

A 28

**Bericht Nr. 481**

**Messung des äußeren Wärmeüberganges  
eines Hochdruckrohres mit Verdrängern,  
bei Einbau in einem Rohrbündel und bei  
Umlagerung mit Schamottesteinen**

8794



## Bericht des Technischen Prüfstandes Oppau

Nr. 481

Messung des äusseren Wärmeüberganges eines Hochdruck-  
rohres mit Verdrängern, bei Einbau in einem Rohrbündel  
und bei Umlagerung mit Schamottesteinen.

Übersicht: Es wurden verschiedene Anordnungen erprobt, um den äusseren Wärmeübergang an unberippten Hochdruckrohren für Spitzenvorheizer zu verbessern. - Die Anbringung von Leitverdrängern, die eine Umspülung der im Strömungsschatten liegenden Rohrhälfte erzwingen sollen, ist wegen der Grenzschichtenanpressung ungünstig. - Eine Umlagerung mit Schamottebrocken gibt hohe Wärmeübergangszahlen, aber zugleich auch unzulässig hohe Strömungswiderstände. - Erfolgversprechend erscheint dagegen die Anordnung als versetztes Rohrbündel, das gleiche Wärmeleistungen ergibt wie normale Rippenrohre, allerdings den Nachteil höheren Druckabfalles produktseitig und grösseren Aufwandes an legiertem Rohrmaterial hat.

Abgeschlossen am: 3. November 1941 Gr.

Bearbeiter: Dr.-Ing. G. Kling

*G. Kling*

Die vorliegende Ausfertigung 8 enthält

9 Textblätter

5 Bildblätter

2 Tabellen

### Verteiler

Nr.	am	Empfänger	Nr.	am	Empfänger
1	10.11.41	Herrn Dir. Dr. Lappe, Op. 51			
2	10.11.41	Herrn Obering. Dr. Schierenbeck, Op. 51			
3	24.11.41	Herrn Obering. Raethel, Lu. 592			
4	10.11.41	Herrn Dr. Ing. Kling, Op. 471			
5-8		Techn. Prüfstand Op.			
5	22.11.41	<i>gesehen</i>			

8795

Messung des äusseren Wärmeüberganges eines Hochdruck-  
rohres mit Verdrängern, bei Einbau in einem Rohrbündel  
und bei Umlagerung mit Schamottesteinen.

1) Einleitung:

An Stelle der üblichen Rippenrohre ist vorgeschlagen worden, einfache unberippte Hochdruckrohre in Vorheizern zu verwenden. Die verkleinerte äussere Rohroberfläche soll dabei durch eine entsprechende Erhöhung der äusseren Wärmeübergangszahlen ausgeglichen werden.

Einige Versuche in dieser Richtung sind im vorliegenden Bericht zusammengestellt. Durch Anbringung von Verdrängern soll festge- stellt werden, inwieweit eine vollkommene Umspülung der im Strömungs- schatten liegenden Rohrseite den Wärmeübergang erhöhen kann. - Weiterhin soll die Anordnung in einem Rohrbündel mit versetzten Rohren untersucht werden, da die aus der Literatur zu entnehmenden  $\alpha$ -Werte nur für kleine Rohrdurchmesser gelten und auf die vorliegenden Verhältnisse ungenau über- tragbar sind. Auch der bei 400 bis 500°C schon erhebliche Anteil der Wärme- strahlung ist nicht berechenbar und nur experimentell zu bestimmen. - Schliesslich wird auch der Fall eines Rohres untersucht, das aussen mit Schamottebrocken umgeben ist, da ja bekanntlich in Schüttstoffen sehr hohe Wärmeübergangszahlen vorhanden sind.

2) Versuchseinbau:

Die Versuche wurden in der Gasse von 710 mm Breite und 500 mm Höhe der Apparatur zur Untersuchung von Rippenrohren durchgeführt (siehe Bericht Dr.Kling, Techn.Prüfstand Nr.463). - Das Versuchsrohr, dessen

Wärmeübergangszahlen bestimmt wurden, war ein Hochdruckrohr 120/171 mm  $\phi$  aus N 8 - Material. In das Rohr wurden Stahlkugeln von 11,9 mm  $\phi$  gefüllt, die zwischen zwei Sieben in 473 mm Abstand gelagert waren. Die Temperaturen der Rohrwand wurden mit 8 Thermoelementen an verschiedenen Stellen gemessen, um die mittlere Wandtemperatur zu ermitteln. Durch die Kugelschüttung im Rohr strömte Luft (etwa 500 bis 550 kg/h), wobei Wärmeübergangszahlen von 1000 bis 2000 kcal/m<sup>2</sup>h<sup>0</sup>C auf der Rohrinneenseite erreicht wurden.

