer als das der Isolierung I.

Isolierung IV. Diese Isolierung war eine sogenannte patentierte Masse, ein Gemisch von verschiedenen unorganischen und organischen Stoffen, das zu einem Brei angerührt und in einer Stärke von 20 mm auf die Leitung aufgetragen wurde. Da nicht genügend Masse geliefert werden konnte, mußte die Versuchsschleife durch Herausnehmen je eines Rohres aus dem unteren und oberen Rohrstrang um etwa 12 m verkürzt werden. Die Flansche waren in der gleichen Weise umhüllt wie bei der Isolierung I.

Isolierung V. Auf die Rohrleitung wurde zunächst eine 10 mm starke Schicht Asbestmasse und darüber eine 15 mm starke Schicht Kieselgurmasse aufgetragen. Auf diesen Unterstrich brachte man eine 15 mm starke Lage von Seidenpolster. Dieses wurde dann mit Wellpappe und Nessel umkleidet, so daß die ganze Umhüllung ungefähr 45 mm stark war. Bei den Versuchen mit Flanschumhüllung wurden mit Schlackenwolle gefüllte Asbestkissen um die Flansche gewickelt.

Zahlentafel 11. Versuche mit ruhendem gesättigtem Dampf.  
Niederschlagwasser und Wärmeverlust für die glatte abgeflanschte Leitung *bc* von 70 mm  
und 150 mm l. W. mit Isolierung I.

1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		13		14																																
Versuchsleitung		Länge		Weite		Zahl der Flansche		abs. Dampfspannung		Dampf-temperatur		mittlere Lufttemperatur		Temperaturgefälle zwischen Dampf und Luft		Temperatur der Umhüllung		Niederschlagwasser für 1 m Leitung in 1 st		Wärmeverlust für 1 m Leitung		Wärmeverlust in 1 st für 1 qm Leitung abzüglich Flüssigkeitswärme		Wärmeverlust in 1 st für 1 qm Leitung abzüglich Flüssigkeitswärme		Wärmeverlust in 1 st für 1 qm Leitung und 1 °C Temperaturgefälle																																
m	mm	mm	mm	kg/qcm	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	kg	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE																															
nackte Leitung																																																										
Leitung <i>bc</i>		26,6		6		3,17	134,7	16,1	118,6	—	—	—	—	0,770	499	394,1	1556	13,1	499	393,8	1555	13,1	494	389,9	1540	13,1	679	509,4	2011	14,1	659	517,3	2043	14,1	683	512,2	2023	14,5	901	638,0	2520	15,2	933	660,2	2608	15,4												
Schleife		70		6		3,13	134,2	15,3	118,9	—	—	—	—	0,769	499	393,8	1555	13,1	494	389,9	1540	13,1	679	509,4	2011	14,1	659	517,3	2043	14,1	683	512,2	2023	14,5	901	638,0	2520	15,2	933	660,2	2608	15,4																
Isolierung I, Flansche frei																																																										
Leitung <i>bc</i>		26,6		6		3,16	134,5	16,6	117,9	—	—	—	—	0,761	494	389,9	1540	13,1	1,034	679	509,4	2011	14,1	1,051	659	517,3	2043	14,1	1,039	683	512,2	2023	14,5	1,353	901	638,0	2520	15,2	1,401	660,2	2608	15,4																
Schleife		70		6		3,01	132,9	17,4	115,5	67,8	29,9	29,6	66,1	0,184	119	94,1	371,6	3,2	6,66	162,0	81,4	36,0	81,4	36,0	0,232	152	114,1	450,6	3,2	6,71	162,3	81,1	35,8	81,1	35,8	0,238	156	116,9	461,7	3,2	13,04	190,7	23,9	41,9	0,296	198	139,5	551,0	3,3	13,04	190,7	23,2	40,7	0,304	203	143,5	566,7	3,4
Isolierung I, Flansche umhüllt																																																										
Leitung <i>bc</i>		26,6		6		3,07	133,6	11,3	122,3	63,3	23,4	63,3	0,136	88	69,8	275,7	2,8	6,44	160,7	76,3	29,6	76,3	29,6	0,170	112	83,8	331,0	2,8	6,52	161,2	77,5	31,7	77,5	31,7	0,168	110,5	82,6	326,2	2,8	13,10	190,9	21,7	40,1	0,205	137	96,6	381,5	2,3	13,10	190,9	21,7	40,1	0,211	141	99,5	393,0	2,3	
Schleife		70		6		12,97	190,5	18,1	172,4	89,4	36,4	89,4	0,212	142	99,8	394,2	2,3	12,97	190,5	18,1	172,4	89,4	36,4	0,212	142	99,8	394,2	2,3	12,97	190,5	18,1	172,4	89,4	36,4	0,212	142	99,8	394,2	2,3																			

Zahlentafel 11 (Schluß).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Länge m	Versuchsleitung		abs. Dampf- spannung kg/qem	Dampf- tempe- ratur °C	mittlere Luft- tempe- ratur °C	Tempe- ratur- gefälle zwischen Dampf und Luft °C	Temperatur der Umhüllung		Nieder- schlag- wasser für 1 m Leitung in 1 st kg	Wärmeverlust in 1 st für 1 m Leitung		Wärme- verlust in 1 st für 1 qm Leitung und 1°C Tempe- ratur- gefälle K WE	
	lichte Weite mm	Zahl der Flansche					Mitte °C	außen °C		Wärmeverlust für 1 qm Leitung abzüglich Flüssig- keits- wärme WE	Wärme- verlust in 1 st für 1 qm Leitung abzüglich Flüssig- keits- wärme WE		
nackte Leitung													
Isolierung I, Flansche frei													
Isolierung I, Flansche umhüllt													
26,0	Leitung b c		3,25	135,5	22,5	113,0	—	—	1,542	1000	789	1474	13,1
	Schleife		3,33	136,3	25,7	110,6	—	—	1,501	974	766	1432	13,0
	150	6	6,75	162,6	31,7	130,9	—	—	2,038	1333	997	1863	14,2
			6,72	162,4	30,2	132,2	—	—	2,054	1349	1011	1889	14,3
			13,07	190,8	30,6	160,2	—	—	2,875	1914	1354	2529	15,8
			13,06	190,8	35,4	155,4	—	—	2,735	1854	1312	2451	15,8
26,0	Leitung b c		3,06	133,5	15,9	117,6	—	31,6	0,362	235	185,5	347	3,0
	Schleife		3,08	133,7	16,0	117,7	44,5	31,4	0,367	238	188,2	352	3,0
	150	6	6,65	162,0	17,6	144,4	52,6	37,0	0,507	333	249,5	466	3,2
			6,66	162,0	16,9	145,1	—	37,2	0,513	337	252,5	472	3,2
			13,00	190,6	19,7	170,9	64,5	43,6	0,638	439	310,3	580	3,3
			13,03	190,7	18,9	171,8	—	41,0	0,636	448	313,7	586	3,4
26,0	Leitung b c		3,24	135,4	15,4	120,0	46,5	30,5	0,232	150	118,8	222	1,9
	Schleife		3,21	135,1	14,8	120,3	46,5	30,2	0,238	154	121,9	228	1,9
	150	6	6,56	161,4	16,3	145,1	56,2	35,7	0,304	200	150,0	280	1,9
			6,61	161,7	16,4	145,3	56,4	36,2	0,305	200	150,3	281	1,9
			12,96	190,4	18,2	172,2	68,4	41,2	0,395	263	186,0	347	2,0
			13,02	190,6	18,4	172,2	67,7	40,6	0,392	261	184,6	345	2,0



Zahlentafel 13. Versuche mit ruhendem gesättigtem Dampf.  
Niederschlagwasser und Wärmeverlust für die glatte abgeflanschte Leitung *b c* von 70 mm l. W.  
mit Isolierung II, III und V.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Länge	lichte Weite	Versuchsleitung		abs. Dampfspannung	Dampf-temperatur	mittlere Lufttemperatur	Temperatur der Umhüllung		Niederschlagwasser für 1 m Leitung in 1 st	Wärmeverlust in 1 st für 1 m Leitung		Wärmeverlust in 1 st für 1 qm Leitung abzüglich Flüssigkeitswärme	Wärmeverlust in 1 st für 1 qm Leitung abzüglich Flüssigkeitswärme
		Zahl der Flansche	kg/qem				°C	°C		°C	°C		
m	mm			°C	°C	°C	Mitte	außen	kg	WE	WE	WE	WE
nackte Leitung													
26,6	70		3,16	134,5	16,6	117,9	—	—	0,761	494	389,9	1540	13,1
			6,52	161,2	21,3	139,9	—	—	1,039	683	512,2	2023	14,5
		6	12,94	190,4	24,5	165,6	—	—	1,353	901	638,0	2520	15,2
Isolierung II, Flansche frei													
26,6	70		3,15	134,5	14,7	119,8	34	32	0,326	146	115,6	456,6	3,8
			6,50	161,1	16,1	145,0	39	38	0,290	190	142,9	564,4	3,9
		6	13,05	190,7	18,0	172,7	47	42	0,397	265	187,3	739,7	4,3
Isolierung III, Flansche frei													
26,6	70		3,20	135,0	17,5	117,5	36	32	0,205	132,5	104,5	412,6	3,5
			6,48	161,0	19,5	141,5	43	37	0,285	187	140,6	555,3	3,9
			6,44	160,7	19,6	141,1	45	37	0,286	188	140,7	553,7	3,9
		6	13,10	190,9	23,0	167,9	54	47	0,357	238	168,1	663,9	4,0
Isolierung III, Flansche umhüllt													
26,6	70		3,17	134,7	24,0	110,7	45	41	0,148	96	65,7	259,5	2,3
			6,50	161,0	21,8	113,2	41	36	0,148	96	65,7	259,5	2,3
			6,53	161,3	23,9	137,4	51	43	0,195	128	96,3	380,3	2,8
		6	13,13	191,0	24,0	167,0	57	46	0,247	165	116,2	458,9	2,8
Isolierung V, Flansche frei													
26,6	70		3,21	135,1	23,8	111,3	71	40	0,155	101	79,4	313,6	2,8
			6,60	161,7	23,2	138,5	81	42	0,191	126	94,1	371,6	2,7
		6	13,15	191,1	21,2	169,9	88	52	0,254	170	119,8	473,3	2,8
Isolierung V, Flansche umhüllt													
26,6	70		3,29	136,0	24,6	111,4	72	41	0,104	68	53,4	210,9	1,9
			6,63	161,9	23,6	138,3	81	43	0,133	88	65,2	257,5	1,9
		6	13,10	190,9	21,5	169,4	88	42	0,171	115	80,9	319,5	1,9

Zahlentafel 14. Wärmeersparnis durch die Isolierung I bei 70 und 150 mm l. W. der Leitung.  
Abhängigkeit der Ersparnis vom Temperaturgefälle zwischen Dampf und Luft.

Temperatur- gefälle zwischen Dampf und Luft  °C	2		3		4		5		6		7		8		9		10		11				
	Schleife b c										Schleife b c												
	26,6 m					70 mm l. W.					26,0 m					150 mm l. W.							
	Wärmeverlust für 1 qm Leitung in 1 st										Wärmeverlust für 1 qm Leitung in 1 st												
nackte Leitung		umhüllte Leitung		Flansche frei		Flansche umhüllt		Flansche frei		Flansche umhüllt		nackte Leitung		umhüllte Leitung		Flansche frei		Flansche umhüllt		Wärmeersparnis			
WE	VH	WE	VH	WE	VH	WE	VH	WE	VH	WE	VH	WE	VH	WE	VH	WE	VH	WE	VH	WE	VH		
100	1212	300	212	300	212	75,3	82,5	1249	284	180	77,3	85,6	1425	322	201	77,4	85,9	1610	360	222	77,6	86,2	
110	1386	339	237	339	237	75,6	82,9	1425	322	201	77,4	85,9	1610	360	222	77,6	86,2	1815	400	245	78,0	86,5	
120	1567	377	262	377	262	75,9	83,3	1610	360	222	77,6	86,2	1815	400	245	78,0	86,5	2035	441	268	78,3	86,8	
130	1755	411	288	411	288	76,5	83,6	1815	400	245	78,0	86,5	2035	441	268	78,3	86,8	2275	482	290	78,8	87,2	
140	1947	450	312	450	312	76,9	84,0	2035	441	268	78,3	86,8	2275	482	290	78,8	87,2	2545	530	313	79,2	87,7	
150	2157	489	338	489	338	77,3	84,3	2275	482	290	79,2	87,7	2545	530	313	79,2	87,7	2815	575	336	79,6	88,1	
160	2375	529	366	529	366	77,7	84,6	2545	530	313	79,6	88,1	2815	575	336	79,6	88,1	3125	623	360	80,1	88,5	
170	2626	569	391	569	391	78,3	85,1	2815	575	336	80,1	88,5	3125	623	360	80,1	88,5	3470	674	386	80,6	88,9	
180	2893	609	420	609	420	78,9	85,5	3125	623	360	80,6	88,9	3470	674	386	80,6	88,9	3850	723	416	81,2	89,2	
190	3193	651	450	651	450	79,6	85,9	3470	674	386	81,2	89,2	3850	723	416	81,2	89,2						
200	3523	699	481	699	481	80,2	86,3	3850	723	416	81,2	89,2											

Zahlentafel 15. Wärmeersparnis durch die Isolierung IV bei 70 mm l. W. der verkürzten Leitung.  
Abhängigkeit der Ersparnis vom Temperaturgefälle zwischen Dampf und Luft.

Temperatur- gefälle zwischen Dampf und Luft  °C	2		3		4		5		6						
	verkürzte Schleife b c														
	14,8 m					70 mm l. W.									
	Wärmeverlust für 1 qm Leitung in 1 st														
nackte Leitung		umhüllte Leitung		Flansche frei		Flansche umhüllt		nackte Leitung		umhüllte Leitung		Flansche frei		Flansche umhüllt	
WE	VH	WE	VH	WE	VH	WE	VH	WE	VH	WE	VH	WE	VH	WE	VH
100	1305	750	612	750	612	42,5	53,1	612	42,5	42,5	53,1	42,5	53,1	42,5	53,1
110	1475	831	680	831	680	43,5	53,8	680	43,5	43,5	53,8	43,5	53,8	43,5	53,8
120	1650	915	747	915	747	44,5	54,8	747	44,5	44,5	54,8	44,5	54,8	44,5	54,8
130	1842	995	815	995	815	46,0	55,7	815	46,0	46,0	55,7	46,0	55,7	46,0	55,7
140	2045	1085	885	1085	885	47,0	56,8	885	47,0	47,0	56,8	47,0	56,8	47,0	56,8
150	2260	1170	955	1170	955	48,5	57,7	955	48,5	48,5	57,7	48,5	57,7	48,5	57,7
160	2500	1260	1028	1260	1028	49,6	58,8	1028	49,6	49,6	58,8	49,6	58,8	49,6	58,8
170	2765	1355	1091	1355	1091	51,0	60,4	1091	51,0	51,0	60,4	51,0	60,4	51,0	60,4
180	3050	1450	1172	1450	1172	52,4	61,5	1172	52,4	52,4	61,5	52,4	61,5	52,4	61,5
190	3360	1550	1238	1550	1238	53,8	63,2	1238	53,8	53,8	63,2	53,8	63,2	53,8	63,2
200	3785	1650	1305	1650	1305	55,8	65,0	1305	55,8	55,8	65,0	55,8	65,0	55,8	65,0

Zahlentafel 16. Wärmersparnis durch die Isolierungen II, III und V bei 70 mm l. W. der Leitung.  
 Abhängigkeit der Ersparnis vom Temperaturgefälle zwischen Dampf und Luft.

1	2	3				4				5				6				7				8				9				10				11				12			
		Wärme- verlust in 1 st für 1 qm nackte Leitung		Wärme- ersparnis		Wärme- verlust für 1 qm Leitung		Wärme- ersparnis		Wärme- verlust für 1 qm Leitung in 1 st		Wärme- ersparnis		Wärme- verlust für 1 qm Leitung in 1 st		Wärme- ersparnis		Wärme- verlust für 1 qm Leitung in 1 st		Wärme- ersparnis		Wärme- verlust für 1 qm Leitung in 1 st		Wärme- ersparnis		Wärme- verlust für 1 qm Leitung in 1 st		Wärme- ersparnis		Wärme- verlust für 1 qm Leitung in 1 st		Wärme- ersparnis		Wärme- verlust für 1 qm Leitung in 1 st		Wärme- ersparnis					
Temperatur- gefälle zwischen Dampf und Luft  °C	WE		vH		Flansche frei		vH		Flansche umhüllt		WE		vH		Flansche frei		vH		Flansche umhüllt		WE		vH		Flansche frei		vH		Flansche umhüllt		WE		vH		Flansche frei		vH				
	100	1212	355	70,7	337	233	72,2	80,8	267	175	78,0	85,6	298	78,5	85,9	329	79,0	86,2	358	79,6	86,5	387	80,1	86,8	418	80,6	87,1	450	81,1	87,4	482	81,7	87,9	519	82,1	88,2	555	82,6	88,6		
110	1386	401	71,0	385	266	72,3	80,8	298	195	78,5	85,9	329	79,0	86,2	358	79,6	86,5	387	80,1	86,8	418	80,6	87,1	450	81,1	87,4	482	81,7	87,9	519	82,1	88,2	555	82,6	88,6						
120	1567	449	71,3	480	299	72,6	80,9	331	236	79,6	86,5	358	79,6	86,5	387	80,1	86,8	418	80,6	87,1	450	81,1	87,4	482	81,7	87,9	519	82,1	88,2	555	82,6	88,6									
130	1755	499	71,6	478	331	72,8	81,0	331	236	79,6	86,5	358	79,6	86,5	387	80,1	86,8	418	80,6	87,1	450	81,1	87,4	482	81,7	87,9	519	82,1	88,2	555	82,6	88,6									
140	1947	548	71,8	522	368	73,2	81,1	368	256	80,1	86,8	418	80,6	87,1	450	81,1	87,4	482	81,7	87,9	519	82,1	88,2	555	82,6	88,6															
150	2157	599	72,2	577	403	73,3	81,3	403	278	80,6	87,1	450	81,1	87,4	482	81,7	87,9	519	82,1	88,2	555	82,6	88,6																		
160	2375	653	72,5	630	442	73,5	81,4	442	300	81,1	87,4	482	81,7	87,9	519	82,1	88,2	555	82,6	88,6																					
170	2626	711	72,9	682	482	74,0	81,7	482	325	81,6	87,6	519	82,1	88,2	555	82,6	88,6																								
180	2893	770	73,4	740	521	74,4	82,0	521	350	82,1	88,2																														
190	3193	830	74,0	798	565	75,0	82,3	565	375	82,6	88,6																														
200	3523	890	74,7	856	606	75,7	82,8	606	400	83,2	89,2																														

2) Wärmeersparnis durch die Rohr- und Flanschumhüllung.

Die Ergebnisse der Untersuchungen mit den verschiedenen Isoliermitteln sind in den Zahlentafeln 11 bis 13 zusammengestellt, und zwar sind in diesen Tafeln nicht nur alle wesentlichen Messungsergebnisse aufgenommen, sondern die Spalten 11 bis 14 enthalten bereits einzelne für die Weiterbenutzung der Ergebnisse notwendigen Einheitszahlen. Zahlentafel 11 bringt die mit der Isolierung I an den Rohrleitungsschleifen von 70 und 150 mm Dmr. festgestellten Werte; in Zahlentafel 12 findet man die Ergebnisse der mit Isolierung IV an der verkürzten Schleife vorgenommenen Versuche, und schließlich sind Zahlentafel 13 die mit den Isolierungen II, III und V gefundenen Zahlen zu entnehmen. In den Zahlentafeln 14 bis 15 sind die durch zeichnerische Interpolation aus den Versuchsergebnissen ermittelten Wärmeersparnisziffern für das Temperaturgefälle von 100 bis 200°C zusammengestellt.