Der Gasseneinbau ist in den Abbildungen 1 bis 7 dargestellt. Bei allen Versuchen war das Hochdruckrohr in der Mitte der Versuchsgasse eingesetzt. - In Abbildung 1 ist die Gasse durch seitliche Führungsbleche soweit verengt, dass der Abstand vom Rohr zur Wand beiderseits 20 mm beträgt. In Abbildung 2 sind hinter dem Rohr Leitbleche angebracht, die die Rauchgase zwingen, die hintere Rohrhälfte zu umspülen. Die anschließende düsenförmige Erweiterung soll eine verlustlose Entspannung der Gase bewirken. In Abbildung 3 ist vor das Versuchsrohr noch ein Blechrohr mit Leitblechen vorgesetzt. - Der theoretisch wichtige Fall eines quer angeströmten Rohres ist in Abbildung 4 verwirklicht, wo alle Einbauten entfernt sind und das Hochdruckrohr allein in der Mitte der Gasse steht. - In Abbildung 5 ist die Gasse mit Blechrohren so ausgefüllt, dass das Hochdruckrohr als mittleres Rohr in der dritten Reihe eines Rohrbündels steht. In Abbildung 6 steht das Versuchsrohr in der fünften Rohrreihe. - Die Umlagerung mit Schamottebrocken wurde in der Art durchgeführt, wie es in Abbildung 7 dargestellt ist. - In allen Abbildungen geben die Pfeile die Richtung der Rauchgasströmung an. Die Temperatur  $t_p$  betrug stets  $\sim 415^{\circ}\text{C}$ , die Geschwindigkeit konnte in der weiten Gasse von 2 bis 8 m/sec, in der engen Gasse von 5 bis 20 m/sec durch die Drehzahlregulierung des Wälzgasventilators verändert werden. - Neben den Wärmeübergangsmessungen wurde noch der Druckabfall der Rauchgase an den Druckentnahmestellen p bestimmt. (In der Anordnung nach Abbildung 6 konnte kein Druckverlust gemessen werden, da die vordere Druckmesstelle im Wirbelraum hinter einem vorgesetzten Blechrohr lag, was eine Fehlmessung ergeben hätte.)

3) Versuchsauswertung:

Die Versuchsauswertungen sind in den Tabellen 1 und 2 zusammengestellt. Darin bedeuten:

$G$	- Gewicht der das Rohr durchströmenden Luft	kg/h
$t_1$	- Eintrittstemperatur der Luft	°C
$t_2$	- Austrittstemperatur der Luft	°C
$Q$	- Wärmeaufnahme der Luft = $G \cdot \gamma \cdot (t_2 - t_1)$	$\frac{\text{kcal}}{\text{h}}$
$t_w$	- mittlere Temperatur der Rohrwand	°C
$q_1$	- Heizflächenbelastung, bezogen auf die mit Kugeln bedeckte innere Rohroberfläche $F_1 = 0,176 \text{ m}^2$	$\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{ h}}$
$\alpha_a$	- Wärmeübergangszahl von den Rauchgasen an die Rohrwand = $Q / F_a \cdot (t_g - t_w)$	$\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{ h} \text{ } ^\circ\text{C}}$
$q_a$	- Heizflächenbelastung, bezogen auf die vom Rauchgas umspülte äussere Rohroberfläche $F_a = 0,271 \text{ m}^2$	$\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{ h}}$
$t_R$	- Temperatur der Rauchgase vor dem Versuchsrohr	°C
$\gamma_R$	- Wichte der Rauchgase im Zustand vor dem Versuchsrohr	kg/m <sup>3</sup>
$V_{RG}$	- Menge der die Versuchsgase durchströmenden Rauchgase, bezogen auf den Zustand ( $t_R$ ) vor dem Versuchsrohr	m <sup>3</sup> /h
$w_{RG}$	- Geschwindigkeit der Rauchgase in der Gasse	m/sec
$w_{RR}$	- Geschwindigkeit der Rauchgase im engsten Querschnitt um das Versuchsrohr	m/sec
$\Delta p$	- Druckverlust der Rauchgase	mm WS

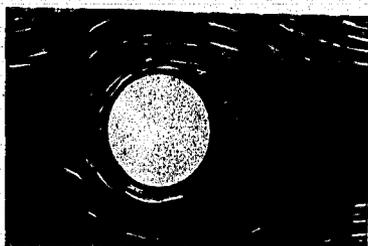
Über die Einzelheiten der Auswertung sei auf den oben erwähnten Bericht Nr. 463 verwiesen. In den verschiedenen Anordnungen der Abbildung 1 bis 7 ist jeweils die Messtelle für  $t_R$  eingetragen. Beim Rohrbündel wurde als  $t_R$  die Temperatur direkt vor dem Hochdruckrohr  $t_R$  eingesetzt. Das Thermometer dieser Messtelle wurde jedoch zur Vermeidung von besonderen Wirbelungen bei der eigentlichen Wärmeübergangsmessung entfernt.

#### 4.) Versuchsergebnisse:

Die gemessenen Wärmeübergangszahlen  $\alpha$  sind in der Abbildung 8 in Abhängigkeit von der Rauchgasgeschwindigkeit  $w_{Rg}$  dargestellt. Die niedersten  $\alpha$ -Werte ergaben sich bei der Versuchsanordnung nach Abbildung 1 (Kurve 1). Die Gase strömen mit sehr grosser Geschwindigkeit durch die beiderseitigen Spalten zwischen Rohr und Wandung, sodass sich hinter dem Rohr ein stark ausgeprägter Strömungsschatten ausbildet, in dem die Rohroberfläche nicht bespült wird und eine unvollkommene Wärmeaufnahme erfolgt. Durch Anbringung der Leitbleche nach Abbildung 2 wird die etwas nach oben verschobene Kurve 2 erhalten, deren Neigung nur geringfügig steiler ist. Dies lässt darauf schliessen, dass durch die Leitbleche vor allem der Strahlungsaustausch verbessert ist. Die geringe Verbesserung des konvektiven Wärmeaustausches (was der erhöhten Kurvenneigung entspricht) ist auf die vollkommene Umspülung der hinteren Rohrhälfte zurückzuführen. Allerdings wird der günstige Effekt dieser Massnahme durch das Anpressen der Grenzschicht aufgehoben, die sich bereits vorne und seitlich am Rohr abkühlte und den nachfolgenden heissen Gasen an der hinteren Rohrhälfte einen zusätzlichen Wärmewiderstand entgegensetzt. - In der Anordnung nach Abbildung 3 bewirkt das vorgesetzte Rohr eine Durchwirbelung der Rauchgase, was eine Verbesserung des konvektiven Wärmeüberganges zur Folge hat. Die Kurve 3 verläuft demgemäss wesentlich steiler.

Die Wärmeübergangszahlen des einzelnen Hochdruckrohres in der Gasse von 710 mm Breite nach Abbildung 4 sind viel günstiger als die Werte

vom einzelnen Rohr in der Gasse von 213 mm Breite, auch verläuft die Kurve 4 wesentlich steiler als die Kurve 1. Gegenüber der oben gegebenen Erklärung des letzteren Falles ist beim freistehenden Rohr in der weiten Gasse die Wirbelbildung und Grenzschichtablösung normal, wie dies auch die folgende Skizze von Reiher<sup>†)</sup> (nach Strömungsbildern von Prandtl und von H.Thoma) veranschaulicht.



Interessant ist hier ein Vergleich mit den theoretisch berechenbaren Wärmeübergangszahlen für das einzeln stehende, quer angeströmte Rohr. Die auf die Rohraußenoberfläche bezogenen Wärmeübergangszahlen  $\alpha_a$  sind berechnet für  $t_R = 415^\circ\text{C}$ , eine Wärmeleitzahl  $\lambda = 27 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$  des  $\text{Ni}$ -Materials und nach den  $\alpha$ -Werten von Reiher (Wärmeatlas I, 4). Die so gewonnenen rein konvektiven  $\alpha_a$ -Werte sind in Abbildung 8 als Kurve 4a abhängig von  $w_{Rg}$  eingezeichnet. Hierzu ist noch ein Strahlungsanteil zu addieren. Der  $\alpha_s$ -Wert für reine Strahlung wurde mit einer Strahlungszahl  $C = 3,5$  einmal für zwei parallele Flächen ( $\alpha_s = 18$ ), ein andermal für zwei sich umhüllende Flächen ( $\alpha_s = 43$ ) errechnet. Das Rohr in der Gasse kann man vereinfacht als Mittelweg beider Vorstellungen ansehen, sodass  $\alpha_s = 30$  anzusetzen wäre. - Weiterhin seien noch die Wärmeübergangszahlen infolge der Gasstrahlung der  $\text{CO}_2$ -