Den Zahlentafeln 14 bis 16 entnehmen wir zunächst Angaben über die mit den verschiedenen Isolierungen erreichten Wärmeersparnisse. Ohne Flanschumhüllung bringen die einzelnen Isolierungen für die Temperaturgefälle von 100 bis 200° C folgende Wärmeersparnisse:

	70 mm-Leitung vH	150 mm-Leitung vH
Isolierung I . . . . .	75,3 bis 80,2	77,3 bis 81,2
» II . . . . .	70,7 » 74,7	—
» III . . . . .	72,2 » 75,7	—
» IV . . . . .	42,5 » 55,8	—
» V . . . . .	78,0 » 83,2	—

Ganz übereinstimmend wächst bei allen Isoliermitteln die Wärmeersparnis ganz erheblich mit dem Temperaturgefälle; außerdem lassen die vergleichenden Versuche mit der Isolierung I an der Leitung von 70 und 150 mm l. W. erkennen, daß die Wärmeersparnis bei gleicher Isolierung auch mit dem Durchmesser wächst. Die drei Isolierungen I, II und III waren in genau gleicher Weise und Stärke auf die Leitung aufgebracht, die Unterschiede in den Wärmeersparniszahlen sind lediglich durch die Verschiedenheiten im Leitvermögen der drei Isoliermittel verursacht. Die wesentlich schlechtere Wirksamkeit der Isolierung IV ist zum Teil durch das gegenüber allen übrigen Mitteln erheblich größere Wärmeleitvermögen, insbesondere aber durch die geringere Stärke der Isolierung von nur 20 mm verursacht. Mit Flanschumhüllung ergaben sich folgende Werte:

	70 mm-Leitung vH	150 mm-Leitung vH
Isolierung I . . . . .	82,5 bis 86,3	85,6 bis 89,2
» II . . . . .	—	—
» III . . . . .	80,8 bis 82,8	—
» IV . . . . .	53,1 » 65,0	—
» V . . . . .	85,6 » 88,6	—

Der Einfluß der Flanschumhüllung auf die Wärmeersparnis ist aus dem Vergleich beider Zusammenstellungen leicht zu erkennen. Insbesondere beweisen diese auch folgendes: Schaltet man die Isolierungen II und IV aus — erstere, da ein Versuch mit Flanschumhüllung nicht durchgeführt wurde, letztere, da sie als außergewöhnlich zu bezeichnen ist —, so bewegt sich die Wärmeersparnis mit den Isolierungen I, III und V für z. B. 150° Temperaturgefälle

ohne Flanschumhüllung zwischen 73,3 und 80,6 vH  
mit » » 81,3 » 87,1 » .

Der Einfluß der Flanschumhüllung auf die Wärmeersparnis ergibt sich sonach für diese Versuche größer als der Einfluß des Isoliermittels.

Da die untersuchten Isolierungen sowohl hinsichtlich Wahl der Isoliermittel als auch in der Ausführung den für Dampfleitungen üblichen Isolierungen entsprechen, kann dieses Ergebnis verallgemeinert werden. Der Flanschumhüllung wird somit bei Dampfleitungen eine viel größere Bedeutung beizulegen sein, als dies bisher in der Praxis geschah.

### 3) Einfluß der Dampftemperatur auf die Wärmeersparnis.

Schon im letzten Abschnitt habe ich auf den Einfluß des Temperaturgefälles auf die Wärmeersparnis hingewiesen. Da die Versuche alle bei wenig verschiedener Lufttemperatur stattfanden, ändert sich das Temperaturgefälle mit der Dampftemperatur; aus diesem Grund ergeben sich zufällig für beide ganz ähnliche Gesetzmäßigkeiten. Da der Wärmeverlust mit der Dampftemperatur wächst, muß auch die Wärmeersparnis zunehmen; es sind deshalb in den Zahlentafeln 17 bis 19 die auf die Leitungsoberfläche (äußere Rohrfläche) berechneten Werte  $K$  sowie die Wärmeersparniszahlen in Abhängigkeit von der Dampftemperatur zusammengestellt. In diesen Zusammenstellungen sind auch die Werte  $K$  für die nackten Leitungen nochmals aufgenommen, so daß man nun ohne weiteres die Ursache der wachsenden Wärmeersparnis mit dem Temperaturgefälle erkennt. Infolge des großen Strahlungsanteiles an dem Wärmeübergang von der Leitung an die umgebende Luft wächst  $K$  für die nackte Leitung mit der Dampftemperatur ganz bedeutend, während dies für die umhüllte Leitung nicht mehr in dem Maße der Fall ist. Wohl sehen wir bei allen Isolierungen ohne Flanschumhüllung  $K$  noch mit der Dampftemperatur wachsen; dieses Anwachsen ist zum wesentlichsten Teil durch die Wärmeausstrahlung der Flansche bedingt. Mit Flanschumhüllung ist  $K$  für die Isolierungen I, IV und V für das ganze Temperaturgefälle nahezu gleich. Nur bei der Isolierung III wächst  $K$  mit der Dampftemperatur an; das ist aber, wie spätere Untersuchungen zeigen werden, die Folge der bedeutenden Steigerung des Wärmeleitvermögens  $\lambda$  dieser Isolierung mit der Temperatur.

Für die Leitung von 70 mm Dmr. ergaben sich bei Rohr- und Flanschisolierung folgende Werte  $K$ , bezogen auf die Außenfläche der nackten Rohrleitung:

100 bis 200° C Dampftemperatur	
Isolierung I . . . . .	$K = 2,30$ bis $2,30$
» III . . . . .	$K = 2,28$ » $2,93$
» IV . . . . .	$K = 6,45$ » $6,45$
» V . . . . .	$K = 1,90$ » $1,90$

Die in diesen Zahlen zum Ausdruck kommende Gleichheit des Wertes  $K$  für vollkommen umhüllte Leitungen für das ganze Temperaturgefälle von 100 bis 200° C wird für Annäherungsberechnungen ein wertvolles Hilfsmittel sein können.

Mit Rücksicht auf ihre allgemeinere Bedeutung sind diese Werte auch in Fig. 31 bis 33 dargestellt, und zwar die Werte von  $K$  und die Wärmeersparniszahlen. Damit auch die Figuren die Ursache des Anwachsens der Wärmeersparnis mit der Dampftemperatur sofort erkennen lassen, ist  $K$  für die nackte und für die umhüllte Leitung eingezeichnet.

**Zahlentafel 17. Isolierung I.**  
**Wärmeübergangsziffer  $K$  und Wärmersparnis in Abhängigkeit**  
**von der Dampftemperatur.**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Dampftemperatur °C	Schleife $b c$ 26,6 m 70 mm l. W.					Schleife $b c$ 26,0 m 150 mm l. W.				
	Gesamtübergangsziffer $K$			Wärmersparnis		Gesamtübergangsziffer $K$			Wärmersparnis	
	nacktes Rohr	umhüllte Leitung		Flansche frei	Flansche umhüllt	nackte Leitung	umhüllte Leitung		Flansche frei	Flansche umhüllt
		Flansche frei	Flansche umhüllt				Flansche frei	Flansche umhüllt		
			vH	vH				vH	vH	
100	11,78	3,07	2,3	74,0	80,4	11,40	2,79	1,87	75,6	83,6
110	12,18	3,10	2,3	74,6	81,1	11,88	2,86	1,88	75,9	84,2
120	12,58	3,13	2,3	75,1	81,7	12,36	2,93	1,89	76,3	84,7
130	12,96	3,16	2,3	75,6	82,3	12,84	3,00	1,90	76,6	85,3
140	13,39	3,20	2,3	76,2	82,8	13,32	3,07	1,91	76,9	85,7
150	13,79	3,23	2,3	76,6	83,4	13,80	3,13	1,92	77,3	86,1
160	14,19	3,26	2,3	77,1	83,8	14,28	3,20	1,93	77,6	86,5
170	14,59	3,29	2,3	77,5	84,2	14,76	3,27	1,94	77,9	86,9
180	15,00	3,32	2,3	77,9	84,6	15,24	3,33	1,95	78,2	87,2
190	15,40	3,36	2,3	78,2	85,0	15,72	3,40	1,96	78,4	87,5
200	15,80	3,39	2,3	78,6	85,4	16,20	3,47	1,97	78,6	87,9

**Zahlentafel 18. Isolierungen II, III und V.**  
**Wärmeübergangsziffer  $K$  und Wärmersparnis in Abhängigkeit**  
**von der Dampftemperatur.**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Dampftemperatur °C	Schleife $b c$ 70 mm l. W. 26,6 m Länge										
	Isolierung II			Isolierung III				Isolierung V			
	Gesamtübergangsziffer $K$		Wärmersparnis	Gesamtübergangsziffer $K$		Wärmersparnis		Gesamtübergangsziffer $K$		Wärmersparnis	
	nackte Leitung	Flansche frei	Flansche frei vH	Flansche frei	Flansche umhüllt	Flansche frei vH	Flansche umhüllt vH	Flansche frei	Flansche umhüllt	Flansche frei vH	Flansche umhüllt vH
100	11,78	3,44	70,8	3,27	2,28	72,2	80,6	2,75	1,9	76,6	83,9
110	12,18	3,53	71,0	3,36	2,34	72,4	80,8	2,75	1,9	77,4	84,4
120	12,58	3,62	71,2	3,45	2,41	72,6	80,9	2,75	1,9	78,1	84,9
130	12,99	3,71	71,4	3,54	2,47	72,7	81,0	2,75	1,9	78,8	85,4
140	13,39	3,80	71,6	3,63	2,54	72,9	81,0	2,75	1,9	79,4	85,8
150	13,79	3,89	71,8	3,72	2,60	73,0	81,1	2,75	1,9	80,0	86,2
160	14,19	3,97	72,0	3,81	2,67	73,1	81,2	2,75	1,9	80,6	86,6
170	14,59	4,06	72,2	3,90	2,73	73,3	81,3	2,75	1,9	81,2	87,0
180	15,00	4,15	72,3	3,99	2,80	73,4	81,3	2,75	1,9	81,7	87,3
190	15,40	4,24	72,4	4,08	2,87	73,5	81,3	2,75	1,9	82,1	87,7
200	15,80	4,33	72,6	4,17	2,93	73,6	81,4	2,75	1,9	82,6	88,0

Zahlentafel 19. Isolierung IV.

Wärmeübergangsziffer  $K$  und Wärmeersparnis in Abhängigkeit von der Dampftemperatur.

1	2	3	4	5	6
	verkürzte Schleife $b c$		14,8 m	70 mm l. W.	
Dampf- temperatur	Gesamtübergangsziffer $K$			Wärmeersparnis	
	nackte Leitung	umhüllte Leitung		Flansche frei	Flansche umhüllt
		Flansche frei	Flansche umhüllt		
°C					
100	12,20	7,71	6,45	36,6	47,9
110	12,65	7,72	6,45	38,8	49,0
120	13,10	7,74	6,45	40,6	50,8
130	13,56	7,75	6,45	42,6	52,4
140	14,01	7,76	6,45	44,5	54,1
150	14,46	7,78	6,45	46,1	55,4
160	14,91	7,79	6,45	47,7	56,6
170	15,36	7,80	6,45	49,3	58,0
180	15,82	7,81	6,45	50,5	59,2
190	16,27	7,83	6,45	51,9	60,3
200	16,72	7,84	6,45	53,2	61,4

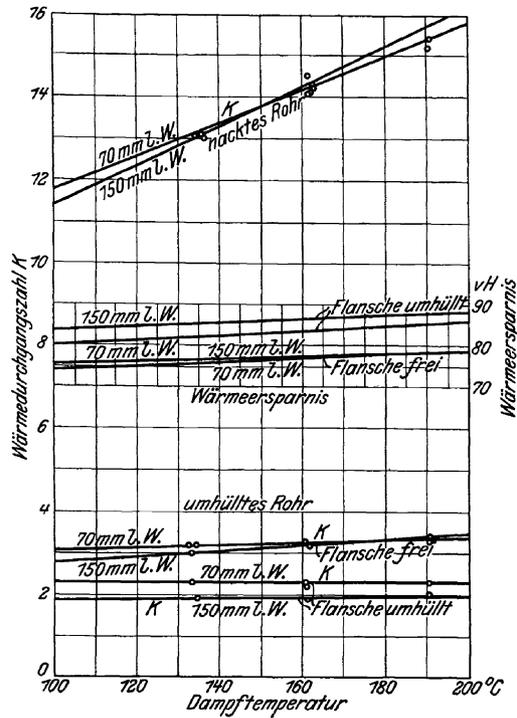


Fig. 31.

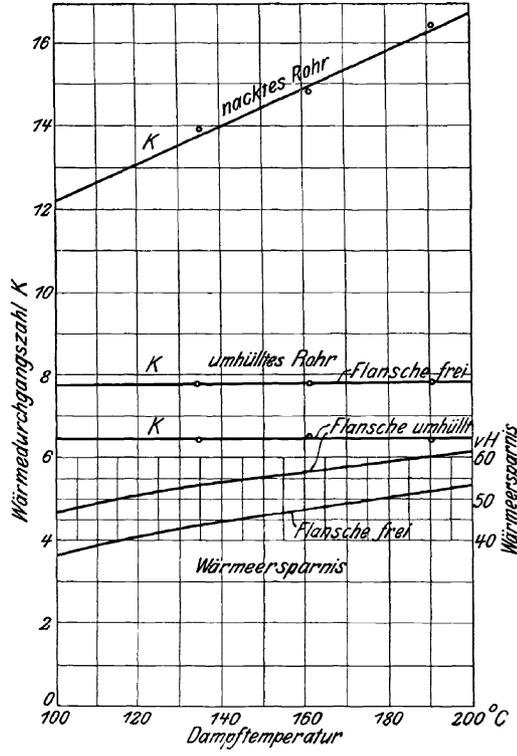


Fig. 32.

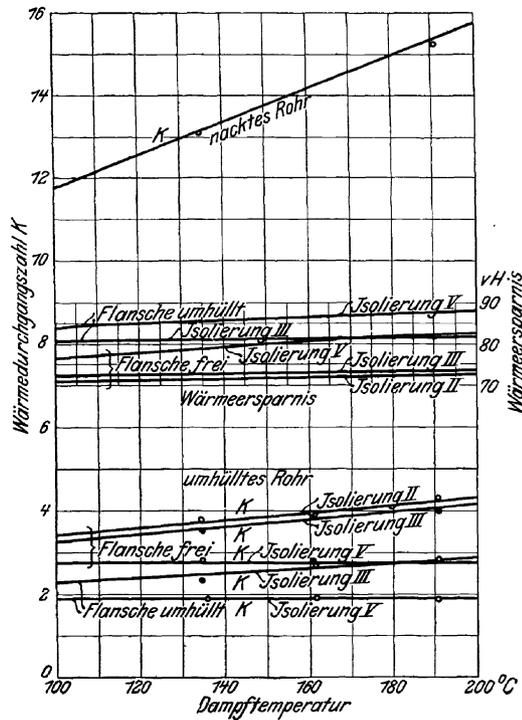


Fig. 33.

4) Einfluß des Leitungsdurchmessers auf die Wärmeersparnis.

Wie Zahlentafel 17 zeigt, ist die mit der annähernd gleichen<sup>1)</sup> Isolierung I bei den beiden Leitungen von 70 und 150 mm festgestellte Wärmeersparnis verschieden. Die Versuche mit nackten Flanschen ergaben bei 100° Dampftemperatur 74,0 und 75,6 vH Ersparnis; die Versuche mit umhüllten Flanschen lieferten bei 100° C Dampftemperatur die Ersparnisziffern 80,4 und 83,6 vH.

Die Wärmeersparnis wächst demnach mit dem Durchmesser der Rohrleitung.

Bezeichnet

- $Q_n$  den Wärmeverlust des nackten Rohres für 1 m Länge in der Stunde,
- $Q_u$  den Wärmeverlust des umhüllten Rohres für 1 m Länge in der Stunde,
- $r$  den äußeren Halbmesser einer Rohrleitung,
- $\delta$  die Stärke der Umhüllung,
- $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit der Umhüllung,
- $K'$  die Ziffer des Wärmeüberganges von der Umhüllung an die umgebende Luft,
- $K$  die Ziffer des Wärmeüberganges vom Dampf durch die nackte Rohrleitung an die Luft,
- $t_a$  die Dampftemperatur,
- $t_w$  die Temperatur der Rohrwand,
- $t_l$  die Temperatur der Luft,

so ist

$$Q_n = K 2 r \pi (t_a - t_l),$$

$$Q_u = \frac{2 \pi (t_w - t_l)}{\frac{1}{(r + \delta) K'} + \frac{\ln \frac{r}{r - \delta}}{\lambda}}.$$

Der Wirkungsgrad der Umhüllung ist sonach

$$\eta = 1 - \frac{t_w - t_l}{K r (t_a - t_l) \left\{ \frac{1}{(r + \delta) K'} + \frac{\ln \frac{r}{r - \delta}}{\lambda} \right\}} = 1 - \frac{t_w - t_l}{K (t_a - t_l) \left\{ \frac{1}{\left(1 + \frac{\delta}{r}\right) K'} + \frac{r}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{\delta}{r}\right) \right\}}.$$

Es soll nun unter Benutzung der aus den Versuchen gewonnenen Werte für die Isolierung I und die Leitungsdurchmesser von 70 und 150 mm der Wirkungsgrad  $\eta$  der Umhüllung berechnet werden.

Für die 70 mm-Leitung mit 76 mm äußerem Durchmesser und 100° Temperaturefälle ist ermittelt worden:

$$\begin{aligned} t_l &= 20^\circ \text{ C} \\ t_a &= 120^\circ \text{ »} \\ t_w &= 119^\circ \text{ »} \end{aligned}$$

(Nach den Versuchen kann der Temperaturverlust durch die Rohrleitung in diesem Temperaturegebiet zu 1° angenommen werden.)

---

<sup>1)</sup> Die Isolierung I ist für die beiden Leitungen von 70 und 150 mm von der gleichen Firma und mit der Bedingung, daß die gleiche Masse geliefert wurde, bezogen worden. Da aber zwischen beiden Lieferungen ein Zeitraum von 2 Jahren liegt, ist es nicht ausgeschlossen, daß auch die Masse etwas verschieden gewesen ist. Die Ergebnisse der Versuche lassen darauf schließen.

Weiter ist:

$$r + \delta = 38 + 60 = 98 \text{ mm};$$

$K' = 6$ ; dieser Wert wird später noch behandelt;

$$\lambda = 0,085 \text{ (Zahlentafel 20 S. 43);}$$

$$K = 12,5 \text{ (Zahlentafel 17 S. 37).}$$

Daraus folgt:

$$\eta = 0,837.$$

Für den lichten Rohrdurchmesser 150 mm, entsprechend 160 mm äußerem Durchmesser, und ebenfalls 60 mm Isolierstärke folgt:

$$\eta = 0,872.$$

Nach den vorstehenden Berechnungen würde sich der Wirkungsgrad der Umhüllung bei Wahl gleicher Isoliermittel von gleicher Stärke bei Uebergang von 70 mm Rohrweite auf 150 mm von  $\eta = 0,837$  in  $\eta = 0,872$  ändern. Diese Steigerung stimmt mit den durch die Versuche wirklich festgestellten Werten ganz befriedigend überein.

Der Wirkungsgrad der Umhüllung wächst sonach mit dem Durchmesser der Rohrleitung nach Maßgabe der vorstehenden, aus den geometrischen Beziehungen abgeleiteten Gleichung.

Auf Grund dieser Gesetzmäßigkeit ändert sich für eine weitere Steigerung des lichten Rohrdurchmessers auf 300 mm, entsprechend 310 mm äußerem Durchmesser, bei 60 mm Stärke der Umhüllung der Wirkungsgrad in

$$\eta = 0,889.$$

Weitere Steigerungen des Durchmessers über 150 mm bedingen somit nur noch eine geringe Zunahme des Wirkungsgrades der Umhüllung.

Umgekehrt würde eine Verringerung des lichten Rohrdurchmessers auf 45 oder 50 mm äußeren Durchmesser eine Verminderung von  $\eta$  auf

$$\eta = 0,806$$

zur Folge haben.

Für die gleiche Isolierung würde sich somit deren Wirkungsgrad von 45 bis 300 mm Rohrdurchmesser zwischen 80,6 und 88,9 vH ändern; von dieser Gesamtänderung treffen

$$\frac{87,2 - 80,6}{88,9 - 80,6} \cdot 100$$

= 80 vH auf die Durchmesser von 45 bis 150 mm.

##### 5) Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ der untersuchten Isoliermittel.

Aus den Versuchsergebnissen lassen sich die Wärmeleitfähigkeiten  $\lambda$  der benutzten Isoliermittel in folgender Weise berechnen. Ist

$Q$  die auf 1 qm der Umhüllung übertragene Wärmemenge,

$t_w$  die Temperatur der Rohrwand außen,

$t_u$  die Temperatur an der Oberfläche der Umhüllung,

$d_1$  der Durchmesser der Rohrleitung außen,

$d_2$  der Durchmesser der Umhüllung außen,

$l$  die Länge der Rohrleitung für 1 qm Umhüllungsoberfläche,

so ergibt sich:

$$\lambda = \frac{Q}{2\pi l} \frac{\ln \left( \frac{d_2}{d_1} \right)}{t_w - t_u};$$

$t_w$  läßt sich aus der Dampftemperatur berechnen, da nach den in Zahlentafel 6 S. 20 enthaltenen Messungsergebnissen die Rohrwandungstemperatur für das ganze

Temperaturgebiet von 100 bis 200° C nur um rd. 1° C unter der Dampftemperatur liegt;  $t_u$ , die Temperatur an der Außenfläche der Umhüllung, wurde bei den Versuchen gemessen; es ist deshalb nur noch  $Q$  für die Einheit der Umhüllungsfläche zu berechnen, um  $\lambda$  ermitteln zu können. Die Berechnung von  $Q$  erfolgt an Hand eines Zahlenbeispiels für die 70 mm-Rohrleitung, Isolierung I und 100° Temperaturgefälle zwischen Dampf und Luft. Der Wärmeverlust für 1 qm Leitungsoberfläche beträgt nach Zahlentafel 14 Spalte 3 (S. 33):

300 WE bei nackten Flanschen  
und 212 » » umhüllten »

Die Wärmeersparnis für 1 qm Leitungsoberfläche durch die Flanschumhüllung berechnet sich somit zu  $300 - 212 = 88$  WE (Zahlentafel 20 Spalte 3). Der Gesamtwärmeverlust durch die Flansche ist bei einem Wirkungsgrad der Umhüllung von 82,5 vH:  $\frac{88}{0,825} = 107$  WE (Zahlentafel 20 Spalte 4). Der Wärmeverlust durch die Leitungsumhüllung ist demnach, auf 1 qm Leitungsoberfläche bezogen,

$$300 - 107 = 193 \text{ WE (Zahlentafel 20 Spalte 5).}$$

Der Gesamtverlust der glatten umhüllten Rohrleitung ohne Flansche ist also, da die Gesamtoberfläche der Rohrleitung 6,375 qm beträgt, gleich  $6,375 \times 193$  WE.