<sup>†)</sup> Reiher, Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, Heft 269/1925

und der  $H_2O$ -Bande im Rauchgas errechnet. Nach Schack<sup>+)</sup> ergibt sich für 10%  $CO_2$  ein Wert  $\alpha_{sCO_2} = 1,7 \text{ kcal/m}^2 \text{h}^\circ C$  und ebenso für 10%  $H_2O$  ein Wert  $\alpha_{sH_2O} = 1,7 \text{ kcal/m}^2 \text{h}^\circ C$ . Die gesamte Wärmeübergangszahl durch Strahlung ist jetzt  $\alpha_{s\text{ges}} = 30 + 1,7 + 1,7 = 33,4 \text{ kcal/m}^2 \text{h}^\circ C$ . Wird dieser Betrag zur rein konvektiven Wärmeübergangszahl addiert, so ergibt sich die in Abbildung 8 strich-punktiert eingezeichnete Kurve 4b, die annähernd mit den gemessenen Werten in Übereinstimmung steht. Diese Rechnung kann infolge der willkürlichen Annahmen keinen Anspruch auf Genauigkeit erheben. Sie gibt jedoch eine Vorstellung von dem beträchtlichen Anteil der Wärmeübertragung durch Flächenstrahlung im vorliegenden Fall. Mit höherer Rauchgastemperatur wird dieser Anteil natürlich noch zunehmen.

Die Wärmeübergangszahlen bei der Anordnung im Rohrbündel nach Abbildung 5 und 6 liegen etwas höher als die  $\alpha_s$ -Werte des einzelnen Rohres. Da jedoch im Rohrbündel etwas niedrigere  $\alpha$ -Werte als beim Einzelrohr zu erwarten wären, scheint die gegensätzliche Verbesserung bei den vorliegenden Versuchen durch die Vergrößerung der strahlenden Fläche infolge der umliegenden Blechrohre bedingt zu sein.

Die günstigsten Wärmeübergangszahlen wurden bei der Umlagerung mit Schamottesteinen nach Abbildung 7 erhalten (Kurve 7). Hier wird allerdings die Wärme im wesentlichen durch Konvektion übertragen, da die Rauchgase in den unregelmässigen, vielfach verzweigten Kanälen stark durchwirbelt werden. In den Messergebnissen macht sich dies in der starken Abhängigkeit des  $\alpha_s$  von der Geschwindigkeit  $w_{Rg}$  bemerkbar.

Der Druckabfall  $\Delta p$  der verschiedenen Versuchsanordnungen ist in der Abbildung 9 aufgetragen.

Die wärmetechnische Beurteilung der verschiedenen Anordnungen ergibt erst dann ein richtiges Bild, wenn die übertragene Wärmemenge  $Q = \alpha_s \cdot F_s \cdot \Delta t$  betrachtet wird. Für eine normale Gassenbreite von 710 mm ist die übertragbare Wärme wesentlich durch die Zahl der nebeneinander

<sup>+) A. Schack: "Der Industrielle Wärmeübergang", 2. Auflage 1940</sup>

anzuordnenden Rohre und damit auch der verfügbaren Fläche  $F_a$  gegeben. In den Abbildungen 11 und 12 seien daher die nach vorliegenden Versuchen denkbaren Einbauarten dargestellt, ungeachtet der sich dabei ergebenden praktischen Schwierigkeiten, insbesondere der Rohrverbindungen. Vergleichsweise ist der Einbau von normalen Rippenrohren mit Rippen  $270 \times 320$  mm in Abbildung 10 gezeichnet. Der Vergleich sei für eine Gassenhöhe von 500 mm, wie sie vorliegenden Versuche zu Grunde lag und für eine Gassenlänge von 400 mm, die dem normalen Rohrabstand von Rippenrohren entspricht, durchgeführt. Das Temperaturgefälle  $\Delta t$  sei stets  $100^\circ\text{C}$ , die Geschwindigkeit  $w_{RG}$  sei in allen Fällen 8 m/sec (dies entspricht der üblichen Geschwindigkeit  $w_{RR} = 20$  m/sec zwischen den Rippen von normalen Rippenrohren  $270 \times 320$  mm). - Neben den jeweiligen Abbildungen ist die in der Gasseneinheit (710 mm Breite, 400 mm Gassenweg und 500 mm Gassenhöhe) einzubauende Oberfläche, die bei den Versuchen gemessenen  $\alpha_a$ -Werte pro 1 Rohr, die pro Gasseneinheit übertragbare Wärmemenge  $Q$  und der pro Gassenweg (400 mm) aus den Messungen errechenbare Druckabfall eingetragen. Gegenüber der Wärmeleistung normaler Rippenrohre von  $Q = 5700$  kcal/h gibt der Einbau von Leitverdrängern mit  $Q = 3620$  kcal/h eine Minderleistung von 37%, dagegen die Anordnung des engen Rohrbündels mit  $Q = 8140$  kcal/h eine Mehrleistung von 43%. Der Druckverlust ist für Rippenrohre und Rohrbündel gleich, für Rohre mit Leitverdrängern um etwa 45% höher.

Um die Rohre mit Leitverdrängern auf die gleiche Wärmeleistung mit Rippenrohren zu bringen, wäre  $\alpha_a = 70$  kcal/m<sup>2</sup>h<sup>0</sup>C erforderlich. Dies könnte erst bei Geschwindigkeiten von  $w_{RG} = 24$  m/sec erreicht werden. Der Druckverlust würde dabei auf 50 mm WS ansteigen, was zu einer bedeutenden Erhöhung der Gebläseleistung führen müsste. Die Anbringung von Leitverdrängern ist daher wärmetechnisch und energiemässig als ungünstig anzusehen.

Beim Rohrbündel mit 5 Rohren je Gassenteilung würde die Wärmeleistung normaler Rippenrohre weit überschritten sein. Da es konstruktiv sehr schwierig ist, 5 Rohre auf 400 mm Gassenlänge unterzubringen, sei

noch der Fall eines Rohrbündels von nur 3 Rohren auf 400 mm Länge betrachtet. Die Oberfläche wäre jetzt nur  $3 \times F_a = 0,813 \text{ m}^2$  und das erforderliche  $\alpha_a = 70 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$ . Unter der Voraussetzung, dass die am engen Rohrbündel gemessenen  $\alpha_a$ -Werte auch für das weite Rohrbündel gelten würden, wäre eine Geschwindigkeitssteigerung auf  $w_{Rg} \approx 13 \text{ m/sec}$  erforderlich. Dabei ist anzunehmen, dass sich der Druckabfall wenig ändern wird, da die Geschwindigkeitszunahme durch die verkleinerte Widerstandsfläche kompensiert wird. Es wäre nur die Fördermenge des Gebläses zu erhöhen. - Die Anwendung eines Rohrbündels ist demnach hinsichtlich des äusseren Wärmeüberganges günstig zu beurteilen. Nachteilig ist allerdings die Erhöhung des Strömungswiderstandes auf der Produktseite, die Vergrösserung des Gebläses und der Mehraufwand an legiertem Stahl.

Tabelle 1

Ver- such Nr.	G kg/h	t <sub>1</sub> °C	t <sub>2</sub> °C	Q kcal/h	t <sub>w</sub> °C	q <sub>1</sub> kcal/m <sup>2</sup> h	q <sub>a</sub> kcal/m <sup>2</sup> h	α <sub>a</sub> kcal/m <sup>2</sup> h°C	t <sub>R</sub> °C	γ <sub>R</sub> kg/m <sup>3</sup>	V <sub>RG</sub> m <sup>3</sup> /h	V <sub>RG</sub> m/sec	W <sub>RR</sub> m/sec	Δ f mm WS
1	533,0	21,5	54,5	4220	58,2	23980	15580	43,5	416	0,488	4090	10,72	56,80	11,5
2	536,5	25,0	58,7	4340	61,1	24650	16020	45,2	415	0,486	5330	13,97	74,05	17,0
3	532,0	25,0	61,8	4700	64,8	26700	17350	49,2	417	0,491	6635	17,38	92,10	25,0
4	541,8	25,3	65,0	5160	66,9	29320	19050	54,2	418	0,496	7563	19,83	105,10	33,0
5	539,5	26,2	56,0	3860	55,6	21920	14250	40,1	411	0,498	3089	8,09	42,89	8,0
6	509,7	26,5	56,2	3631	58,1	20630	13400	38,1	410	0,493	2292	6,05	31,84	8,0

Versuch Abbildung 1: Rohr einzeln in Gasse 212,5 mm Breite

Versuch Abbildung 3: Rohr mit Leitblechen und mit vorgesetztem Blechrohr

7	530,6	28,5	65,2	4679	69,6	26580	17260	50,2	414	0,481	4082	10,70	56,70	17,0
8	526,1	35,5	75,0	4995	83,4	28380	18425	56,1	412	0,488	4310	12,87	68,21	25,0
9	526,1	35,0	77,0	5315	84,8	30190	19600	59,6	414	0,482	6415	16,80	89,08	43,0
10	525,2	33,0	79,5	5859	83,8	33290	21610	65,0	416	0,469	7659	20,07	106,30	57,0
11	530,0	35,0	66,0	3950	69,6	22420	14570	42,7	411	0,474	2861	7,50	39,72	8,0
12	522,8	35,5	66,2	3859	68,0	21910	14225	40,9	416	0,471	2340	6,13	32,50	5,0
13	532,0	34,5	68,2	4309	74,2	24490	15900	47,0	413	0,473	3661	9,59	50,85	14,0