Die Außenoberfläche der Rohrleitungsumhüllung berechnet sich bei 196 mm Dmr. zu 16,21 qm; somit ist der Verlust für 1 qm Umhüllungsfläche

$$Q = 193 \cdot \frac{6,375}{16,21} = 80,3 \text{ WE (Zahlentafel 18 Spalte 6).}$$

Die Länge  $l$  ist für die 70 mm-Leitung bei  $70 + 6 + 120 = 196$  mm äußerem Durchmesser der Umhüllung:

$$l = \frac{1}{0,196 \pi} = 3,32 \text{ m.}$$

Die in dieser Weise berechneten Werte  $\lambda$  sind in die Zahlentafeln 20 bis 22 eingetragen und in Fig. 34 dargestellt.

Für die Isolierung I ergibt sich  $\lambda$  bei der 70 mm-Leitung für das Temperaturgefälle von 100 bis 200° C zu 0,084 bis 0,097; bei der 150 mm-Leitung schwankt  $\lambda$  zwischen 0,088 und 0,103. In beiden Fällen wächst sonach  $\lambda$  mit dem Temperaturgefälle; für die 150 mm-Leitung hat sich der Wert um etwa 5 vH größer ergeben als für die kleinere Leitung. Wie schon bemerkt, liegt zwischen der Lieferung der beiden Isolierungen I für beide Leitungen ein Zeitraum von etwa 2 Jahren, so daß eine diese Änderung von  $\lambda$  bedingende Verschiedenheit des Isoliermittels wohl denkbar erscheint. Die Steigerung des Wertes  $\lambda$  mit der Temperatur ist bei beiden Leitungen fast genau gleich; damit ist nachgewiesen, daß  $\lambda$  für dieses Isoliermittel mit dem Temperaturgefälle wächst. Den höchsten Wert von  $\lambda$  lieferte die Isolierung IV. Zwischen I und IV liegen einander sehr benachbart die Werte für die Isolierungen II und III, die mit dem Temperaturgefälle am stärksten anwachsen.

Bei weitem am günstigsten ergab sich  $\lambda$  für die Isolierung V, die bekanntlich etwa zur Hälfte aus Kieselgur und zur Hälfte aus Seide bestand.

Das Taschenbuch der Hütte gibt in seiner 18. Auflage I. Teil S. 276 die Wärmeleitziffer  $\lambda$  zu 0,05 bis 0,15 an. Tatsächlich füllen schon die wenigen hier untersuchten Stoffe dieses verhältnismäßig weite Gebiet aus.

Für alle untersuchten Isoliermittel wächst  $\lambda$  mit dem Temperaturgefälle.

Diese Tatsache wird in Zukunft bei der Beurteilung von Isoliermitteln mit beachtet werden müssen, insbesondere wenn diese für sehr hohe Dampftemperaturen zu verwenden sind.

Zahlentafel 20. Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  für die Isolierung I.

1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12				
Temperaturgefälle		Schleife b c, 70 mm l. W., 26,6 m Länge																								
zwischen Dampf und Luft	°C	ständige Wärmeersparnis durch die Flanschumhüllung, bezogen auf 1 qm Oberfläche der gesamten nackten Rohrleitung						Wärmeverlust in 1 st						Wärmeleitfähigkeit $\lambda$												
		durch die Flansche, bezogen auf 1 qm Oberfläche der gesamten nackten Rohrleitung		1 qm Oberfläche der gesamten nackten Rohrleitung		1 qm der Umhüllungsoberfläche		durch die Flansche, bezogen auf 1 qm Oberfläche der gesamten nackten Rohrleitung		1 qm Oberfläche der gesamten nackten Rohrleitung		1 qm der Umhüllungsoberfläche		WE		WE		WE		WE		WE				
100	89	88	107	193	80,3	0,084	104	122	162	99,9	0,088	104	122	162	99,9	0,088	104	122	162	99,9	0,088	104	122	162	99,9	0,088
110	98	102	123	216	89,8	0,085	121	141	181	89,8	0,085	121	141	181	111,9	0,0895	121	141	181	111,9	0,0895	121	141	181	111,9	0,0895
120	107	115	138	239	99,4	0,086	138	160	200	99,4	0,086	138	160	200	123,4	0,090	138	160	200	123,4	0,090	138	160	200	123,4	0,090
130	116	123	147	264	109,9	0,088	155	179	221	109,9	0,088	155	179	221	136,4	0,092	155	179	221	136,4	0,092	155	179	221	136,4	0,092
140	125	138	164	286	119,0	0,089	173	199	242	119,0	0,089	173	199	242	149,3	0,094	173	199	242	149,3	0,094	173	199	242	149,3	0,094
150	133,5	151	179	310	129,0	0,090	192	220	262	129,0	0,090	192	220	262	161,6	0,095	192	220	262	161,6	0,095	192	220	262	161,6	0,095
160	142	163	193	336	139,7	0,091	217	248	282	139,7	0,091	217	248	282	174,0	0,096	217	248	282	174,0	0,096	217	248	282	174,0	0,096
170	151	178	209	360	149,7	0,092	239	272	303	149,7	0,092	239	272	303	187,0	0,097	239	272	303	187,0	0,097	239	272	303	187,0	0,097
180	160	189	221	388	161,2	0,094	263	297	326	161,2	0,094	263	297	326	201,0	0,0985	263	297	326	201,0	0,0985	263	297	326	201,0	0,0985
190	169	201	234	417	173,1	0,095	288	324	350	173,1	0,095	288	324	350	216,0	0,100	288	324	350	216,0	0,100	288	324	350	216,0	0,100
200	178	218	253	446	185,5	0,097	307	344	379	185,5	0,097	307	344	379	234,0	0,103	307	344	379	234,0	0,103	307	344	379	234,0	0,103

Zahlentafel 21. Wärmeleitziffer  $\lambda$  für die Isolierung IV  
(verkürzte Schleife, 14,8 m Länge, 70 mm l. W.).

1	2	3	4			6	7
Temperaturgefälle zwischen Dampf und Luft °C	Temperaturgefälle in der Umhüllung °C	ständige Wärmesparnis durch die Flanschumhüllung, bezogen auf 1 qm Oberfläche der gesamten nackten Rohrleitung WE	Wärmeverlust in 1 st			Wärmeleitziffer $\lambda$	
			durch die Flansche, bezogen auf 1 qm Oberfläche der gesamten nackten Rohrleitung WE	durch den umhüllten Teil der Rohrleitung, bezogen auf			
				1 qm Oberfläche der gesamten nackten Rohrleitung WE	1 qm der Umhüllungs-oberfläche WE		
100	63	138	167	583	424	0,1650	
110	69	151	182	649	472	0,1680	
120	75	168	202	713	519	0,1700	
130	81	180	215	780	567	0,1720	
140	87	200	238	847	616	0,1740	
150	93	215	255	915	666	0,1755	
160	99	232	274	986	717	0,1775	
170	105,5	264	311	1044	768	0,1790	
180	111,8	278	326	1124	818	0,1810	
190	117	312	363	1187	864	0,1810	
200	123,5	345	400	1250	910	0,1810	

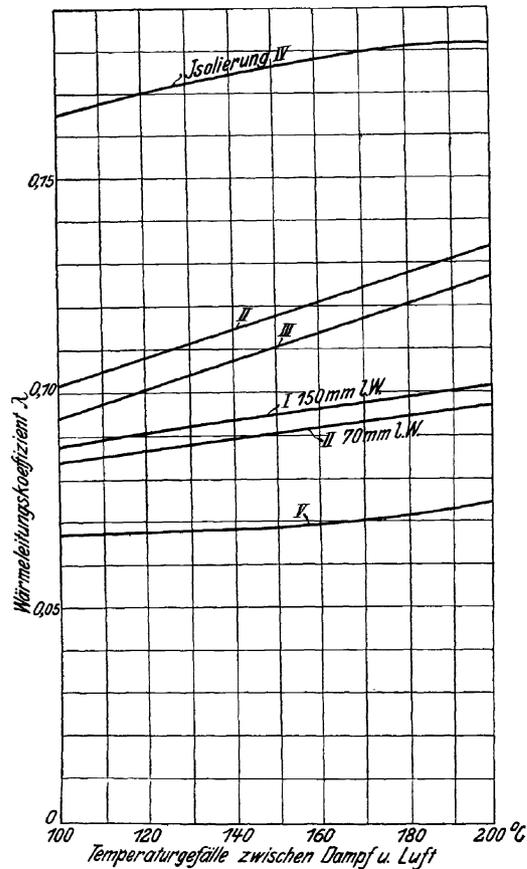


Fig. 34.

Zahlentafel 22. Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  für die Isolierungen II, III und IV.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Temperatur- gefälle	zwischen Dampf und Luft	°C	Isolierung II			Isolierung III			Isolierung V			Wärmeleitfähigkeit $\lambda$			Wärmeleitfähigkeit $\lambda$				
			°C	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE
			stündliche Wärmeersparnis durch die Flanschumhüllung, bezogen auf 1 qm Oberfläche der gesamten nackten Rohrleitung	durch die Flansche, bezogen auf 1 qm Oberfläche der gesamten nackten Rohrleitung	durch den umhüllten Teil der Rohrleitung, bezogen auf 1 qm Oberfläche der gesamten nackten Rohrleitung	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	Temperaturgefälle in der Umhüllung	stündliche Wärmeersparnis durch die Flanschumhüllung, bezogen auf 1 qm Oberfläche der gesamten nackten Rohrleitung	durch die Flansche, bezogen auf 1 qm Oberfläche der gesamten nackten Rohrleitung	durch den umhüllten Teil der Rohrleitung, bezogen auf 1 qm Oberfläche der gesamten nackten Rohrleitung	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	Temperaturgefälle in der Umhüllung	stündliche Wärmeersparnis durch die Flanschumhüllung, bezogen auf 1 qm Oberfläche der gesamten nackten Rohrleitung	durch die Flansche, bezogen auf 1 qm Oberfläche der gesamten nackten Rohrleitung	durch den umhüllten Teil der Rohrleitung, bezogen auf 1 qm Oberfläche der gesamten nackten Rohrleitung	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	Temperaturgefälle in der Umhüllung	stündliche Wärmeersparnis durch die Flanschumhüllung, bezogen auf 1 qm Oberfläche der gesamten nackten Rohrleitung	durch die Flansche, bezogen auf 1 qm Oberfläche der gesamten nackten Rohrleitung
100	86	104	129	226	94,8	0,102	86	104	129	208	87,3	0,094	88	92	107,5	159,5	74,6	0,067	
110	94,5	119	147,5	253,5	106,5	0,105	94,5	119	147,5	237,5	99,6	0,098	92	103	120	179	83,3	0,067	
120	103	131	162	287	120,5	0,108	108	131	162	268	112,5	0,1015	101,5	113	131	198	92,6	0,0675	
130	111,5	147	181,5	317,5	133	0,111	111,5	147	181,5	296,5	124,5	0,1035	111	122	141	217	101,5	0,0675	
140	120	154	190	358	150	0,116	120	154	190	332	139,5	0,108	120	131	151	236	110,5	0,0680	
150	128	174	214	385	161,5	0,117	128	174	214	363	152,5	0,1105	129,5	140	161	257	120,5	0,069	
160	136,5	188	231	422	177	0,120	136,5	188	231	399	167,5	0,114	139	150	172	278	130,0	0,069	
170	145	200	245	466	195,5	0,125	145	200	245	437	183,5	0,1175	148	158	181	302	141,0	0,070	
180	153,5	219	267	503	211	0,128	153,5	219	267	473	198,5	0,120	157,5	169	192	327	153,0	0,072	
190	162	233	283	547	229	0,131	162	233	283	515	216	0,124	167	180	204	351	164,5	0,073	
200	170,5	250	304	586	246	0,134	170,5	250	302	554	233	0,127	176,5	191	216	375	175,5	0,073	

6) Ziffer  $K$  des Wärmeüberganges zwischen Isolierung und Luft.

Aus dem Temperaturgefälle zwischen der Außenfläche der Isolierung und der umgebenden Luft und dem Wärmeübergang durch 1 qm Isolierungsfläche in der Stunde läßt sich die Ziffer  $K'$  des Wärmeüberganges zwischen Isolierung und Luft berechnen. Wie den Zahlentafeln 11 bis 13 zu entnehmen ist, wurde die Temperatur der Oberfläche der Isolierung bei allen Versuchen gemessen, und man könnte nun für alle Versuche  $K'$  berechnen. Da jedoch bei den zum Teil älteren Versuchen bei der Messung der Temperatur der Isolierungsfläche und bei der Anbringung der Thermolemente noch nicht die Sorgfalt aufgewendet wurde, die notwendig gewesen wäre, um die für die Berechnung von  $K'$  erforderliche Genauigkeit zu erzielen, so wurden mit der Isolierung I bei gesättigtem Dampf und den Dampftemperaturen von 120 bis 190° C besondere Messungen angestellt, aus deren Ergebnissen die in Zahlentafel 23 Spalte 2 aufgenommenen Temperaturgefälle zwischen Isolierung und umgebender Luft durch zeichnerische Interpolation bestimmt wurden. Bei diesen Messungen wurden die Thermolemente sehr sorgfältig in die Isolierungsfläche eingebettet; außerdem wurde die Temperatur der zweiten Lötstelle des Elementes genau auf 0° gehalten, so daß eine Genauigkeit von etwa 0,1° C mit Sicherheit für diese Messung erreicht wurde. Da das kleinste Temperaturgefälle 14° C beträgt, wird damit eine Genauigkeit des Wertes  $K'$  auf 1 vH erzielt. Für die im vorigen Abschnitt vorgenommenen Berechnungen von  $\lambda$  beeinflusste ein Fehler von 1° C die Werte von  $\lambda$  ebenfalls um höchstens 1 vH. Die Wärmeverluste für 1 qm Umhüllungsfläche wurden aus den in Zahlentafel 14 S. 33 zusammengestellten Werten berechnet und in Spalte 3 aufgenommen; Spalte 4 enthält sodann die Wärmeübergangsziffer  $K'$ . Diese ist für das ganze Temperaturgefälle von 14 bis 32° C annähernd gleich, und zwar etwa = 5,7.

Zahlentafel 23. Ziffer  $K$  des Wärmeüberganges zwischen Isolierung und Luft für Isolierung 1.

1	2	3	4
Temperaturgefälle zwischen		stündlicher	Wärme- übergang- ziffer $K'$
Dampf und Luft	Umhüllungsfläche und Luft	Wärmeverlust für 1 qm Umhüllungs- oberfläche	
°C	°C	WE	
100	14,1	80,3	5,68
110	15,8	89,8	5,69
120	17,5	99,4	5,68
130	19,3	109,9	5,69
140	21,0	119,0	5,67
150	22,8	129,0	5,66
160	24,6	139,7	5,68
170	26,3	149,7	5,69
180	28,3	161,2	5,69
190	30,4	173,1	5,70
200	32,0	185,5	5,70

Zweifellos wird  $K'$  vom Bewegungszustande der Luft und bei größeren Aenderungen des Temperaturgefälles mit Rücksicht auf den Strahlungsanteil auch von diesem abhängen; bei allen diesen Versuchen war die Luft nur sehr wenig bewegt; ein vollständiger Ruhezustand ist nicht zu erzielen gewesen, da die Erwärmung durch die Versuchsleitung ein Aufsteigen der Luft zur Folge hat.

7) Einfluß der Stärke der Umhüllung.

Mit Benutzung der in Abschnitt 4 S. 40 entwickelten Formel

$$\eta = 1 - \frac{t_w - t_l}{K(t_a - t_l) \left\{ \frac{1}{\left(1 + \frac{\delta}{r}\right) K'} + \frac{r}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{\delta}{r}\right) \right\}}$$

kann der Einfluß der Stärke der Umhüllung auf die erreichbare Wärmeersparnis berechnet werden, wenn die Werte von  $K$ ,  $K'$  und  $\lambda$  bekannt sind. Für die Berechnung soll im folgenden Beispiel angenommen werden:

- Halbmesser der Rohrleitung . . . . .  $r = 38$  mm
- Stärke der Umhüllung . . . . .  $\delta = 60$  » und  $30$  mm
- Dampftemperatur . . . . .  $t_a = 120^\circ$  C
- Wandungstemperatur . . . . .  $t_w = 119^\circ$  C
- Lufttemperatur . . . . .  $t_l = 20^\circ$  C
- Uebergangsziffer von Dampf an Luft . .  $K = 12,5$
- » » der Umhüllung an Luft  $K' = 6$
- Wärmeleitziffer der Umhüllung . . . .  $\lambda = 0,085$ .

Für die mit einer 60 mm starken Umhüllung versehene Leitung berechnet sich

$$\eta = 0,837,$$

während sich bei einer Umhüllung von nur 30 mm Stärke unter Annahme gleicher Uebergangsziffern eine Wärmeersparnis

$$\eta = 0,776$$

berechnet.

Da nach den vorstehenden Ausführungen angenommen werden kann, daß sich bei Verwendung des gleichen Umhüllungsstoffes bei verschiedener Stärke der Umhüllung  $\lambda$  ändert, weil die mittlere Temperatur der Umhüllung in beiden Fällen verschieden ist; da ferner angenommen werden kann, daß auch  $K'$  infolge des Strahlungseinflusses mit zunehmender Temperatur wächst, schien es von Interesse, auch vergleichende Untersuchungen über den Einfluß der Stärke der Umhüllung durchzuführen. Auf der Versuchsschleife *bc* (Fig. 1 und 2 S. 2) wurde zunächst eine Umhüllung mit 30 mm Stärke aufgebracht, und zwar wurden die Rohrleitung und die Flansche in gleicher Stärke und mit der gleichen Masse umhüllt. Nachdem mit dieser Umhüllung die Untersuchungen durchgeführt waren, verstärkte man die Umhüllung auf 60 mm.

Zahlentafel 24. Einfluß der Stärke der Umhüllung auf den Wärmeverlust.

1			2	3	4	5	6	7	8	9	10		11	12
Versuchsleitung			Stärke der Umhüllung	absolute Dampfspannung	Dampf-temperatur	mittlere Luft-temperatur	Temperaturgefälle zwischen Dampf und Luft	Temperatur der Umhüllung	stündl. Wärmeverlust für 1 qm Rohroberfläche und 1 °C Temperaturgefälle		Wärmeersparnis durch die Umhüllung			
Länge	lichte Weite	Zahl der Flansche							umhüllte Leitung	nackte Leitung				
m	mm		mm	kg/qcm	°C	°C	°C	°C	WE	WE	vH			
26,6	70	6	30	3,33	136,3	12,1	124,2	47	3,48	13,20	74			
				6,70	162,3	14,9	147,4	56	3,61	14,17	75			
				13,20	191,4	13,8	177,6	61	3,46	15,85	78			
26,6	70	6	60	3,37	136,8	12,7	124,1	23	2,70	13,17	79,5			
				6,78	162,8	15,6	147,2	39	2,81	14,15	81			
				13,20	191,4	16,0	175,4	44	2,79	15,72	82			

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Zahlentafel 24 zusammengestellt, der folgendes zu entnehmen ist:

Bei einer Stärke der Umhüllung von 30 mm und den Dampftemperaturen von rd. 136, 162 und 191° C wurde gegenüber der nackten Leitung eine Wärmeersparnis von 74, 75 und 78 vH erzielt; diese erhöhte sich bei einer Verstärkung der Umhüllung auf 60 mm und für die gleichen Dampftemperaturen auf 79,5, 81 und 82 vH. Die durch die Versuche nachgewiesene Steigerung der Wärmeersparnis stimmt sonach sehr angenähert mit der berechneten Erhöhung überein.

Nach diesem Ergebnis erscheint es — wenigstens für die hier in Frage kommenden praktischen Zwecke — zulässig, aus Versuchen mit einer bestimmten Umhüllungsstärke die Wirkung des gleichen in anderer Stärke aufgetragenen Umhüllungsmittels rechnerisch zu ermitteln, unter Zugrundelegung der gleichen Werte für  $\lambda$  und  $K'$  in den Vergleichrechnungen.

Für die Ermittlung der wirtschaftlich zweckmäßigsten Stärke der Umhüllung werden derartige Berechnungen unerlässlich sein.