Versuch Abbildung 2: Rohr mit Leitblechen

14	556,0	24,2	56,5	4318	60,1	24520	15950	45,8	408	0,483	3760	9,85	52,22	11,0
15	541,5	24,5	62,0	4880	68,5	27730	18020	51,4	419	0,477	5242	13,74	72,82	21,0
16	543,5	26,0	64,5	5020	70,3	28560	18530	53,9	414	0,466	6438	16,87	89,40	27,0
17	552,0	25,3	66,5	5461	75,8	31030	20160	58,6	420	0,488	7405	19,42	102,90	42,0
18	532,2	32,0	63,5	4030	65,5	22900	14870	42,5	415	0,485	2900	7,60	40,28	8,0

Tabelle 2

Versuch Nr.	G kg/h	t <sub>1</sub> °C	t <sub>2</sub> °C	Q kcal/h	t <sub>w</sub> °C	q <sub>1</sub> kcal/m <sup>2</sup> h	q <sub>a</sub> kcal/m <sup>2</sup> h	α <sub>a</sub> kcal/m <sup>2</sup> h°C	t <sub>R</sub> °C	R <sub>R</sub> kg/m <sup>3</sup>	V <sub>Rg</sub> m <sup>3</sup> /h	W <sub>Rg</sub> m/sec	W <sub>RR</sub> m/sec	Δ p mm WS
Versuch Abbildung 5: Rohr in der 3. Reihe eines Rohrbündels														
1	501,5	32,5	68,5	4340	76,0	24650	16000	47,2	420	0,487	4531	3,55	12,78	6,5
2	510,5	33,0	69,3	4370	78,0	24830	16120	49,5	415	0,481	5439	4,25	15,33	9,0
3	504,0	33,0	71,5	4660	82,0	26500	17200	52,0	418	0,483	6900	5,40	19,46	12,5
4	503,5	32,5	73,5	4960	82,0	28200	18320	55,5	416	0,478	8113	6,34	23,89	17,0
5	495,2	32,0	75,0	5120	86,0	29050	18900	58,1	416	0,483	9161	7,17	25,85	21,0
6	502,5	32,0	75,5	5250	86,4	29830	19370	59,6	415	0,482	10130	7,92	28,57	27,0
7	507,5	30,5	64,2	4110	71,0	23300	15150	45,0	413	0,485	3001	2,35	8,46	7,0
Versuch Abbildung 6: Rohr in der 5. Reihe eines Rohrbündels														
8	544,0	21,0	56,2	4602	65,0	26180	17000	49,7	418	0,502	5257	4,11	14,83	-
9	560,0	21,8	57,8	4842	71,0	27520	17880	53,2	418	0,501	5640	4,41	15,92	-
10	544,0	22,2	59,3	4850	72,25	27580	17900	52,7	418	0,498	7300	5,71	20,60	-
11	540,5	22,8	61,3	5000	76,0	28400	18430	54,7	418	0,471	8471	6,63	23,90	-
12	539,0	23,0	64,2	5340	78,5	30300	19720	59,0	417	0,413	10205	7,99	23,81	-
13	546,0	22,0	53,5	4130	58,25	23410	15250	44,1	416	0,494	4038	3,16	11,39	-
14	549,0	21,0	50,5	3892	57,0	22120	14370	40,5	416	0,501	3009	2,35	8,48	-
15	544,0	20,5	56,0	4638	65,0	26380	17120	49,4	418	0,530	6710	5,25	18,93	-
Versuch Abbildung 4: Rohr einzeln in der Gasse 710 mm Breite														
16	523,5	24,2	55,2	3900	65,5	22150	14380	41,0	416	0,507	4586	3,59	4,74	-
17	525,0	25,0	57,2	4060	66,8	23100	14980	42,7	415	0,502	5543	4,34	5,75	-
18	526,2	23,4	60,5	4690	70,6	26650	17280	50,1	415	0,493	7413	5,80	7,66	-
19	528,0	22,5	60,2	4780	71,9	27150	17650	51,2	417	0,517	8640	6,76	8,94	-
20	530,0	22,5	61,4	4950	72,7	28100	18250	52,9	418	0,489	10690	8,36	11,05	-
21	537,5	22,0	51,2	3770	59,2	21410	13900	39,6	416	0,494	2990	2,34	3,09	-
22	518,0	22,0	60,5	4788	71,6	27180	17630	51,0	418	0,482	9881	7,73	10,22	-
Versuch Abbildung 7: Rohr mit Schamottebrocken umgeben														
23	516,5	31,5	73,5	5210	80,4	2960	1923	57,6	415	0,511	4095	3,21	-	32,0
24	516,1	30,5	74,2	5420	82,8	3080	2000	60,0	417	0,524	4550	3,56	-	37,0
25	512,0	33,5	79,0	5600	87,6	3180	2068	63,9	411	0,520	5414	4,23	-	57,0
26	505,8	33,5	85,0	6020	96,8	3420	2219	71,2	409	0,510	6335	4,96	-	77,0
27	514,7	34,5	85,5	6318	94,2	3585	2329	77,2	396	0,524	7508	5,88	-	114,0
28	520,0	33,0	70,0	4620	73,8	2625	1705	50,0	415	0,529	2553	2,00	-	15,0

Versuchseinbau mit Leitblechen

Abb.1

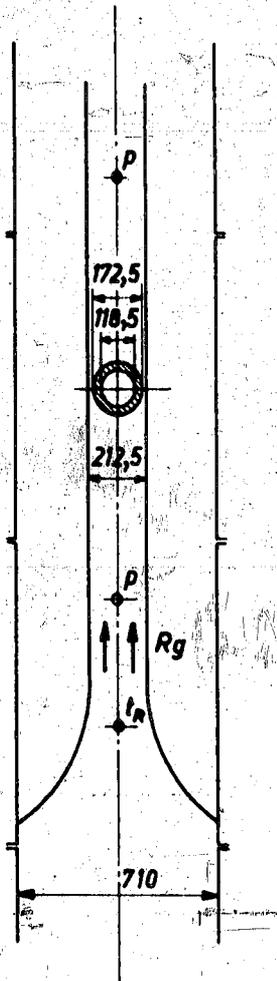


Abb.2

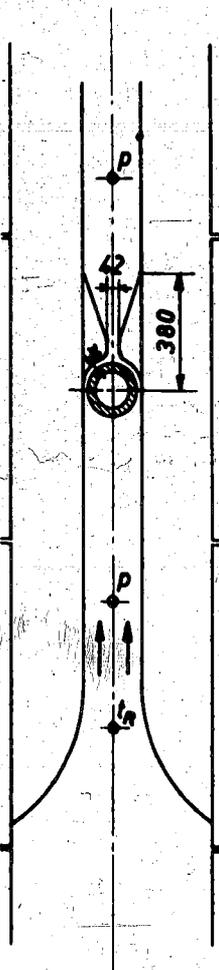
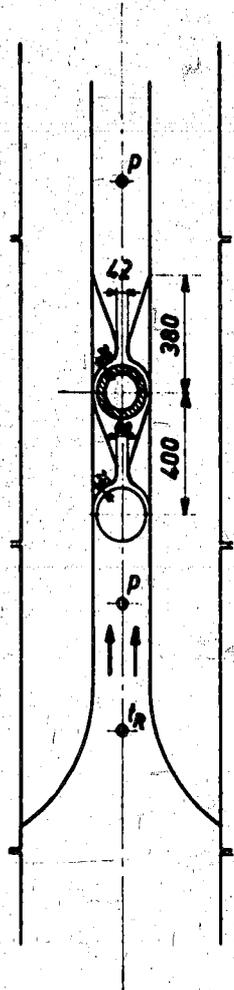


Abb.3



8806

Versuchseinbau im Rohrbündel

Abb. 5

3. Rohrreihe

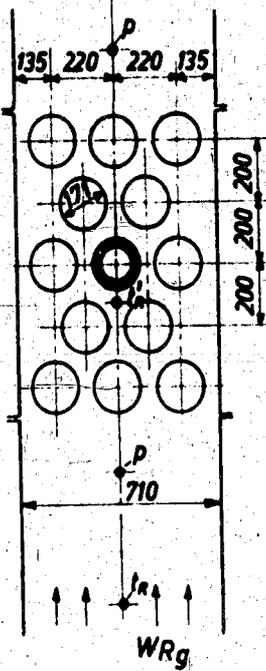


Abb. 6

5. Rohrreihe

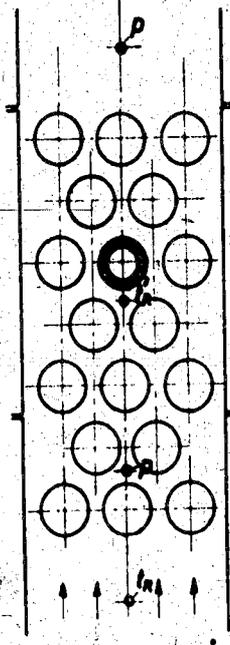


Abb. 4

Einzeleinbau  
in der Gasse

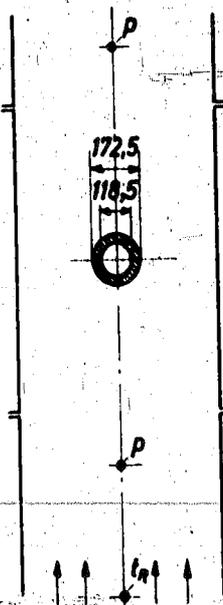
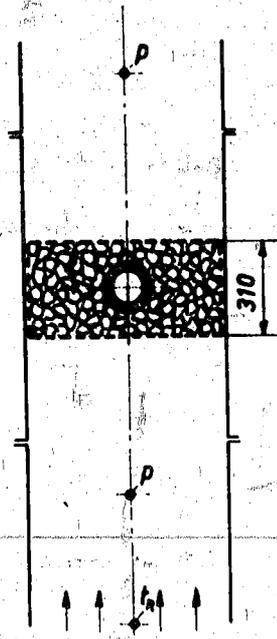