Bei der Versuchleitung von 76 mm äußerem Durchmesser trifft auf 4,2 m Leitungslänge 1 qm Rohroberfläche; um diese Länge 30 mm stark zu umhüllen, sind 52 cdm Masse erforderlich, während für die nächsten 30 mm 81 cdm notwendig sind. Bei einer Dampftemperatur von 191,4° C und einer Lufttemperatur von 13,8° C, also einem Temperaturgefälle von 177,6° C, verliert diese Leitung in der Stunde auf 1 qm Oberfläche  $15,85 \cdot 177,6 = 2820$  WE; hiervon werden durch die Umhüllung in 30 mm Stärke 78 vH, das sind 2200 WE, erspart, während durch die Umhüllung in 60 mm Gesamtstärke eine Wärmeersparnis von 2312 WE erzielt wird.

Die Umhüllung der Versuchsleitung in 30 mm Stärke mit 52 cdm Masse auf 1 qm Rohroberfläche bringt sonach eine Wärmeersparnis von 2200 WE; die Verstärkung dieser Umhüllung auf 60 mm, wozu weitere 81 cdm Masse erforderlich sind, läßt nur eine weitere Ersparnis von  $2312 - 2200 = 112$  WE erwarten.

Diese Zahlen zeigen, wie verhältnismäßig teuer die Erhöhung der Wärmeersparnis von 75 auf 80 vH erkauft wird, gegenüber der ersten von 75 vH; nichtsdestoweniger wird in sehr vielen Fällen die Steigerung der Wärmeersparnis auf noch höhere Ziffern wirtschaftlich noch vollkommen berechtigt sein; die äußerste Grenze wird nur von Fall zu Fall zu ermitteln sein, da sie von der Dampftemperatur, dem Verwendungszweck des Dampfes, der Benutzungsdauer der Leitung, den Kosten des Dampfes und den Kosten der Umhüllung abhängt.

### Dritter Abschnitt.

#### **Wärmeverlust bei der Fortleitung des überhitzten Dampfes.**

##### 1) Bestimmung des Wärmeverlustes.

Versuche zur Feststellung des Wärmeverlustes bei der Fortleitung überhitzten Dampfes können nur mit strömendem Dampf und in der Weise durchgeführt werden, daß der Wärmeinhalt des Dampfes beim Eintritt in die Versuchsleitung und beim Austritt aus derselben bestimmt wird; der Unterschied beider gibt, multipliziert mit der durch die Leitung strömenden Dampfmenge, den Wärmeverlust. Der durch eine Leitung strömende überhitzte Dampf kann seinen Wärmeinhalt ändern:

- a) durch Verminderung seiner Temperatur,
- b) durch Druckabfall,
- c) durch Teilkondensation.

Im ersten Abschnitt wurden die Einrichtungen zur Durchführung der Druck- und Temperaturmessungen besprochen; auch wurde die Temperaturverteilung über den Rohrquerschnitt für gesättigten und überhitzten Dampf untersucht und im Kapitel 5 jenes Abschnittes behandelt.

Die genaue Messung des etwa entstehenden Dampfwassers würde nicht möglich sein, da bei den meisten in Frage kommenden Dampfgeschwindigkeiten ein Teil des Dampfwassers durch die Wasserabscheider nicht zurückgehalten und abgeführt werden könnte. Diese Fehlerquelle läßt sich vollkommen nur dadurch ausschließen, daß die Bildung von Dampfwasser in der Versuchsleitung verhindert wird. Zweifellos kann aber Kondensation in einer Leitung nur dann eintreten, wenn ihre Wandungstemperatur unter der Sättigungstemperatur liegt. Soll deshalb der in einer Versuchsleitung entstehende Wärmeverlust lediglich durch Ueberhitzungswärme gedeckt werden, so muß die Dampftemperatur am Ende der Versuchstrecke noch so hoch liegen, daß die Wandungstemperatur über der Sättigungstemperatur bleibt. Diese Bedingung suchte man bei allen Versuchen mit überhitztem Dampf, die im wesentlichen an der Versuchsleitung *ad* und an der Schleife *bc* zur Durchführung gelangten, zu erfüllen. Um aber auch den Einfluß der Wandungstemperatur auf die Dampfwasserbildung festzustellen, führte man eine Versuchsreihe durch, bei der die Dampftemperatur zunächst so hoch gehalten wurde, daß auch am Ende der Leitung die Wandungstemperatur noch über der Sättigungsgrenze lag; allmählich verringerte man die Temperatur so weit, daß ein immer größeres Stück der Wandungen in das Sättigungsgebiet rückte, während aber der Dampf bis zum Ende der Leitung noch schwach überhitzt blieb. An das Ende der Leitung *ad*, mit der diese Versuche durchgeführt wurden, hatte man den durch Fig. 3 dargestellten Wasserableiter angeschlossen. Solange die Wandungstemperatur die Sättigungstemperatur nicht unterschritt, blieb die durch den Ableiter abgeführte Wassermenge bei den absoluten Dampfdrücken von 3 bis 13 kg/qcm zwischen 0,2 und 0,6 kg/st. Das ist der Betrag, der in dem Ableiter und seiner Zuleitung niedergeschlagen wird; denn berechnet man unter Anwendung der Ergebnisse der im zweiten Abschnitt besprochenen Versuche mit gesättigtem Dampf den Verlust im Ableiter aus seiner Oberfläche, so erhält man sogar noch etwas größere Dampfwassermengen, als gewogen wurden; diese kleine Abweichung dürfte ihren Grund darin haben, daß der Dampf überhitzt in den Ableiter eintritt und an diesen auch seine Ueberhitzungswärme mit abgibt.

Danach kann kein Zweifel darüber bestehen, daß das gewogene Dampfwasser lediglich im Ableiter niedergeschlagen wurde.

Während die so abgeschiedene Dampfwassermenge für Wandungstemperaturen von der Sättigung bis zu etwa 100° Ueberhitzung vollkommen gleich bleibt, steigt sie wesentlich an, sobald die Wandung auf einer größeren Leitungstrecke im Sättigungsgebiet liegt. Auch diese Wahrnehmung ist ein Beweis für die Richtigkeit der Annahme, daß die bei höheren Temperaturen abgeschiedene gleiche Wassermenge nicht in der Leitung entsteht, sondern im Ableiter. Da die Versuchsleitung für eine stündliche Dampfmenge von 800 bis 1000 kg geeignet ist, beträgt der mittlere Dampfwasserverlust des Ableiters bei Annahme des Mittelwertes von 0,4 kg nur 0,05 vH.

Um den Einfluß der selbsttätigen Dampfwaterableiter auf die abgeführte Wassermenge festzustellen, wurden auch einige Versuche mit ihnen durchgeführt; dabei stieg die stündliche Dampfwassermenge je nach dem Dampfdruck auf 1,5 bis 2,5 kg. Bei fast allen Versuchen an ausgeführten Anlagen wurden aus den Leitungen selbst bei hohen Ueberhitzungen, welche die Erreichung der Sättigungs-

temperatur in den Wandungen vollkommen ausschließen, mehr oder weniger große Dampfwasserverluste — oft bis zu 3 vH des gesamten durch die Leitung geführten Dampfes — festgestellt. Aus dieser Erfahrung hat sich die Meinung gebildet, daß überhitzter Dampf Wasser mitführt, das in der Leitung ausgeschieden wird. Wir sind nach unsern Versuchserfahrungen und auf Grund der Ergebnisse dieser Untersuchungen der Ueberzeugung, daß diese Wassermengen lediglich im Ableiter und seinen Zuleitungen entstehen, und daß außerdem die Ableiter nicht selten ganz erhebliche Dampfmenngen mit dem Wasser abströmen lassen, das dann als Dampfwasser mitgewogen wird. Die Beobachtung der Dichtheit und des zuverlässigen Abschließens der selbsttätigen Ableiter wird dadurch sehr erschwert, daß bei Versuchen meistens hinter dem Ableiter eine Kühlschlange angeschlossen wird, in welcher der ausgestoßene Dampf mit niedergeschlagen wird.

Da die bei unsern Versuchen ermittelten Dampfwassermengen sonach zweifellos nicht in der Versuchsleitung entstanden sind, wurden sie bei der Berechnung der Wärmeverluste nicht berücksichtigt.

## 2) Die Temperatur der Rohrwand.

Nicht nur zur Feststellung des Grenzwertes, bei dem in der Rohrleitung Kondensation zu erwarten ist, sondern auch zur Beurteilung des Wärmeüberganges vom überhitzten Dampf an die Rohrwand ist die Kenntnis der Wandungstemperatur erforderlich. Die bezüglichen Messungen, die bei etwa 6,5 kg/qem abs. und bei Dampftemperaturen von 200 bis 300° C durchgeführt wurden, sind in Zahlentafel 25 zusammengestellt. Da zweifellos zu erwarten war, daß bei dem überhitzten Dampf die Dampfgeschwindigkeit einen erheblichen Einfluß auf den Wärmeübergang und damit auch auf die Temperatur der Rohrwand haben werde, wurden die Versuche bei verschiedenen Dampfgeschwindigkeiten durchgeführt. Zunächst nahm man Messungen an der isolierten Leitung von 70 mm Dmr. bei einer mittleren Dampfgeschwindigkeit von 20,8 m vor. Bei den Versuchen betrug das Temperaturgefälle zwischen Dampf und Wandung nur 4 bis 6° C. Berechnet man aus dem Temperaturgefälle und der Wärmeübergangsziffer für die umhüllte Leitung die in der Stunde auf 1 qm Rohrfläche abgeführte Wärmemenge, so läßt sich auch die Wärmeübergangsziffer  $\alpha_1$  zwischen Dampf und Rohrwand bestimmen. Bei dem geringen Gesamtgefälle von nur 4 bis 6° verursacht ein Fehler in der Temperaturmessung von 1° bereits einen Fehler für  $\alpha_1$  von 20 vH. Die absolute Größe der aus diesen Versuchen für  $\alpha_1$  gewonnenen Zahlen muß sonach als unzuverlässig gelten; sie lassen zunächst nur erkennen, daß  $\alpha_1$  bei überhitztem Dampf wesentlich kleiner ist als bei gesättigtem; denn dort überstieg  $\alpha_1$  den Wert 2000.

Einen bedeutend zuverlässigeren Eindruck machen die Ergebnisse der Versuche mit der nackten Leitung bei rd. 10 und 30 m Dampfgeschwindigkeit. Bei 30 m Dampfgeschwindigkeit, die selbstverständlich mit Berücksichtigung der Ueberhitzung berechnet wurde, ergab sich für die Dampftemperaturen von 291 bis 309° C ein Temperaturgefälle zwischen Dampf und Rohrwand von etwa 34° C, und  $\alpha_1$  beträgt etwa 166.

Die Versuche mit 9 bis 10 m Dampfgeschwindigkeit lieferten bei wesentlich geringeren Dampftemperaturen von 220 bis 267° C ein bedeutend größeres Temperaturgefälle zwischen Dampf und Rohrwand von 45 bis 60° C und eine Ziffer  $\alpha_1 = 76$ . Bei der auf  $\frac{1}{3}$  verminderten Dampfgeschwindigkeit ist also die Uebergangsziffer zwischen Dampf und Rohrwand um mehr als die Hälfte des ersten Wertes zurückgegangen. Damit ist der Nachweis erbracht, daß sich der überhitzte Dampf hinsichtlich des Wärmeüberganges an die Rohrwand

Zahlentafel 25. Rohrwandungstemperaturen bei Fortleitung überhitzten Dampfes.

Dampfdruck kg/qcm abs.	Dampf- temperatur an der Meßstelle °C	Luft- temperatur °C	Temperatur- gefälle °C	Wärme- übergang- ziffer K	ständig abgegebene Wärmemenge WE/qm	Wandungs- temperatur °C	Temperatur- gefälle zwischen Dampf und Wandung °C	Wärme- übergang- ziffer $\alpha_1$	Dampf- geschwindig- keit m/sk
6,60	283	10	273	3,41	930	277	6	155	} 20,8
6,50	287	10	277	3,51	970	282	5	194	
6,60	288	10	278	3,51	975	284	4	243	
umhüllte Leitung									
6,60	291	11	280	18,5	5180	256	35	148	} rd. 30,0
6,80	297	11	286	18,8	5380	267	30	179	
6,90	304	11	293	19,0	5560	273	31	179	
6,70	308	11	297	19,0	5650	274	34	166	} rd. 9 bis 10
6,70	309	11	298	19,0	5660	275	34	166	
6,70	309	11	298	19,0	5660	275	34	166	
6,70	308	11	297	19,0	5650	274	34	166	} rd. 9 bis 10
6,90	267	11	256	17,6	4500	206	61	74	
6,80	257	11	246	17,3	4250	202	55	77	
6,70	247	11	236	17,0	4010	198	49	82	} rd. 9 bis 10
6,70	234	11	223	16,5	3680	184	56	74	
6,70	227	11	216	16,2	3500	181	46	76	
6,70	225	11	214	16,1	3440	180	45	76	} rd. 9 bis 10
6,70	223	11	212	16,0	3400	178	45	76	
6,75	221	11	210	15,9	3340	177	44	76	
6,70	220	11	209	15,8	3310	176	44	75	

ganz anders verhält als der gesättigte; daß die Uebergangsziffer ganz beträchtlich mit der Dampfgeschwindigkeit wächst, und daß dementsprechend die Temperaturen der Rohrwand nicht nur von der Temperatur des Dampfes, sondern auch von seiner Geschwindigkeit abhängen. Die Ergebnisse der in Zahlentafel 25 zusammengestellten Messungen sind in Fig. 35 auch zeichnerisch dargestellt. Der Abfall zwischen der Temperatur von Dampf und Rohrwand läßt sich demnach nur für einen bestimmten Uebergangskoeffizienten bzw. nur für eine bestimmte Dampfgeschwindigkeit angeben. In Zahlentafel 26 sind für Dampftemperaturen von 100 bis 400° C und die Uebergangsziffer  $\alpha_1 = 150$ , die etwa der Dampfgeschwindigkeit von 25 m entsprechen dürfte, die Wandungstemperaturen berechnet. Während nach dieser Tafel für 400° C Dampftemperatur die Wandungstemperatur 343° C beträgt, ergäbe sie sich für  $\alpha_1 = 100$  nur zu 314° C. Da die Dampfgeschwindigkeit die Wandtemperatur erheblich beeinflußt, muß sie auch auf den Wärmeverlust, insbesondere der nackten Leitung, einwirken; hierauf wird später einzugehen sein.

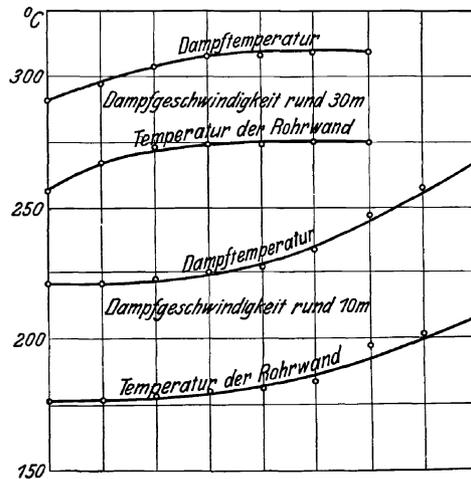


Fig. 35. Einfluß der Dampfgeschwindigkeit auf die Wandungstemperatur.

Zahlentafel 26. Temperaturen der nackten Rohrwand, berechnet für die Uebergangsziffer  $\alpha_1 = 150$ .

Dampf-temperatur °C	Luft-temperatur °C	Temperatur-gefälle °C	Wärme-übergangsziffer K	stündl. Wärmeübergang durch 1 qm Rohroberfläche WE	Temperaturgefälle zwischen Dampf und Wandung °C	Wandungs-temperatur °C
100	20	80	11,6	930	6	94
125	20	105	12,5	1310	9	116
150	20	130	13,4	1740	12	138
175	20	155	14,4	2230	15	160
200	20	180	15,3	2760	18	182
225	20	205	16,2	3320	22	203
250	20	230	17,1	3930	26	224
275	20	255	18,0	4600	31	244
300	20	280	18,9	5300	35	265
325	20	305	19,8	6050	40	285
350	20	330	20,8	6860	46	304
375	20	355	21,7	7700	51	324
400	20	380	22,6	8590	57	343

Nach dem Taschenbuch der Hütte ist  $\alpha_1$  für Gase und überhitzte Dämpfe nach der Formel

$$\alpha_1 = 2 + 10 \sqrt{v}$$

zu berechnen.

Für  $v = 30$  m würde  $\alpha_1 = 57$  werden, während es nach unserm Versuch 166 ist. Mit diesem Wert  $\alpha_1 = 57$  mußte sich bei  $300^\circ \text{C}$  Dampftemperatur und nackter Leitung ein Uebergangstemperaturverlust vom Dampf zur Rohrwand von rd.  $100^\circ \text{C}$  ergeben. Die zahlreichen, auch außer den in Zahlentafel 26 zusammengestellten, noch vorgenommenen roheren Messungen der Wandungstemperaturen haben stets geringere Werte für dieses Temperaturgefälle geliefert; die vorerwähnte Formel ist also hier nicht anwendbar.

### 3) Spezifische Wärme des überhitzten Wasserdampfes.

Zu Beginn dieser Versucharbeiten kannte man die spezifische Wärme des überhitzten Dampfes noch nicht; man rechnete noch allgemein für alle Drücke und Temperaturen mit  $c_p = 0,48$ . Wohl hatte Prof. v. Bach<sup>1)</sup> bereits darauf aufmerksam gemacht, daß der Wert 0,48 für höhere Dampfdrücke zu niedrig sei, und Prof. Lorenz war gerade mit seinen im Auftrage des Vereines deutscher Ingenieure durchzuführenden Versuchen zur Bestimmung der spezifischen Wärme überhitzten Wasserdampfes beschäftigt. Durch diese Arbeit<sup>2)</sup> wurden zwar die Gesetze für die Veränderlichkeit von  $c_p$  annähernd gekennzeichnet; aber absolut genommen erwiesen

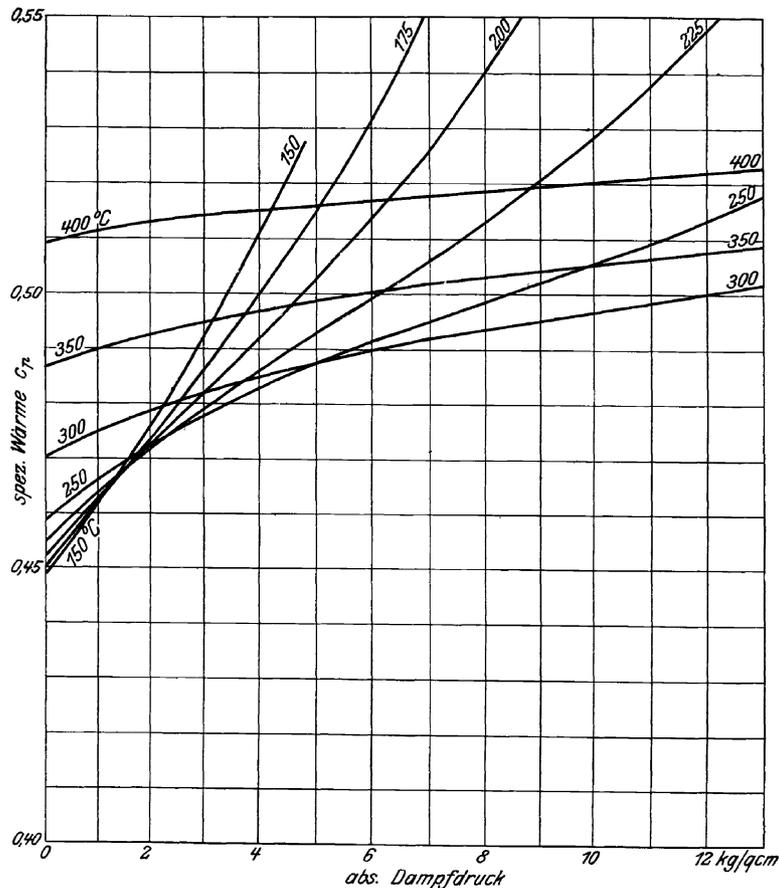


Fig. 36. Spezifische Wärme  $c_p$  des überhitzten Wasserdampfes.

<sup>1)</sup> Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1902 S. 729.

<sup>2)</sup> Mitteilungen über Forschungsarbeiten 1905 Heft 21 S. 93; Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1904 S. 698.

sich die Lorenzschen Werte als unrichtig. Erst durch die im Laboratorium für technische Physik der Kgl. Technischen Hochschule zu München durchgeführten Untersuchungen<sup>1)</sup> wurde  $c_p$  für den größten Teil des hier in Frage kommenden Druck- und Temperaturgebietes zuverlässig bestimmt.

In den Zahlentafeln 10 und 11 S. 142 und 143 des Heftes 35/36 der Mitteilungen über Forschungsarbeiten sind die auch hier benutzten Werte für  $c_p$  zusammengestellt: Zahlentafel 10 enthält die zu den einzelnen Temperaturen gehörenden Werte  $c_p$ , während der Zahlentafel 11 die mittleren  $c_p$  für das ganze Ueberhitzungsgebiet von der Sättigungstemperatur bis zu der angegebenen Dampftemperatur zu entnehmen sind.

Sind  $t_1$  und  $t_2$  die Dampftemperaturen am Anfang und Ende der Versuchleitung, und ist  $c_p^m$  die mittlere spezifische Wärme des Dampfes für das Temperaturgebiet  $t_1 \div t_2$ , so ist der Wärmeverlust  $Q$ , wenn  $D$  die stündliche Dampfmenge ist und in der Versuchleitung Druckverluste und Kondensation nicht eintreten:

$$Q = Dc_p^m (t_1 - t_2).$$

Um die für die einzelnen Versuche erforderlichen Werte von  $c_p^m$  bequemer bestimmen zu können, hat man in Fig. 36 die  $c_p$  in Abhängigkeit von den Dampfdrücken aufgetragen, und zwar für die Dampftemperaturen von  $150^\circ$  bis  $400^\circ$  C. Für dieses Gebiet wurden von  $25$  zu  $25^\circ$  Temperaturunterschied Linien gleicher Temperaturen konstruiert und hierdurch die Interpolation von Zwischenwerten für  $c_p$  erleichtert.

#### 4) Das Temperaturgefälle zwischen Dampf und Luft.

Bei den Versuchen mit gesättigtem Dampf waren die Luft- und die Dampftemperatur angenähert unveränderlich; das Temperaturgefälle war sonach in einfachster Weise zu bestimmen. Die Temperatur des überhitzten Dampfes dagegen ist am Ende der Versuchleitung dem Wärmeverlust in der Leitung entsprechend geringer als am Anfang. Die Temperatur des Dampfes verläuft mit Rücksicht auf das abnehmende Temperaturgefälle und bei der Veränderlichkeit des Wertes  $K$  bei größeren Temperaturgefällen nicht nach einer Geraden. Bei den Versuchen mit umhüllter Leitung wird der aus dieser Abweichung des Temperaturverlaufes sich ergebende Fehler vernachlässigt werden können; zur Ausmittlung der an der nackten Leitung gewonnenen Ergebnisse soll jedoch dieser Einfluß berücksichtigt werden. Nachdem die Untersuchungen für gesättigten Dampf erwiesen haben, daß die Ergebnisse der Versuche das Stefan-Boltzmannsche Strahlungsgesetz befriedigend erfüllen, wird dieses auch der Ermittlung des Temperaturverlaufes zugrunde gelegt.

#### 5) Wärmeverlust der nackten Leitung.

Nach den Ausführungen des Kapitels 2 in diesem Abschnitt hängt die Temperatur der Rohrwand nicht nur von der Dampftemperatur, sondern auch sehr wesentlich von der Dampfgeschwindigkeit ab. Da andererseits der Wärmeverlust der nackten Leitung weniger durch die Dampf- als durch die Wandungstemperatur beeinflusst wird, wäre es zwecklos, in ähnlicher Weise wie beim gesättigten Dampf durch zahlreiche Versuche mit der nackten Leitung deren Wärmeverlust bei verschiedenen Dampftemperaturen zu bestimmen. Nachdem an Hand der Versuche mit gesättigtem Dampf die Gesetzmäßigkeit für den Verlauf des Wärmeverlustes festgestellt worden ist, erscheint es wesentlich nützlicher, für eine zu wählende Dampfgeschwindigkeit bzw. für eine Wärmeübergangsziffer  $\alpha_1$  unter Zugrundelegung der für gesättigten Dampf ermittelten Werte die Abhängigkeit des Wärme-

<sup>1)</sup> Mitteilungen über Forschungsarbeiten 1905 Heft 21 S. 33 und 1906 Heft 35 und 36 S. 109; Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1907 S. 81 u. f.

verlustes von der Dampftemperatur zu berechnen. In Fig. 37 ist die Wärmedurchgangsziffer für die nackte Leitung für gesättigten Dampf durch die gestrichelte Linie dargestellt; außerdem sind in dieser Figur die Ergebnisse zweier Versuche mit überhitztem Dampf eingezeichnet. Legt man durch diese beiden Versuchspunkte eine Linie derart, daß sie sich bei 0° mit dem für gesättigten Dampf ermittelten Linienzug schneidet, so erhält man die in Figur 37 dargestellte Kurve für die Wärmedurchgangsziffer  $K$  für überhitzten Dampf und die nackte Leitung. Im Laufe des Jahres 1908 durchgeführte weitere Versuche haben den Verlauf dieser Kurve be-

Zahlentafel 27.

Wärmeübergangsziffern  $K$  für die nackte Leitung von 70 mm.

Dampf- temperatur	Luft- temperatur	Temperatur- gefälle	Wärme- übergang- ziffer $K$	Wärme- verlust auf 1 qm Rohr- oberfläche in der Stunde WE
°C	°C	°C		
100	20	80	11,8	945
125	20	105	12,4	1300
150	20	130	13,2	1720
175	20	155	14,0	2170
200	20	180	14,8	2660
225	20	205	15,7	3220
250	20	230	16,5	3800
275	20	255	17,5	4460
300	20	280	18,5	5180
325	20	305	19,5	5950
350	20	330	20,5	6750
375	20	355	21,7	7700
400	20	380	23,0	8740

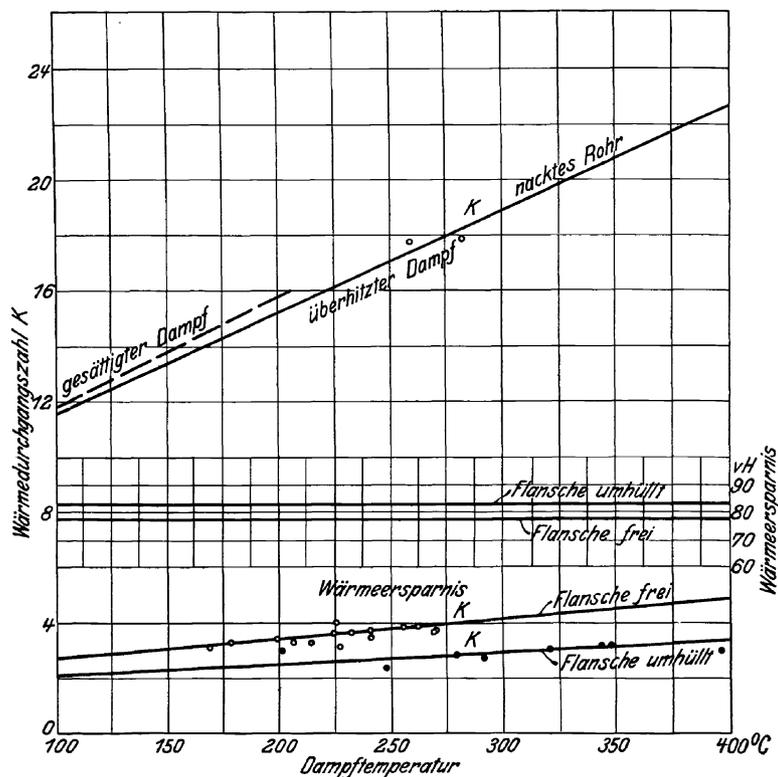


Fig. 37. Wärmedurchgangsziffer  $K$  für die nackte und die umhüllte Leitung.

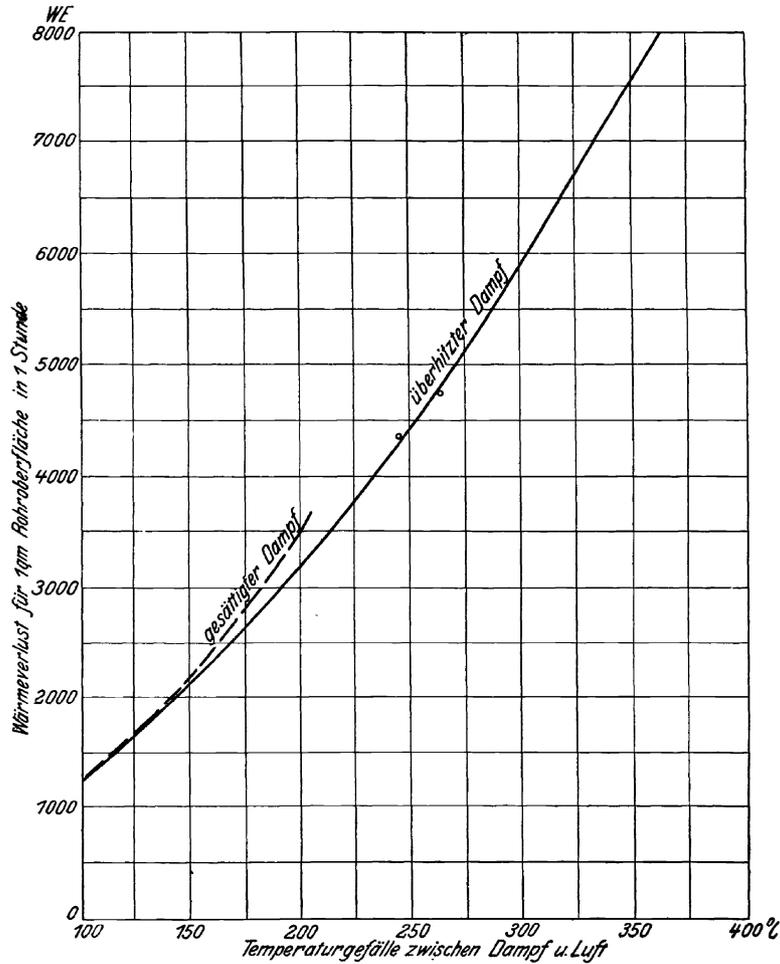


Fig. 38. Stündliche Wärmeverluste der nackten Leitung.

friedigend bestätigt. Nach den vorausgegangenen Darlegungen über die Wandungstemperatur bei Fortleitung überhitzten Dampfes mußte eine niedrigere Wärmedurchgangsziffer  $K$  als für gesättigten Dampf erwartet werden. Dies wird durch die Versuchsergebnisse bestätigt.

Setzt man in die das Stefan-Boltzmannsche Strahlungsgesetz darstellende Gleichung die für  $\alpha_1 = 150$  in Zahlentafel 26 zusammengestellten Wandungstemperaturen ein und verändert in dem Temperaturgebiet von 100 bis 400°C  $k$  zwischen 6,4 und 8,4, während der Wert  $c = 4$  unverändert angenommen wird, so erhält man die in Zahlentafel 27 enthaltenen Werte für  $K$  und für den stündlichen Wärmeverlust für 1 qm Rohroberfläche, welche die entsprechenden Kurven in den Figuren 37 und 38 erfüllen. Die Gesetzmäßigkeit weicht sonach von der für gesättigten Dampf festgestellten insofern ab, als dort auch der Wert  $k$  unveränderlich zu 6 angenommen werden konnte. Wenn auch durch die Versuche keine weiteren Grundlagen für die Beurteilung der Veränderung des Wertes  $k$  gewonnen wurden, so ist doch kein Zweifel, daß  $k$  mit zunehmender Temperatur wächst. (S. a. S. 62 Zeile 2 von unten.)

In Zahlentafel 28 sind die mit der Rohrleitungsschleife  $bc$  mit überhitztem Dampf durchgeführten Versuche zusammengestellt. Zunächst werden hier nur die mit der nackten Leitung durchgeführten Versuche zu besprechen sein, deren Ergebnisse in Fig. 37 und 38 ebenfalls eingezeichnet sind. Dabei zeigt sich, daß die beiden Versuche sich sehr befriedigend mit den berechneten Werten decken. Damit ist nachgewiesen, daß die Wärmeverluste einer nackten Rohrleitung mit

Zahlentafel 28. Versuche mit überhitztem Dampf an der Rohrleitungsschleife bc.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Dauer des Versuches	abs. Dampfspannung $p_m$	Sättigungstemperatur des Dampfes $t_s$	Dampf Temperatur am		mittlere Dampftemperatur $t_m$	Temperaturverlust zwischen den Meßstellen $b$ und $c$ $t_2 - t_3$	ständig durch die Leitung geströmte Dampfmenge	mittlere spezifische Wärme des überhitzten Dampfes zwischen $t_2$ und $t_3$	Wärmeverlust in der Stunde			Lufttemperatur $t_l$	Temperaturgefälle zwischen Dampf und Luft $t_m - t_l$	Wärmeübergangsziffer $K$ für 1 qm Rohroberfläche und 1°C Temperaturgefälle	spezifisches Volumen	Dampfgeschwindigkeit
st	kg/qcm	°C	Anfang der Schleife (b) $t_2$	Ende der Schleife (c) $t_3$	°C	°C	kg	$c_p^m$	WE	WE	WE	°C	°C		cbm/kg	m/sk
1,52	6,6	161,7	290,5	234,0	259,5	56,5	1049,8	0,4919	29176	1097	4832	16,0	243,5	17,8	0,37	28,0
1,53	13,3	191,6	320,7	250,2	282,6	70,5	892,2	0,5053	31680	1195	4719	19,4	263,2	17,9	0,190	12,2
3,0	3,1	133,9	175,7	162,0	168,9	13,7	442,5	0,4888	2980	111	489,5	29,4	139,5	3,15	0,65	20,7
3,0	3,15	134,5	185,4	170,0	177,7	15,4	440,0	0,4878	3305	124	490,8	27,9	149,8	3,28	0,66	20,9
3,0	6,55	161,4	207,7	191,8	199,8	15,9	480,5	0,5198	3971	149,5	589,6	28,5	171,3	3,44	0,33	11,4
3,0	6,55	161,4	213,7	198,9	206,3	14,8	520,2	0,5146	3961	149	586,9	32,5	173,8	3,38	0,335	12,6
3,0	12,9	190,2	221,2	206,4	213,8	14,8	461,8	0,5860	4005	151	594,7	31,6	182,2	3,26	0,167	5,57
4,0	3,1	133,9	234,0	215,7	224,9	18,3	516,6	0,4801	4539	170,5	673,9	35,5	189,4	3,56	0,75	27,9
3,33	3,2	135,0	232,0	229,5	225,8	12,5	909,6	0,4807	5430	204	806,2	26,6	199,2	4,05	0,73	47,6
3,0	13,0	190,6	240,8	223,9	232,1	16,4	547,2	0,5444	4886	184	725,4	32,7	199,4	3,64	0,174	6,87
4,0	6,55	161,4	250,8	231,9	241,4	18,9	515,0	0,4962	4880	182	717,2	36,6	204,8	3,50	0,36	13,4
3,0	6,50	161,1	247,0	234,0	240,5	12,9	843,0	0,4963	5397	203	801,3	29,7	210,8	3,80	0,365	22,2
3,0	3,20	135,0	263,1	254,5	255,8	14,6	847,6	0,4796	5937	223	881,6	34,1	221,7	3,98	0,77	47,1
2,5	12,95	190,4	237,7	242,5	250,1	15,2	821,4	0,5193	6483	244	962,7	28,6	221,5	4,35	0,182	10,8
3,0	12,85	190,1	268,6	254,8	261,7	13,8	867,5	0,5085	6086	229	903,7	30,9	230,8	3,91	0,188	11,8
4,0	12,75	189,7	278,4	260,5	269,5	17,9	633,9	0,5053	5734	216	851,3	37,2	232,3	3,66	0,193	8,83
3,0	13,00	190,6	277,7	262,5	270,1	15,2	748,8	0,5064	5764	217	855,8	37,0	233,1	3,68	0,190	10,3
nackte Leitung																
isolierte Leitung, Flansche frei																
7,1	8,9	173,9	221,4	205,3	213,3	16,1	461,4	0,5333	3963	149	588,3	18,2	195,1	3,01	0,247	8,23
7,13	13,0	190,6	235,0	220,7	227,9	14,3	568,0	0,5530	4492	169	666,9	18,7	209,2	3,19	0,172	7,05
3,0	3,05	133,4	235,0	242,4	248,7	12,6	596,4	0,4787	3599	135,5	534,2	30,8	217,9	2,45	0,80	34,4
3,0	6,55	161,4	287,6	270,8	279,2	16,8	601,8	0,4900	4954	186,5	735,6	31,3	247,9	2,97	0,39	16,9
3,0	12,9	190,2	300,0	283,0	291,5	17,0	578,8	0,5015	4935	186	732,7	34,9	256,6	2,85	0,200	8,36
3,02	12,9	190,2	338,2	321,3	338,1	36,9	365,7	0,5060	6828	237	1013,7	17,5	320,6	3,16	0,219	5,78
1,03	6,9	163,5	350,0	340,9	345,5	9,1	1600,2	0,5000	7281	274	1080,9	28,0	322,5	3,35	0,42	48,5
1,08	6,6	161,7	352,5	344,2	348,4	8,3	1728,7	0,5006	7183	270	1066,5	21,3	327,1	3,26	0,44	54,9
4,07	12,4	188,4	414,3	382,0	396,6	32,3	450,5	0,5210	7581	285	1125,6	24,6	372,0	3,03	0,251	8,17
4,02	12,5	188,8	447,7	403,1	423,4	44,6	439,8	0,5310	10415	322	1546,5	22,4	401,0	3,86	0,259	8,22
isolierte Leitung, Flansche isoliert																

befriedigender Genauigkeit mit Benutzung des gewählten Gesetzes berechnet werden können, und daß es dabei zulässig ist, die Flanschoberfläche genau so zu behandeln wie die Rohrleitung selbst. Die mittleren Dampftemperaturen wurden für die beiden Versuche mit der nackten Leitung mit Benutzung der Figur 39 bestimmt; die dabei gewonnenen Mittelwerte sind in Spalte 6 der Zahlen-tafel 28 eingetragen.

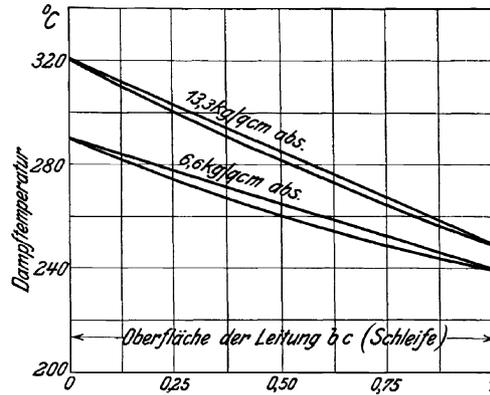


Fig. 39. Ermittlung der mittleren Dampftemperatur.

Aus den Betrachtungen über den Einfluß der Dampfgeschwindigkeit auf die Ziffer des Wärmeüberganges vom Dampf auf die Rohrwand folgt, daß mit zunehmender Dampfgeschwindigkeit diese Ziffer und damit auch die Temperatur der Rohrwand wächst; daraus ergibt sich aber auch, daß der Wärmeverlust der nackten Leitung bei gleichen Dampftemperaturen mit der Dampfgeschwindigkeit zunimmt. Aus dieser Erkenntnis soll jedoch nicht die Lehre abgeleitet werden, daß die Geschwindigkeit des überhitzten Dampfes gering zu wählen ist; denn mit Verminderung der Geschwindigkeit würden die Rohrleitungs-oberfläche und ihre Anlagekosten wachsen. Für die Bemessung der Dampfgeschwindigkeit wird im allgemeinen lediglich der zulässige Druckverlust maßgebend sein.

Es ist oft davon gesprochen und auch geschrieben worden, daß die Wärmeverluste bei der Fortleitung überhitzten Dampfes geringer seien als bei der Fortleitung gesättigten Dampfes. Wie Fig. 38, in der die Verluste für gesättigten und überhitzten Dampf eingetragen sind, zeigt, wächst der Wärmeverlust der nackten Leitung angenähert mit dem Temperaturgefälle zwischen Dampf und Luft. Zwar bleibt die Kurve für überhitzten Dampf infolge der niedrigen Wandtemperaturen etwas hinter der für gesättigten Dampf zurück. Mit Berücksichtigung der wesentlich größeren Temperaturgefälle bei der Fortleitung überhitzten Dampfes wird man aber hier stets mit bedeutend größeren Gesamtverlusten zu rechnen haben. Wie schon früher ausgeführt wurde, ist bei der Verlustberechnung für gesättigten Dampf die Flüssigkeitswärme des abgeschiedenen Dampfes nicht mit in Rechnung gezogen worden, da sie tatsächlich in der Leitung nicht verloren geht. Wird die Wärme des abgeschiedenen Dampfes nicht zur Speisung wieder nutzbar gemacht, so erhöht sich der Wärmeverlust bei Fortleitung gesättigten Dampfes um diesen Betrag, der bei hohem Dampfdruck bis zu 30 vH des berechneten Verlustes ausmacht. Aber auch wenn dieser Verlust der Rohrleitung aus praktischen Erwägungen mit in Anrechnung gebracht werden muß, so wird, wie Fig. 38 ebenfalls zeigt, schon von 240° C Dampftemperatur an der Verlust wieder größer als bei Sattampf von 200° C.

6) Wärmeersparnis durch die Umhüllung.

Die Versuche zur Feststellung der Wärmeersparnis konnten nur mit der Isolierung I an der 70 mm-Rohrleitung durchgeführt werden. Wie der Zahlentafel 28 zu entnehmen ist, wurden diese Versuche auf das Temperaturgebiet von rd. 170 bis 420° C ausgedehnt; in der Zahlentafel sind die Versuche nach der mittleren Dampftemperatur geordnet. Die in der üblichen Weise berechneten Werte *K* hat man in Fig. 37 eingetragen. Während bei gesättigtem Dampf im allgemeinen alle Versuchspunkte sehr nahe an den durchgelegten Linienzügen liegen, ist hier eine etwas größere Streuung festzustellen. Wie schon im ersten Abschnitt mitgeteilt wurde, ist die genaue Durchführung von Versuchen mit überhitztem Dampf mit wesentlich größeren Schwierigkeiten verbunden als beim gesättigten Dampf; insbesondere fordert die Erzielung eines guten Beharrungszustandes und die unveränderte Erhaltung der Dampftemperatur große Aufmerksamkeit. Immerhin liegen die Versuchspunkte so befriedigend, daß die beiden Verlustlinien sicher eingezeichnet werden konnten.

In Spalte 17 sind die mittleren Dampfgeschwindigkeiten angegeben, bei denen die Versuche zur Durchführung gelangten.

Obwohl die Dampfgeschwindigkeiten zwischen 5 und 55 m schwanken, kann aus den Versuchsergebnissen ein Einfluß der Dampfgeschwindigkeit auf den Wärmeverlust nicht festgestellt werden; tatsächlich muß ja auch bei isolierter Leitung ein kleiner Einfluß der Geschwindigkeit vorhanden sein; dieser ist aber zweifellos geringer als die unvermeidlichen Versuchsunsicherheiten.

Aus den drei Linienzügen der Figur 37, die den Verlauf von *K* für das nackte Rohr, die umhüllte Rohrleitung mit freien Flanschen und die vollständig umhüllte Leitung darstellen, hat man die in Zahlentafel 29 und 30 zusammengestellten Werte berechnet, und zwar sind die Werte der Zahlentafel 29 in Abhängigkeit vom Tem-

Zahlentafel 29.

Wärmeverluste, Wärmeersparniszahlen und Wärmedurchgangsziffern *K* für die Isolierung I in Abhängigkeit vom Temperaturgefälle.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Temperaturgefälle zwischen Dampf und Luft °C	Wärmeverlust für 1 qm Rohraußenfläche und 1 st			Wärmeersparnis durch die Isolierung		Wärmeverlust für 1 qm Rohraußenfläche, 1 st u. 1° C Temperaturgefälle		
	nackte Leitung WE	umhüllte Leitung		Flansche frei vH	Flansche umhüllt vH	nackte Leitung WE	umhüllte Leitung	
		Flansche frei WE	Flansche umhüllt WE				Flansche frei WE	Flansche umhüllt WE
100	1225	295	212	75,9	82,7	12,3	2,95	2,12
125	1640	393	279	76,0	83,0	13,1	3,14	2,23
150	2090	495	352	76,3	83,2	13,9	3,30	2,35
175	2625	610	434	76,7	83,5	15,0	3,49	2,48
200	3200	740	520	76,9	83,7	16,0	3,67	2,60
225	3770	870	610	76,9	83,8	16,8	3,87	2,71
250	4425	1015	705	77,0	84,1	17,8	4,06	2,82
275	5160	1170	820	77,3	84,1	18,8	4,25	2,98
300	5925	1330	930	77,5	84,3	19,8	4,43	3,10
325	6750	1500	1040	77,8	84,6	20,7	4,62	3,20
350	7580	1680	1160	77,8	84,7	21,7	4,80	3,31
375	8475	1870	1294	77,9	84,7	22,6	4,99	3,45
400	9440	2065	1432	78,1	84,8	23,6	5,16	3,58

Zahrentafel 30.

Wärmedurchgangsziffern  $K$  und Wärmeersparniszahlen für die Isolierung I in Abhängigkeit von der Dampftemperatur.

1	2	3	4	5	6
Dampf- temperatur	Wärmeverlust $K$ in 1 st für 1 qm Rohrfläche und 1° C Temperatur- gefälle			Wärmeersparnis durch die Isolierung	
	nackte Leitung	umhüllte Leitung		Flansche frei	Flansche umhüllt
		Flansche frei	Flansche umhüllt		
°C	WE	WE	WE	vH	vH
100	11,6	,275	2,06	76,3	82,3
125	12,5	2,93	2,18	76,5	82,5
150	13,4	3,12	2,31	76,7	82,8
175	14,4	3,30	2,43	77,0	83,1
200	15,3	3,49	2,55	77,2	83,3
225	16,2	3,67	2,67	77,3	83,5
250	17,1	3,85	2,78	77,5	83,7
275	18,0	4,04	2,89	77,5	83,9
300	18,9	4,22	3,01	77,6	84,0
325	19,8	4,41	3,12	77,7	84,2
350	20,8	4,59	3,23	77,9	84,4
375	21,7	4,77	3,35	78,0	84,5
400	22,6	4,96	3,46	78,0	84,7

peraturgefälle, die der Zahrentafel 30 in Abhängigkeit von der Dampftemperatur dargestellt.

Vergleicht man die Werte der Zahrentafel 17 S. 37 für gesättigten Dampf und Isolierung I mit denen der Zahrentafel 30, so fällt zunächst auf, daß für das Dampftemperaturgebiet von 100 bis 200° C bei beiden Dampfarten für die isolierte Leitung ganz ähnliche Gesamt-Wärmeübergangsziffern  $K$  ermittelt wurden. Mit zunehmender Dampftemperatur wächst dieser Wert erheblich an. Von 100 bis 200° C ist  $K$  für gesättigten und überhitzten Dampf bei Leitungs- und Flanschumhüllung im Mittel 2,30; dieser Wert steigt mit der Dampftemperatur bis auf den Betrag 3,46, der bei 400° C Dampftemperatur erreicht wird. Ueber die Ursache dieses Anwachsens wird noch zu sprechen sein.

Ferner lehrt der Vergleich beider Zahrentafeln, daß die Wärmeersparnis durch die Umhüllung bei überhitztem Dampf mit der Dampftemperatur wesentlich langsamer steigt als bei gesättigtem Dampf. Diese Erscheinung ist sehr einfach zu erklären: wie Zahrentafel 26 S. 52 gezeigt hat, bleibt bei der nackten Rohrleitung und überhitztem Dampf die Wandungstemperatur erheblich hinter der Dampftemperatur zurück. Der Wärmeverlust der nackten Leitung wächst sonach mit der Dampftemperatur langsamer als bei gesättigtem Dampf; folglich muß auch die Wärmeersparnis durch die Umhüllung bei überhitztem Dampf langsamer steigen als beim gesättigten Dampf. Bliebe die Wirkung der Umhüllung für das ganze Temperaturgebiet vollkommen gleich, so müßte die Ersparnis um denselben Betrag kleiner werden, wie der Verlust der nackten Leitung durch das Zurückbleiben der Wandungstemperatur hinter der Dampftemperatur abnimmt. So zeigt uns denn Zahrentafel 17 für gesättigten Dampf schon bei 200° C Dampftemperatur eine Wärmeersparnis durch die Isolierung I von 85,4 vH, während bei überhitztem Dampf erst bei 400° C eine Wärmeersparnis von 84,7 vH erreicht wird.

Zahlentafel 31.  
Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  der Isolierung I und Ziffer  $K'$  des Wärmeüberganges von der Isolierung an die Luft.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temperaturgefälle				stündliche Wärmesparnis durch die Flanschisole- rung, bezogen auf 1 qm Oberfläche der gesamten nackten Leitung	Wärmeverluste			Wärme- leitfähigkeit der Isolierung $\lambda$	Wärme- übergangs- ziffer zwischen Um- hüllung und Luft $K'$
zwischen Dampf und Luft $^{\circ}\text{C}$	zwischen Dampf und Rohrwand $^{\circ}\text{C}$	zwischen Isolierungs- oberfläche und Luft $^{\circ}\text{C}$	in der Isolierung $^{\circ}\text{C}$		durch die Flansche, be- zogen auf 1 qm nackte Leitungs- oberfläche  WE	durch den umhüllten Teil der Rohrleitung, bezogen auf 1 qm Rohr- oberfläche, ab- züglich Flanschverlust  WE	1 qm der Isolierungs- oberfläche  WE		
100	1,5	14,1	84,4	83	100	195	81	0,089	5,7
125	2,0	18,6	104,4	114	137	256	106	0,094	5,7
150	2,6	23,1	124,3	143	172	323	134	0,100	5,8
175	3,2	27,5	144,3	176	211	399	162	0,104	5,9
200	3,8	32,0	164,2	220	263	477	198	0,113	6,2
225	4,4	36,5	184,1	260	310	560	233	0,117	6,4
250	5,1	41,0	203,9	310	369	646	268	0,122	6,6
275	6,0	45,4	223,6	350	416	754	314	0,130	6,9
300	6,8	49,9	243,3	400	475	855	356	0,136	7,1
325	7,6	54,4	263,0	460	544	956	398	0,140	7,3
350	8,4	58,9	282,7	520	613	1067	443	0,146	7,5
375	9,4	63,3	302,3	576	680	1190	494	0,152	7,8
400	10,4	67,8	321,8	633	746	1319	548	0,158	8,1

7) Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  der Isolierung I.

In gleicher Weise wie aus den Ergebnissen der Versuche mit gesättigtem Dampf wurden auch aus den mit überhitztem Dampf gewonnenen Versuchswerten die Wärmeleitfähigkeiten  $\lambda$  der untersuchten Isolierung I bestimmt.

Die ermittelten Werte sind in Spalte 9 der Zahlentafel 31 zusammengestellt. Dieser ist zu entnehmen, daß  $\lambda$  in dem Untersuchungsgebiet von 100 bis 400° von 0,089 bis 0,158 wächst. Auf das Anwachsen von  $\lambda$  mit der Temperatur wurde schon bei der Besprechung der mit gesättigtem Dampf durchgeführten Versuche hingewiesen. Diese Eigenschaft war allen Isolierungen, wenn auch in verschiedenem Maße, gemeinsam. Das erhebliche Anwachsen von  $\lambda$  verlangsamt naturgemäß auch die Wärmeersparnis mit zunehmender Temperatur. Für die Beurteilung von Isoliermitteln wäre es von größter Bedeutung, wenn der Einfluß der Temperatur auf  $\lambda$  für das durch die allgemeine Anwendung der Dampfüberhitzung wesentlich erweiterte Temperaturgebiet bestimmt würde.

8) Ziffer  $K'$  des Wärmeüberganges von der Isolierung an die Luft.

In gleicher Weise wie die Werte  $\lambda$  hat man auch  $K'$  für das Temperaturgebiet von 100 bis 400° C auf Grund der Versuchswerte berechnet.

Auch  $K'$  wächst erheblich mit der Temperatur der Isolierungsoberfläche bzw. mit dem Temperaturgefälle zwischen Isolierung und Luft. Für das Temperaturgefälle von 100° zwischen Dampf und Luft betrug das Temperaturgefälle zwischen Isolierung und Luft 14,1° C, und  $K'$  war = 5,7. Bei 400° C Unterschied zwischen Dampf- und Lufttemperatur ist das Gefälle zwischen Isolierung und Luft auf 67,8° C gestiegen, und  $K'$  hat sich auf 8,1 erhöht.

Die Wärmeübertragung von der Isolierung an die Luft erfolgt durch Berührung und Strahlung, und das Anwachsen von  $K'$  mit der Temperatur wird jedenfalls zu einem großen Teil der Strahlung zuzuschreiben sein; ob und in welchem Maße sich auch die Uebergangsziffer durch Berührung ändert, konnte nicht festgestellt werden. Nach der von Rosetti aufgestellten Formel

$$K' = k + 0,5 \left[ \left( \frac{T}{100} \right)^2 - 1,9 \right]$$

würde der Strahlungseinfluß allein schon genügen, um das festgestellte Anwachsen von  $K'$  herbeizuführen. Bei 20° Lufttemperatur beträgt die Temperatur der Isolierung bei 14,1° Gefälle zwischen Isolierung und Luft 14,1 + 20 = 34,1°; hierfür berechnet sich der Strahlungsanteil zu

$$0,5 \left[ \left( \frac{273 + 34,1}{100} \right)^2 - 1,9 \right] = 3,8;$$

für 67,8° Temperaturgefälle zwischen Isolierung und Luft ist der Anteil

$$0,5 \left[ \left( \frac{273 + 87,8}{100} \right)^2 - 1,9 \right] = 5,6.$$

Die Steigerung des Wärmeüberganges durch Strahlung beträgt somit 5,6 - 3,8 = 1,8, während sich aus den Versuchsergebnissen eine Steigerung 8,1 - 5,7 = 2,4 berechnet.

Die Wärmeübergangsziffer durch Berührung berechnet sich hieraus für die beiden Grenzwerte zu  $k = 5,7 - 3,8 = 1,9$  und  $k = 8,1 - 5,6 = 2,5$ .

Diese Steigerung des Wertes  $k$  kann durch die bei höheren Temperaturen eintretende stärkere Luftbewegung in der Nähe der Rohrleitung verursacht sein.

Vierter Abschnitt.

**Spannungsverlust bei der Fortleitung gesättigten und überhitzten Dampfes.**

1) Spannungsverluste in der Leitung.

Zunächst beabsichtigte man, die Spannungsverluste in der Leitung mit sorgfältig geeichten Federkontrollmanometern an der ganzen rd. 50 m langen Leitung zu messen. Das mit den erreichbaren Dampfgeschwindigkeiten eintretende Druckgefälle war aber viel zu gering, um mit diesen Geräten die erforderliche Genauigkeit erzielen zu können. Man führte deshalb nur 2 Versuche in dieser Weise durch, während alle weiteren an der Leitungsschleife *bc* mit einem Quecksilber-Differenzmanometer nach Fig. 11 vorgenommen wurden. An den Meßflanschen am Anfang und Ende der Leitung saßen kleine Gefäße mit Ueberlaufrohr, so daß die von ihnen zum Manometer führenden Leitungen stets ganz mit Wasser gefüllt waren. Bei Versuchen mit hoher Ueberhitzung war die Wärmezufuhr zu den Gefäßchen so groß, daß nur durch starke Kühlung die Wasserfüllung sicher zu erhalten war. Man überzeugte sich von der richtigen Füllung der Zuführröhrchen mit Wasser dadurch, daß man vor Beginn und nach Schluß eines jeden Versuches das Dampfventil am Ende der Leitung schloß und nun feststellte, ob der Unterschied im Quecksilberstand in beiden Schenkeln genau den Wassersäulen in beiden Röhrchen bis zum Ueberlauf in den Gefäßen entsprach. War dies nicht der Fall, so mußte der Versuch ausgeschaltet werden. Außer dem Druckverlust in der Meßstrecke wurde der wirkliche Dampfdruck am Ende der Meßstrecke bei höherem Drucke mit einem Federkontrollmanometer, bei geringerem mit einem Quecksilbermanometer gemessen. Der Dampf strömte bei allen diesen Versuchen in die Luft ab; Spannung und Dampfgeschwindigkeit wurden während deren Dauer tunlichst unverändert erhalten.

Die Dampfmenge wurde bei allen diesen Versuchen durch die Speisewassermessung ermittelt.

Die Ergebnisse der Versuche sind in Zahlentafel 32 bis 34 zusammengestellt, und zwar enthält Zahlentafel 32 die mit Federmanometer an der ganzen Leitung gewonnenen Werte, während in den Zahlentafeln 33 und 34 die mit der Versuchsschleife *bc* und dem Quecksilber-Differenzmanometer erhaltenen Ergebnisse zusammengestellt sind.

Zahlentafel 32.

Versuche zur Bestimmung des Leitungswiderstandes  $\beta$ .

Messung des absoluten Spannungsverlustes  
der ganzen Leitung von 50,6 m mit Federmanometern.

Gesättigter Dampf.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Dauer des Versuches	Dampf- gewicht in 1 st	Dampfspannung			Span- nungs- verlust	Raum- inhalt von 1 kg Dampf	Dampf- geschwin- digkeit	Leitungs- wider- stand $\beta \times 10^8$
		am Anfang der Leitung	am Ende der Leitung	mittlere Dampf- spannung				
st	kg	kg/qcm	kg/qcm	kg/qcm	kg/qcm	cbm/kg	m/sk	
1,08	1716,5	6,36	6,01	6,19	0,35	0,307	38,0	10,3
1,02	1920,5	3,85	3,04	3,45	0,81	0,531	73,6	11,0

Zahlentafel 33. Versuche zur Bestimmung des Leitungswiderstandes  $\beta$ .  
Messung des Differenzspannungsverlustes in der Schleife von 26,6 m.  
Gesättigter Dampf.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Dauer des Versuches st	Dampf- gewicht in 1 st kg	Spannungsverlust in der Schleife		Spannung am Ende der Schleife (Ueberdruck)		absolute mittlere Dampf- spannung		Rauminhalt von 1 kg Dampf cbm/kg	Dampf- geschwindig- keit m/sk	Leitungs- widerstand $\beta \times 10^8$
		mm Q.-S.	kg/qcm	mm Q.-S.	kg/qcm	kg/qcm	Feder- manometer kg/qcm			
1,00	506,4	7,4	0,0101	—	—	9,26	10,26	0,191	6,48	10,39
1,00	604,9	11,5	0,0156	—	—	9,06	10,07	0,195	8,51	11,08
1,00	451,6	8,8	0,0119	—	—	6,43	7,44	0,258	8,41	11,41
1,00	512,6	11,0	0,0150	—	—	6,35	7,36	0,261	9,65	11,04
1,50	585,9	31,1	0,0423	1468,5	1,997	1,96	3,018	0,603	25,50	10,32
1,00	592,9	32,2	0,0438	—	—	1,99	3,01	0,604	25,85	10,41
1,23	610,8	32,1	0,0437	—	—	2,14	3,16	0,577	25,44	10,24
1,00	887,6	68,0	0,0925	—	—	2,18	3,23	0,565	36,20	10,49
1,25	915,4	73,1	0,0994	1618,8	2,202	2,16	3,251	0,562	37,14	10,66

Zahlentafel 34. Versuche zur Bestimmung des Leitungswiderstandes  $\beta$ .  
Messung des Differenzspannungsverlustes in der Schleife von 26,6 m mit Quecksilbermanometer.  
Ueberhitzter Dampf.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Dauer des Ver- suches st	Dampf- gewicht in 1 st kg	Spannungsverlust in der Schleife		Spannung am Ende der Schleife (Ueberdruck)		absolute mittlere Dampf- spannung		Dampftemperatur		mittlere Ueber- hitzung $^{\circ}\text{C}$	Raum- inhalt von 1 kg Dampf cbm/kg	Dampf- geschwin- digkeit m/sk	Leitungs- wider- stand $\beta \times 10^8$	
		mm Q.-S.	kg/qcm	mm Q.-S.	kg/qcm	mm Q.-S.	kg/qcm	kg/qcm	kg/qcm					Ende der Schleife $^{\circ}\text{C}$
1,5	1040,4	53,0	0,0721	—	—	6,51	7,55	274,8	264,5	269,7	102,6	0,33	24,8	10,19
1,5	866,7	79,6	0,1032	1672,5	2,275	—	3,329	231,3	219,2	225,3	88,9	0,70	43,7	10,55

Der Berechnung des Druckverlustes wird die bekannte Gleichung

$$z = \beta \gamma \frac{l}{d} v^2$$

zugrunde gelegt; hierin bedeutet:

- $z$  den Druckverlust in kg/qem in der ganzen Leitung,
- $\gamma$  das spezifische Gewicht des Dampfes,
- $l$  die Länge der Leitung in m,
- $d$  den Durchmesser der Leitung in m,
- $v$  die mittlere Dampfgeschwindigkeit in m,
- $\beta$  den Leitungswiderstand.

Die Versuche wurden mit Dampfgeschwindigkeiten von 7 bis 74 m, mit gesättigtem Dampf von 3 bis 10 kg/qm abs. und mit überhitztem Dampf bis zu 100° C Ueberhitzung durchgeführt. Für alle diese Versuche lag der Wert  $\beta \times 10^8$  zwischen 10 und 11. Irgend eine Gesetzmäßigkeit für die Veränderung des Wertes  $\beta$  mit dem Dampfdruck, der Dampfgeschwindigkeit oder der Ueberhitzung konnte nicht gefunden werden.

Sonach kann der Wert  $\beta$  für gesättigten und überhitzten Dampf und für das ganze durch die Versuche beherrschte Meßgebiet als unveränderlich angesehen werden.

Der Mittelwert aus den sämtlichen Versuchen ergibt sich zu  $\beta = \frac{10,55}{10^8}$ .

Schiede man die zweifellos weniger sicheren Werte, die mit Dampfgeschwindigkeiten unter 10 m gewonnen wurden, aus, so ergäbe sich  $\beta$  noch kleiner, nämlich zu  $\beta = \frac{10,43}{10^8}$ ; sonach dürfte es berechtigt sein, für  $\beta$  den Wert

$$\beta = 10,5 \times 10^{-8}$$

in die Formel einzusetzen.

Bisher wurde auf Grund der Gutermuthschen Versuche mit dem Wert  $\beta = 15 \times 10^{-8}$  gerechnet; dieser ist sonach um mehr als 40 vH höher als der richtige Wert. Der neu bestimmte Wert für  $\beta$  findet eine Stütze in andern in der Zwischenzeit durchgeführten Versuchen, die ebenfalls wesentlich kleinere Werte für  $\beta$  geliefert haben.

Die verbreitete Annahme, daß überhitzter Dampf bei gleichen Dampfgeschwindigkeiten kleinere Druckverluste ergäbe als gesättigter, wird also durch diese Versuchsergebnisse nicht bestätigt. Die Begründung zu der irrthümlichen Anschauung liegt in folgendem: Man hat früher die Dampfleitungen, insbesondere solche zu Maschinen, wesentlich reicher bemessen, also viel kleinere Geschwindigkeiten zugelassen. Mit dem Uebergang zur Dampfüberhitzung war man gezwungen, um den Temperaturverlust in der Leitung möglichst klein zu erhalten, die Dampfgeschwindigkeit zu steigern, und da hierbei die Druckverluste noch in sehr annehmbaren Grenzen blieben, schrieb man dem überhitzten Dampf die Eigenschaft zu, geringere Druckverluste zu geben als der gesättigte. Die Versuche haben nun gezeigt, daß der Druckverlust bei beiden Dampfarten gleich groß und daß er wesentlich geringer ist, als nach den bisherigen Erfahrungen angenommen wurde.

Der hier festgestellte Wert für  $\beta$  gilt für die glatte Leitung ohne Berücksichtigung sonstiger Widerstände.

## 2) Spannungsverlust beim Durchgang durch ein Ventil.

Während man bei Hochdruckdampfleitungen scharfe Krümmungen, Eckstücke u. dergl., welche zu Druckverlusten Anlaß geben können, tunlichst vermeidet, wird mit dem Druckverlust der Absperrventile stets zu rechnen sein. Man hat deshalb

mit einem solchen Versuche über den Spannungsverlust vorgenommen, deren Ergebnisse in Zahlentafel 35 zusammengestellt sind. Die Messungen selbst fanden in der gleichen Weise wie bei der Rohrleitungsschleife statt; vor und hinter dem Ventil wurden die Niveaugefäßen des Differenzmanometers angeschlossen und so der Druckverlust gemessen. Aus den Versuchsergebnissen hat man unter Benutzung des Wertes für den Leitungswiderstand  $\beta = 10,5 \cdot 10^{-8}$  die Leitungslänge berechnet, die den gleichen Widerstand haben würde wie das Ventil; dabei ergab sich eine Leitungslänge von 16,4 m.

Zahlentafel 35.

Versuche zur Bestimmung des Widerstandes eines Ventiles.

1	2	3	4	5	6
Dauer des Versuches	absolute Dampfspannung vor dem Ventil	Spannungsverlust durch das Ventil	Dampfgewicht in 1 st	Dampfgeschwindigkeit	Ventilwiderstand, ausgedrückt in m Rohrlänge
st	kg/qcm	kg/qcm	kg	m/sk	m
1,27	10,09	0,0109	668	9,37	16,1
1,11	10,86	0,0277	1081	14,14	16,7

Zusammenfassung.

Die Ergebnisse der im vorstehenden besprochenen Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1) Der Wärmeverlust nackter Dampfleitungen hängt von der Wandungstemperatur der Leitung und der Temperatur der sie umgebenden Luft ab. Die Veränderung des Wärmeüberganges mit diesen Temperaturen erfolgt unter Berücksichtigung des Wärmeverlustes durch Berührung und Leitung nach dem Stefan-Boltzmannschen Strahlungsgesetz.

2) Die Wandungstemperaturen können bei nackten Rohrleitungen und gesättigtem Dampf der Dampftemperatur gleich gesetzt werden; bei überhitztem Dampf bleiben sie hinter der Dampftemperatur zurück, und zwar wächst der Unterschied mit abnehmender Dampfgeschwindigkeit.

3) Aus diesem Grunde ist bei gesättigtem Dampf die Dampfgeschwindigkeit auf den Wärmeverlust nicht von Einfluß; bei überhitztem Dampf steigt der Wärmeverlust mit der Dampfgeschwindigkeit.

4) Der Wärmeverlust nackter Rohrleitungen ist von der Außenfläche der Leitung abhängig; für die Verlustberechnung kann der Anteil der Flansche nach ihrer wirklichen Oberfläche ermittelt werden.

5) Der Wärmeverlust für die Flächeneinheit nackter Rohrleitungen ist für das untersuchte Gebiet von 70 bis 150 mm von dem Leitungsdurchmesser unabhängig.

6) Die Wärmeersparnis durch eine bestimmte Isolierung hängt ab von der Dampftemperatur, der Lufttemperatur, dem Leitungsdurchmesser und bei überhitztem Dampf auch von der Dampfgeschwindigkeit. Vergleiche verschiedener Isolierstoffe sind deshalb nur richtig, wenn diese Einflüsse entsprechende Berücksichtigung finden.

7) Das Wärmeleitvermögen  $\lambda$  aller untersuchten Isoliermittel wächst mit der Temperatur.

8) Die Ziffer  $K'$  des Wärmeüberganges von der Isolierung an die umgebende Luft wächst ebenfalls mit der Temperatur der Oberfläche der Isolierung, und zwar hauptsächlich infolge des Strahlungseinflusses, der nach der Rosettischen Formel berücksichtigt werden kann.

9) Die üblichen Wasserabscheider und selbsttätigen Wasserableiter sind für die Durchführung von Wärmeverlustbestimmungen an Rohrleitungen unbrauchbar.

10) Ueberhitzter Dampf kondensiert in Rohrleitungen nicht, solange deren Wandungstemperatur über der Sättigungstemperatur des Dampfes bleibt.

11) Auch bei überhitztem Dampf ist nach den Versuchen an der Leitung von 150 mm Dmr. die Dampftemperatur im ganzen Rohrquerschnitt annähernd gleich. Der festgestellte Abfall nach der Wandung hin kann für technische Zwecke vernachlässigt werden.

12) Der Druckverlust bei der Fortleitung gesättigten und überhitzten Dampfes ist bei gleichen Dampfgeschwindigkeiten gleich. Die Widerstandsziffer, die bisher zu  $\beta = \frac{15}{10^8}$  angenommen wurde, ist nach den vorliegenden Versuchen für gesättigten und überhitzten Dampf  $\beta = \frac{10,5}{10^8}$ .

### Zahlenbeispiele.

Durch die folgenden Zahlenbeispiele soll die Anwendung der Versuchsergebnisse bei der Berechnung von Dampfleitungen gezeigt werden.

#### Beispiel I.

Für eine 800- bis 1000pferdige Kolbendampfmaschine, die mit überhitztem Dampf betrieben wird, soll die Dampfleitung berechnet werden. Der Anfangsdruck im Kesselhaus beträgt 12 kg/qcm abs., die Dampftemperatur 320° C. Die Längenabmessungen der Leitung sind aus Fig. 40 zu erkennen. Die Leitung wird zu-



Fig. 40.

nächst mit 50 m Länge durch einen Kanal geführt und erhält auf dieser Strecke 10 Flansche; hieran schließt sich der Wasserabscheider, ein Absperrventil und ein Verteilungs-Rohrstück von 12 m Länge mit 6 Flanschen. Es soll der Leitungsdurchmesser sowie der Wärmeverlust der nackten und der umhüllten Leitung ermittelt werden.

#### a) Berechnung des Leitungsdurchmessers.

Bei 30 vH Füllung im Hochdruckzylinder der Maschine berechnet sich aus dem Querschnitt und der größten Geschwindigkeit des Kolbens während der Einströmzeit eine stündliche Dampfmenge von 22000 kg. Der mittlere stündliche Dampfverbrauch der Maschine wird zu 5000 kg angenommen; die größte Dampfgeschwindigkeit wird sonach das 4,4fache der mittleren betragen.

Der Leitungsdurchmesser soll so ermittelt werden, daß auch bei der größten Dampfgeschwindigkeit der Druckverlust in der Leitung 0,75 kg/qcm nicht übersteigt; bei der Durchführung der Berechnung wird die zu ungünstige Annahme gemacht, daß der Dampf in der Leitung nicht expandiert.

Der Leitungsdurchmesser ist mit Benutzung der Formel

$$z = \beta \gamma \frac{l}{d} v^2$$

zu berechnen; hierbei ist nach unsern Versuchen

$$\beta = \frac{10,5}{10^8}.$$

Das spezifische Gewicht  $\gamma$  des Dampfes ist bei einer mittleren Temperatur von  $310^\circ \text{C}$  in der Leitung und einem mittleren Druck von  $11,65 \text{ kg/qcm}$  abs.

$$\gamma = 4,28.$$

Die Leitungslänge  $l$  setzt sich zusammen aus den beiden Leitungsstücken und dem Ventil, für das nach unsern Versuchen eine Länge von  $16,4 \text{ m}$  einzusetzen ist:

$$l = 50 + 12 + 16,4 = 78,4 \text{ m.}$$

$$v = \frac{G_s (\text{max})}{3600 \frac{d^2 \pi}{4} \gamma} = \frac{22\,000}{3600 \frac{d^2 \pi}{4} \gamma}$$

$$0,75 = \frac{10,5}{10^8} \cdot 4,28 \cdot \frac{78,4}{d} \left( \frac{22\,000}{3600 \frac{d^2 \pi}{4} \cdot 4,28} \right)^2$$

$$d = 0,173 \text{ m.}$$

Demnach wird man die Leitung mit  $d = 175 \text{ mm Dmr.}$  ausführen. Die mittlere Dampfgeschwindigkeit berechnet sich dann zu  $13,5 \text{ m.}$

#### b) Wärmeverlust in der nackten Leitung.

Bezeichnet

$F$  die Leitungsoberfläche in qm

$\alpha$  den Temperaturverlust in der Leitung

$t_a$  die Dampftemperatur am Anfang der Leitung

$t_l$  die Lufttemperatur

$G_s$  die stündliche Dampfmenge

$K$  die Ziffer des Wärmeüberganges zwischen Dampf und Luft

$c_{pm}$  die mittlere spezifische Wärme,

so besteht die Gleichung

$$F K \left( t_a - \frac{\alpha}{2} - t_l \right) = G_s c_{pm} \alpha.$$

Um  $K$  und  $c_{pm}$  zu wählen, muß man für  $\alpha$  zunächst eine Annahme machen und nach dieser aus den Fig. 36 und 37 die Werte  $c_{pm}$  und  $K$  bestimmen.

Berechnet man zunächst den Verlust in der glatten Rohrleitung von  $50 \text{ m}$  Länge mit  $10$  Flanschen, so ergibt sich für den angenommenen Wert  $\alpha = 60$  nach den Figuren 36 und 37

$$c_{pm} = 0,50$$

$$K = 18,6.$$

Die Oberfläche  $F$  dieser Leitungsstrecke beträgt

$$F = 30,9 \text{ qm;}$$

ferner ist

$$G_s = 5000 \text{ kg}$$

$$t_a = 320^\circ \text{C}$$

$$t_l = 20^\circ \text{C.}$$

Damit berechnet sich  $\alpha = 62^\circ \text{C.}$

Am Ende der  $50 \text{ m}$  langen Leitung beträgt sonach die Dampftemperatur noch  $320 - 62 = 258^\circ \text{C.}$

Nun ist der Verlust im Wasserabscheider, im Ventil, 12 m Verteilungsleitung mit 6 Flanschen zu bestimmen.

Die Oberfläche des Wasserabscheiders beträgt . . . . . 1,85 qm  
 » » » Ventiles (= 1 m Leitungslänge) beträgt . 0,59 »  
 » » » der 12 m-Leitung mit 6 Flanschen beträgt . 7,95 »  
 insgesamt  $F = 10,39$  qm

Die Anfangstemperatur des Dampfes ist  $258^{\circ}\text{C}$ ; nimmt man  $x = 20^{\circ}$  an, so ergeben sich  $c_{pm}$  und  $K$  aus Fig. 36 und 37 zu 0,512 bzw. 17,1. Der Temperaturabfall  $x$  in diesem Teile der Rohrleitung berechnet sich somit aus der Formel

$$10,39 \cdot 17,1 \left( 258 - \frac{x}{2} - 20 \right) = 5000 \cdot 0,512 x$$

zu  $x = 16^{\circ}\text{C}$ .

Der gesamte Temperaturabfall in der nackten Leitung beträgt also  $78^{\circ}\text{C}$ , wovon  $62^{\circ}$  auf die Hauptleitung und  $16^{\circ}$  auf den Wasserabscheider und das Verteilstück an der Maschine entfallen.

Der Gesamtwärmeverlust der nackten Leitung ist demnach

$$Q = 78 \cdot 0,503 \cdot 5000 = 196\,000 \text{ WE.}$$

Dabei ist 0,503 die mittlere spezifische Wärme für das ganze Verlustgebiet.

c) Wärmeverlust der umhüllten Leitung mit umhüllten Flanschen.

Bei dieser Berechnung wird angenommen, daß die ganze Leitung einschließlich der Flansche und des Ventiles gut umhüllt sei, und zwar die Leitung mit einer 70 mm starken Umhüllung von  $\lambda = 0,150$ ; die Flanschen- und Ventilmhüllung gebe die gleiche Wärmeersparnis wie die Leitungsumhüllung.

Es sei:

die Dampftemperatur beim Eintritt in die Leitung . . . . .  $t_a = 320^{\circ}\text{C}$   
 die Lufttemperatur . . . . .  $t_l = 20^{\circ}\text{C}$   
 die Uebergangsziffer vom Dampf zur Rohrwand . . . . .  $\alpha_1 = 150$   
 die Uebergangsziffer von der Umhüllung an die Luft  $K' = 7$   
 der innere Durchmesser der Rohrleitung . . . . .  $d_1 = 175 \text{ mm}$   
 » äußere » » » . . . . .  $d_2 = 187 \text{ »}$   
 » » » » Umhüllung . . . . .  $d_3 = 327 \text{ »}$   
 die Wärmeleitziffer » » . . . . .  $\lambda = 0,15$   
 der Temperaturverlust in der Rohrleitung . . . . .  $x = ?$

Dann ist der Wärmeverlust für 1 qm umhüllte Leitung, auf die Oberfläche der nackten Rohrleitung bezogen:

$$Q = \frac{t_a - \frac{x}{2} - t_l}{\frac{1}{\alpha_1} \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{K'} \frac{d_2}{d_3} + \frac{d_2}{2\lambda} \ln \left( \frac{d_3}{d_2} \right)}$$

Dabei ist der Verlust beim Durchgang durch die Rohrwandung selbst vernachlässigt.

Die gesamte Rohroberfläche  $F$  beträgt nach früheren

$$F = 30,9 + 10,4 = 41,3 \text{ qm.}$$

Es ist nun

$$FQ = c_{pm} G_s x$$

$$41,3 \cdot \frac{320 - \frac{x}{2} - 20}{\frac{1}{150} \cdot \frac{187}{175} + \frac{1}{7} \cdot \frac{187}{327} + \frac{0,187}{0,3} \ln \frac{327}{187}} = 5000 \cdot 0,5 x$$

$x = 11,1^{\circ}\text{C}$ .

Der Gesamtwärmeverlust der umhüllten Leitung berechnet sich somit zu

$$Q = 11,1 \cdot 0,50 \cdot 5000$$

$$Q = 27\,800 \text{ WE.}$$

Die Wärmeersparnis durch die Umhüllung beträgt also

$$\eta = \frac{196\,000 - 27\,800}{196\,000} = 0,86.$$

d) Wärmeverlust der umhüllten Leitung mit nackten Flanschen und nacktem Ventil.

Sehr häufig werden die Flansche und Ventile nicht umhüllt; es soll deshalb der Einfluß der Umhüllung dieser Teile auf den Wärmeverlust an diesem Beispiel ebenfalls gezeigt werden.

Bleibt bei jedem Flansch eine Gesamtröhrlänge von 200 mm frei, so beträgt die nackte Fläche bei jedem Flansch 0,267 qm. Die Dampftemperatur beträgt beim ersten Flansch 320°, beim letzten etwa 300° C. Nach Zahlentafel 27 ist sonach  $K = 19$  zu setzen. Das Ventil hat eine Oberfläche von 1 m Röhrlänge, d. h. 0,59 qm. Die gesamte nicht umhüllte Fläche beträgt sonach

$$f = 16 \cdot 0,267 + 0,59 = 4,86 \text{ qm,}$$

der Gesamtwärmeverlust der nicht umhüllten Fläche also

$$Q = 19 \cdot 4,86 (310 - 20)$$

$$= 26\,800 \text{ WE.}$$

Da die Wärmeersparnis bei der ganz umhüllten Leitung 86 vH ausmacht, so ergibt sich durch die nackten Stellen ein Mehrverlust von

$$0,86 \cdot 26\,800 = 23\,000 \text{ WE.}$$

Der Gesamtwärmeverlust der umhüllten Leitung mit nackten Flanschen und nacktem Ventil beträgt sonach

$$27\,800 + 23\,000 = 50\,800 \text{ WE.}$$

Der Temperaturverlust  $x$  in der Leitung ist also

$$x = \frac{50\,800}{5000 \cdot 0,5}$$

$$x = 20,3^\circ \text{ C.}$$

Die Wärmeersparnis bei dieser Umhüllungsart ist gegenüber der nackten Leitung

$$\eta = \frac{196\,000 - 50\,800}{196\,000} = 0,74.$$

Die Hauptergebnisse der Wärmeverlustberechnungen sind in der Zahlentafel 36 zusammengestellt.

Zahlentafel 36.  
Ergebnisse der Wärmeberechnung.

Art der Umhüllung	Temperatur-	Wärmeverlust	Wärmeer-
	verlust		sparnis
	°C	WE	vH
nackte Leitung . . . . .	78	196 000	—
ganz umhüllte Leitung . . . . .	11,1	27 800	86
Leitung umhüllt, Flansche und Ventil frei .	20,3	50 800	74

Auch diese Ergebnisse zeigen den großen Einfluß der Flanschenumhüllung auf die Wärmeersparnis. Der nach Umhüllung der Leitung ohne Flansche verbleibende

stündliche Wärmeverlust von 50 800 WE wird durch die Flanschenverkleidung auf 27 800 WE vermindert, also um weitere 23 000 WE.

Die jährliche Wärmeersparnis berechnet sich bei täglich 12 Betriebsstunden und 300 Arbeitstagen zu

$$300 \cdot 12 \cdot 23\,000 = 82\,800\,000 \text{ WE.}$$

Die Kohlenkosten zur Erzeugung von 100 000 WE in Dampf dürften in Deutschland durchschnittlich 40 Pfg betragen; die jährliche Kohlenersparnis durch die Flanschenumhüllung beläuft sich daher auf

$$828 \cdot 0,40 = 331,20 \text{ } \mathcal{M}.$$

Da die Kosten für die Verkleidung von 16 Flanschen und einem Ventil bei sorgfältigster Ausführung 150  $\mathcal{M}$  nicht übersteigen, so wird dieses Anlagekapital schon durch die Kohlenersparnis eines halben Betriebsjahres gedeckt.

### Beispiel II.

Für die Fortleitung von 5000 kg Dampf in der Stunde auf eine Entfernung von 500 m soll die erforderliche Leitung berechnet werden. Der Dampfdruck betrage beim Eintritt in die Leitung 10 kg/qcm abs.; am Ende ist noch ein Dampfdruck von 3 kg/qcm erforderlich. Die Leitung wird mit einer 50 mm starken Umhüllung, deren Wärmeleitziffer  $\lambda = 0,100$  beträgt, umgeben.

Es soll der Leitungsdurchmesser und der Wärmeverlust berechnet werden.

#### a) Berechnung des Durchmessers der Leitung.

Für die Berechnung des Leitungsdurchmessers wird die vereinfachende Annahme gemacht, daß das Dampfgewicht in der Leitung unveränderlich sei; es wird also dem Kondensverlust nicht Rechnung getragen; diese Annahme ist für gut umhüllte Leitungen zulässig.

Der Druckverlust in einer Leitung ist nach Absatz 1) des vierten Abschnittes:

$$z = \frac{10,5}{10^8} \gamma \frac{l}{d} v^2.$$

Die Dampfgeschwindigkeit ist

$$v = \frac{G_s}{3600} \frac{1}{\gamma} \frac{1}{\frac{d^2 \pi}{4}}$$

oder, in obige Gleichung eingesetzt,

$$z = \frac{131,3}{10^{16}} \frac{G_s^2 l}{d^5 \gamma}.$$

Für eine Annäherungsrechnung ist einzusetzen:

$$G_s = 5000 \text{ kg,}$$

$$l = 500 \text{ m,}$$

$$\gamma = 3,41 \text{ (mittleres spez. Gewicht für } p = \frac{10+3}{2} = 6,5 \text{ kg/qm abs.),}$$

$$z = 7 \text{ kg/qcm.}$$

Es ist angenommen, daß die Leitung auf die ganze Länge keine Ventile und sonstige Ausrüstungsteile enthält. Mit den angegebenen Werten berechnet sich

$$d \text{ rd. } 93 \text{ mm.}$$

Für einen Leitungsdurchmesser von 100 mm ergibt sich ein Druckverlauf nach Fig. 41. Man könnte die Leitung etwa zur ersten Hälfte mit 90 mm und in der

zweiten Hälfte mit 100 mm Dmr. ausführen; dabei würde man annähernd einen Enddruck von 3 kg/qcm abs. erreichen. Der Druckverlauf ist für beide Fälle dargestellt. Mit Rücksicht auf den Einbau von Ventilen und sonstigen Ausrüstungsteilen, die einen weiteren Druckverlust bedingen, soll jedoch der Durchmesser von 100 mm beibehalten werden.

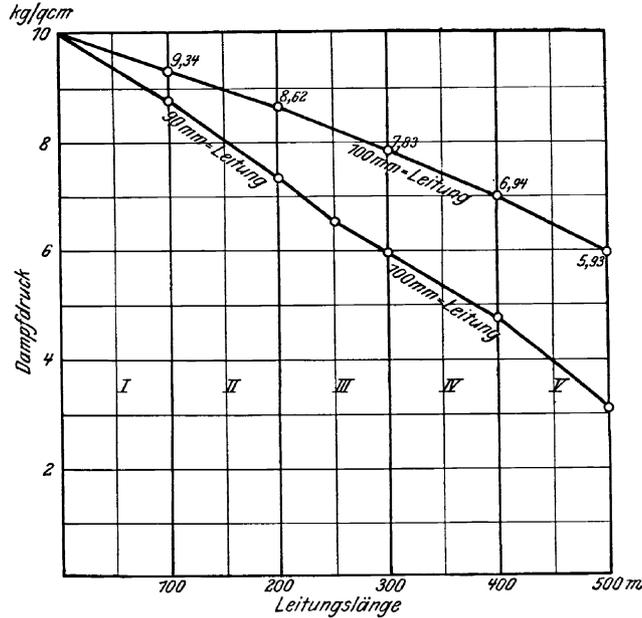


Fig. 41.

b) Berechnung des Wärmeverlustes der nackten Leitung.

Die Leitung hat bei 100 mm lichtem Durchmesser und 108 mm äußerem Durchmesser sowie 100 Flanschen auf 500 m Länge eine äußere Fläche von rd. 180 qm. Zur Berechnung des Wärmeverlustes wird die ganze Leitung in 5 gleiche Teile geteilt. Für jede Teilstrecke ergeben sich die Anfangs- und Enddrücke aus Fig. 41, die Werte *K* für den Wärmeübergang sind der Fig. 23 und der Zahlentafel 7 entnommen.

Die so berechneten Werte sind mit allen Einzelheiten in Zahlentafel 37 zusammengestellt.

Zahlentafel 37.

Wärmeverlust der nackten Leitung.

Nummer des Feldes	I	II	III	IV	V
Oberfläche der Leitung . qm	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0
Dampfdruck am Anfang . . . . kg/qm abs.	10,0	9,34	8,62	7,83	6,94
Dampfdruck am Ende »	9,34	8,62	7,83	6,93	5,93
» im Mittel »	9,67	8,98	8,23	7,38	6,44
Dampftemperatur . . . °C	177	174	171	166	161
Wärmeübergangszahl <i>K</i> . WE	14,8	14,7	14,6	14,4	14,2
Temperaturgefälle zwischen Dampf und Luft . . °C	157	154	151	146	141
Wärmeverlust. . . . WE	83 600	81 500	79 400	75 700	72 000

Der Gesamtwärmeverlust der Leitung beträgt sonach 392 200 WE.

Es ist nun festzustellen, welche Dampfmenge am Ende der nackten Leitung von den zugeführten 5000 kg noch zur Verfügung steht; dabei wird angenommen, daß das Dampfwasser mit der Dampftemperatur abfließt.

Bezeichnet man mit

- $G_1$  das Dampfgewicht am Anfang der Leitung,
- $G_2$  » » » Ende » » ,
- $s_1$  die Gesamtwärme am Anfang » » ,
- $s_2$  » » » Ende » » ,
- $q_2$  » Flüssigkeitswärme am Ende » » ,

so gilt für das Ende der Leitung die Wärmeleichung

$$G_1 s_1 = G_2 s_2 + (G_1 - G_2) q_2 + 392\,200.$$

Hieraus berechnet sich mit

$$5000 \cdot 661 = G_2 \cdot 654 + (5000 - G_2) 159 + 392\,200$$

$$G_2 = 4278 \text{ kg.}$$

In der Leitung entstehen sonach  $5000 - 4278 = 722$  kg Dampfwater.

c) Wärmeverlust der vollständig umhüllten Leitung.

Die Leitung werde mit Wärmeschutzmasse mit der Wärmeleitziffer  $\lambda = 0,100$  in einer Stärke von 50 mm umhüllt. Die Flansche werden so umkleidet, daß die Wärmeersparnis derjenigen der Leitung gleich wird.

Für gesättigten Dampf ist die Uebergangsziffer zwischen Dampf und Rohrwand so groß, daß diesem Widerstand für den Wärmedurchgang dadurch Rechnung getragen werden kann, daß man die Temperatur der Außenfläche der Rohrwand  $t_w$  um  $1^\circ$  niedriger annimmt als die Dampftemperatur. So erhält man für den Wärmeverlust  $Q$  für 1 qm äußerer Rohroberfläche die einfache Gleichung

$$Q = \frac{t_w - t_l}{\frac{1}{K'} \frac{d_2}{d_3} + \frac{d_2}{2\lambda} \ln \left( \frac{d_3}{d_2} \right)}.$$

Dabei ist  $K' = 6$  die Wärmeübergangsziffer zwischen Umhüllung und umgebender Luft

$d_2 = 108$  mm der äußere Durchmesser der Rohrleitung,

$d_3 = 208$  mm der äußere Durchmesser der Umhüllung.

Die mit dieser Formel und den angenommenen Werten berechneten Wärmeverluste sind in der Zahlentafel 38 zusammengestellt.

Zahlentafel 38.  
Wärmeverlust der umhüllten Leitung.

Nummer des Feldes	I	II	III	IV	V
Oberfläche der Leitung. . qm	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0
Dampfdruck im					
Mittel . . . kg/qm abs.	9,67	8,98	8,23	7,38	6,44
Dampftemperatur ( $t_d$ ) . . °C	177	174	171	166	161
Wandungstemperatur ( $t_w$ ) . »	176	173	170	165	160
Lufttemperatur ( $t_l$ ) . . . »	20	20	20	20	20
Temperaturgefälle ( $t_w - t_l$ ) . »	156	153	150	145	140
Wärmeverlust . . . WE	12 700	12 500	12 300	11 800	11 400

Der Gesamtwärmeverlust der ganz umhüllten Leitung beträgt sonach 60 700 WE.

Die Wärmeersparnis durch die Umhüllung berechnet sich also zu

$$\gamma = \frac{392\,200 - 60\,700}{392\,200} = 0,85.$$

d) Wärmeverlust der umhüllten Leitung mit nackten Flanschen.

Werden die Flansche nicht umhüllt, so bleibt eine Leitungsoberfläche von 15 qm nackt. Die mittlere Dampftemperatur berechnet sich aus Zahlentafel 38 zu  $\frac{177+161}{2} = 169^{\circ} \text{C}$ ; dem entspricht ein Temperaturgefälle von  $149^{\circ} \text{C}$ . Nach Zahlentafel 7 ist für diese Dampftemperatur  $K = 14,5$ .

Der Wärmeverlust der nackten Rohrleitungsfläche beträgt somit

$$15 \cdot 14,5 \cdot 149 = 32\,400 \text{ WE.}$$

Da sich die Wärmeersparnis durch die Umhüllung zu 85 vH ergab, beträgt der Mehrverlust an Wärme durch die nackten Flansche nur  $0,85 \cdot 32\,400 = 27\,500 \text{ WE}$ . Der Gesamtverlust der umhüllten Leitung mit nackten Flanschen berechnet sich somit zu

$$60\,700 + 27\,500 = 88\,200 \text{ WE.}$$

Die Wärmeersparnisziffer für die umhüllte Leitung mit nackten Flanschen ergibt sich also zu

$$\eta = \frac{392\,200 - 88\,200}{392\,200} = 0,78.$$

Die Hauptergebnisse der Wärmeverlustberechnungen sind in Zahlentafel 39 zusammengestellt.

Zahlentafel 39.

Art der Umhüllung	Wärmeverlust	Wärmeer- sparnis
	WE	vH
nackte Leitung . . . . .	392 200	—
ganz umhüllte Leitung . . . . .	60 700	85
Leitung umhüllt, Flansche frei . . . . .	88 200	78

Ein Vergleich der vorstehenden Versuche mit seiner in Forschungshoft 44 entwickelten Formel führt Hrn. Biel zu folgendem Ergebnis:

Die 26,6 m lange Versuchstrecke bestand aus einer schmiedeisernen Rohrleitung von 70 mm l. Dmr., für die nach Forschungsheft 44 S. 27 der Rauheitsgrad II zugrunde gelegt werden darf. Der Druckhöhenverlust wurde bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Drücken bei gesättigtem und überhitztem Dampf gemessen. Die Endergebnisse für gesättigten Dampf sind in Zahlentafel 1 zusammengestellt.

Zahlentafel 1.

Schmiedeisernes Rohr.  $d = 0,07$  m;  $l = 26,6$  m. Gesättigter Wasserdampf.

1	2	3	4	5	6	7	8
beobachtet				berechnet			
absoluter mittlerer Druck	mittlere Geschwindigkeit $v$		$\beta \times 10^8$	$K = \frac{\beta \times 10^8}{40}$	$\frac{[\eta]}{\gamma} = [\eta] \times \text{Sp. 3} \times 1000$	Zähigkeitsglied $= \frac{5,38}{v} \times \frac{[\eta]}{\gamma}$	$K = 0,256 + \frac{5,38}{v} \times \frac{[\eta]}{\gamma}$
kg/qcm	m/sk	cbm/kg					
10,26	6,98	0,191	10,39	0,26	0,0186	0,0143	0,2603
10,07	8,51	0,195	11,08	0,277	0,019	0,012	0,268
7,44	8,41	0,258	11,41	0,287	0,0252	0,0161	0,2721
7,36	9,65	0,261	11,04	0,276	0,0254	0,0142	0,2702
3,018	25,5	0,603	10,32	0,258	0,0588	0,0124	0,2681
3,01	25,85	0,604	10,41	0,26	0,059	0,0122	0,2682
3,16	25,44	0,577	10,24	0,256	0,0562	0,019	0,2679
3,23	36,2	0,565	10,49	0,262	0,055	0,0082	0,2642
3,251	37,14	0,562	10,60	0,267	0,0547	0,0079	0,2639

Hr. Eberle ermittelt aus seinen Versuchen den Widerstandskoeffizienten  $\beta$  der Gutmuthschen Formel

$$z = \beta \gamma \frac{l}{d} v^2 \text{ kg/qcm (} l \text{ und } d \text{ in m, } \gamma \text{ in kg/cbm, } v \text{ in m/sk),}$$

oder

$$h = \frac{\beta 10^8 L v^2}{10 d} \text{ m Dampfsäule (} L \text{ in km).}$$

Nach der neuen Formel ist

$$h = \frac{4KLv^2}{d} \text{ m Dampfsäule,}$$

und es ergibt sich:

$$K = \frac{\beta 10^8}{40}.$$

Die hiernach aus den Versuchen ermittelten Werte  $K$  sind in Spalte 5 aufgeführt.

In Spalte 6 bis 8 sind zum Vergleich die nach der neuen Formel rechnerungsmäßig ermittelten Werte eingetragen. Setzt man in der neuen Formel:

$$K = a + \frac{2f}{\sqrt{d}} + \frac{2b[\eta]}{v\sqrt{d}\gamma}$$

$$d = 0,07 \text{ m}^1)$$

und

den Rauheitsfaktor  $f = 0,018$ ,

» Zähigkeitsfaktor  $b = 0,71$ ,

so erhält man:

$$K = 0,256 + \frac{5,38}{v} \frac{[\eta]}{\gamma}.$$

0,256 bedeutet den mit  $a_1$  bezeichneten Faktor des quadratisch mit der Geschwindigkeit wachsenden Hauptgliedes.

<sup>1)</sup> Zahlentafel 7, Forschungsheft 44 S. 41.

Der Zähigkeitskoeffizient des Wasserdampfes in absolutem Maß ist bei 20° und 735 mm ermittelt zu:

$$[\eta] = 0,0000975 \text{ } ^1).$$

Da weitere Beobachtungen m. W. nicht bekannt sind, so möge die Annahme gelten, daß dieser Wert auch für andre Drücke und Temperaturen richtig sei, eine Annahme, die nach dem Verhalten der Gase zu urteilen, keinen sehr bedeutenden Fehler enthalten dürfte. Hiermit sind die in Spalte 6, 7, 8 aufgeführten Werte  $\frac{[\eta]}{\gamma}$ ,  $\frac{538}{v} \frac{[\eta]}{\gamma}$  und  $K$  berechnet.

Man erkennt ohne weiteres, daß die berechneten Werte  $K$  innerhalb der Meßfehlergrenzen mit den beobachteten der Spalte 5 übereinstimmen. Ferner, daß das so berechnete Zähigkeitsglied bei den beobachteten Drücken und Geschwindigkeiten sehr klein und außerdem bei allen Versuchen nahezu unveränderlich ausfällt. Letzterer Umstand rührt daher, daß die niedrigen Geschwindigkeiten mit hohen Drücken und umgekehrt zusammenfallen. Hieraus erklärt sich die von Hrn. Eberle ausdrücklich hervorgehobene Unveränderlichkeit der Widerstandskoeffizienten, die mit den Beobachtungen an Wasser und atmosphärischer Luft in Widerspruch zu stehen scheint, in vollkommener Weise. Immerhin ist es vielleicht kein Zufall, daß gerade der höchste beobachtete Wert  $K$  mit dem höchsten berechneten Wert des Zähigkeitsgliedes zusammenfällt (dritter Versuch).

Die Versuche ergaben bei gesättigtem und überhitztem Wasserdampf praktisch gleiche Widerstandskoeffizienten. Dies Ergebnis entspricht der früher<sup>2)</sup> aufgestellten Vermutung, daß in einer und derselben Rohrleitung die Werte  $a_1$  für alle gasförmigen und tropfbaren homogenen Flüssigkeiten gleich und unveränderlich seien.

Nürnberg, den 7. Mai 1908.

Biel.

---

<sup>1)</sup> Zahlentafel 1, Forschungsheft 44 S. 10 oder Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1908 S. 1037.

<sup>2)</sup> Forschungsheft 44 S. 38.

### Heft 22.

- Bach:** Versuche über den Gleitwiderstand einbetonierten Eisens.  
**Klein:** Ueber freigehende Pumpenventile.  
**Fuchs:** Der Wärmeübergang und seine Verschiedenheiten innerhalb einer Dampfkesselheizfläche.

### Heft 23.

- Baum und Hoffmann:** Versuche an Wasserhaltungen (Dampfwasserhaltung der Zeche Victor, hydraulische Wasserhaltung der Zeche Dannenbaum, Schacht II, und elektrische Wasserhaltungen der Zechen Victor, A. von Hansemann und Mansfeld).

### Heft 24.

- Klemperer:** Versuche über den ökonomischen Einfluß der Kompression bei Dampfmaschinen.  
**Bach:** Versuche über die Festigkeitseigenschaften von Stahlguß bei gewöhnlicher und höherer Temperatur

### Heft 25.

- Hänßer:** Untersuchungen über explosible Leuchtgas-Luftgemische.  
**Föttinger:** Effektive Maschinenleistung und effektives Drehmoment, und deren experimentelle Bestimmung (mit besonderer Berücksichtigung großer Schiffsmaschinen).

### Heft 26 und 27.

- Roser:** Die Prüfung der Indikatorfedern.  
**Wiebe und Schwirkus:** Beiträge zur Prüfung von Indikatorfedern.  
**Staus:** Einfluß der Wärme auf die Indikatorfeder.  
**Schwirkus:** Ueber die Prüfung von Indikatorfedern.  
—, Auf Zug beanspruchte Indikatorfedern.

### Heft 28.

- Loewenherz und van der Hoop:** Wirbelstromverluste im Ankerkupfer elektrischer Maschinen.  
**Bach:** Versuche über die Festigkeitseigenschaften von Flußeisenblechen bei gewöhnlicher und höherer Temperatur (hierzu Tafel 1 bis 4).

### Heft 29.

- Bach:** Druckversuche mit Eisenbetonkörpern.  
—, Die Aenderung der Zähigkeit von Kesselblechen mit Zunahme der Festigkeit.  
—, Zur Kenntnis der Streckgrenze.  
—, Zur Abhängigkeit der Bruchdehnung von der Meßlänge.  
—, Versuche über die Verschiedenheit der Elastizität von Fox- und Morison-Wellrohren.

### Heft 30.

- Berg:** Die Wirkungsweise federbelasteter Pumpenventile und ihre Berechnung.  
**Richter:** Das Verhalten überhitzten Wasserdampfes in der Kolbenmaschine.

### Heft 31.

- Bach:** Versuche zur Ermittlung der Durchbiegung und der Widerstandsfähigkeit von Scheibenkolben.  
**Stribek:** Warmzerreißeversuche mit Durana-Gußmetall. Gesichtspunkte zur Beurteilung der Ergebnisse von Warmzerreißeversuchen.  
**Wendt:** Untersuchungen an Gaserzeugern.

### Heft 32.

- Richter:** Thermische Untersuchung an Kompressoren.  
**v. Studiarski:** Ueber die Verteilung der magnetischen Kraftlinien im Anker einer Gleichstrommaschine.

### Heft 33.

- Wagner:** Apparat zur strobographischen Aufzeichnung von Pendeldiagrammen.  
**Wiebe:** Der Temperaturkoeffizient bei Indikatorfedern.  
**Bach:** Versuche über die Elastizität von Flammrohren mit einzelnen Wellen.  
—, Die Bildung von Rissen in Kesselblechen.  
—, Versuche über die Drehungsfestigkeit von Körpern mit trapezförmigem und dreieckigem Querschnitt.

### Heft 34.

- Köhler:** Die Rohrbruchventile. Untersuchungsergebnisse und Konstruktionsgrundlagen.  
**Wiebe und Leman:** Untersuchungen über die Proportionalität der Schreibzeuge bei Indikatoren.

### Heft 35 und 36.

- Adam:** Ueber den Ausfluß von heißem Wasser.  
**Ott:** Untersuchungen zur Frage der Erwärmung elektrischer Maschinen. I. Wärmeleitvermögen der lamellierten Armatur. II. Erwärmungsgleichungen für Feldspulen.  
**Knoblauch und Jakob:** Ueber die Abhängigkeit der spezifischen Wärme  $c_p$  des Wasserdampfes von Druck und Temperatur.

### Heft 37.

- Benemann:** Ueber den Ausfluß des Wasserdampfes und über Dampfmengenmessung.  
**Möller:** Untersuchungen an Druckluftdämmern.

### Heft 38.

- Martens:** Die Meßdose als Kraftmesser in der Materialprüfmaschine.

### Heft 39.

- Bach:** Versuche mit Eisenbetonbalken. Erster Teil.  
—, Versuche mit einbetoniertem Thacher-Eisen.

### Heft 40.

- Versuche an der Wasserhaltung der Zeche Franziska in Witten.  
**Grübler:** Vergleichende Festigkeitsversuche an Körpern aus Zementmörtel.  
**Lorenz:** Vergleichsversuche an Schiffsschrauben.  
—, Die Aenderung der Umlaufzahl und des Wirkungsgrades von Schiffsschrauben mit der Fahrgeschwindigkeit.

### Heft 41.

- Hort:** Die Wärmevorgänge beim Längen von Metallen.  
**Mühschlegel:** Regulierversuche an den Turbinen des Elektrizitätswerkes Gersthofen am Lech.

### Heft 42.

- Biel:** Die Wirkungsweise der Kreiselpumpen und Ventilatoren. Versuchsergebnisse und Betrachtungen.

### Heft 43.

- Schlesinger:** Versuche über die Leistung von Schmirgel- und Karborundumscheiben bei Wasserzuführung.

### Heft 44.

- Biel:** Ueber den Druckhöhenverlust bei der Fortleitung tropfbarer und gasförmiger Flüssigkeiten.

### Heft 45 bis 47.

- Bach:** Versuche mit Eisenbetonbalken. Zweiter Teil.

### Heft 48.

- Becker:** Strömungsvorgänge in ringförmigen Spalten und ihre Beziehungen zum Poiseuilleschen Gesetz.  
**Pinegin:** Versuche über den Zusammenhang von Biegefestigkeit und Zugfestigkeit bei Gußeisen.

### Heft 49.

- Martens:** Die Stulpenreibung und der Genauigkeitsgrad der Kraftmessung mittels der hydraulischen Presse.  
**Wieghardt:** Ueber ein neues Verfahren, verwickelte Spannungsverteilungen in elastischen Körpern auf experimentellem Wege zu finden.  
**Müller:** Messung von Gasmenngen mit der Drosselscheibe.

### Heft 50.

- Rötscher:** Versuche an einer 2000 pferdigen Riedler-Stumpf-Dampfturbine.