Abb. 7

Umlagerung mit  
Schamottebrocken

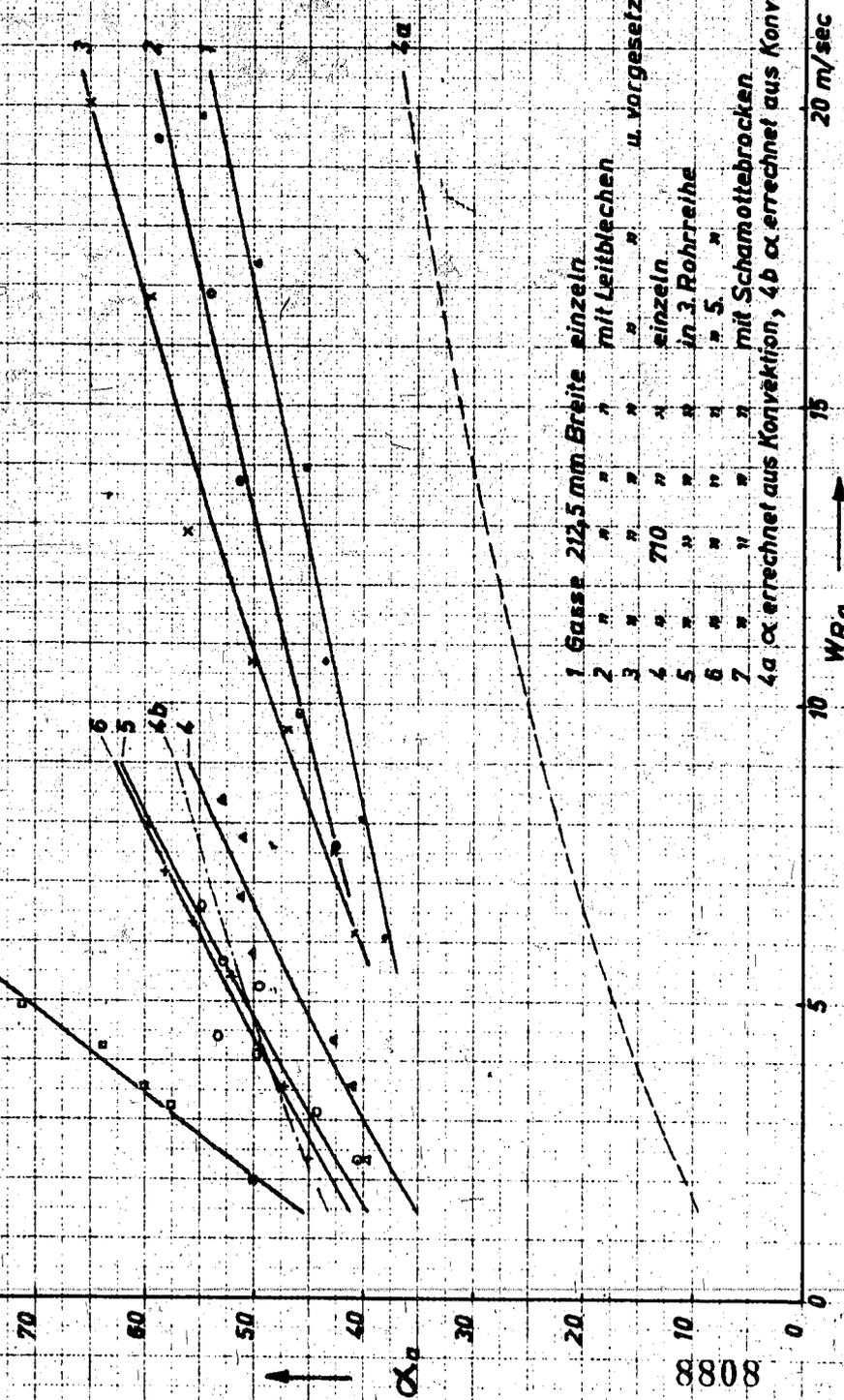


8807

Wärmeübergangszahlen  $\alpha_a$  abhängig von  
der Rauchgasgeschwindigkeit WRg

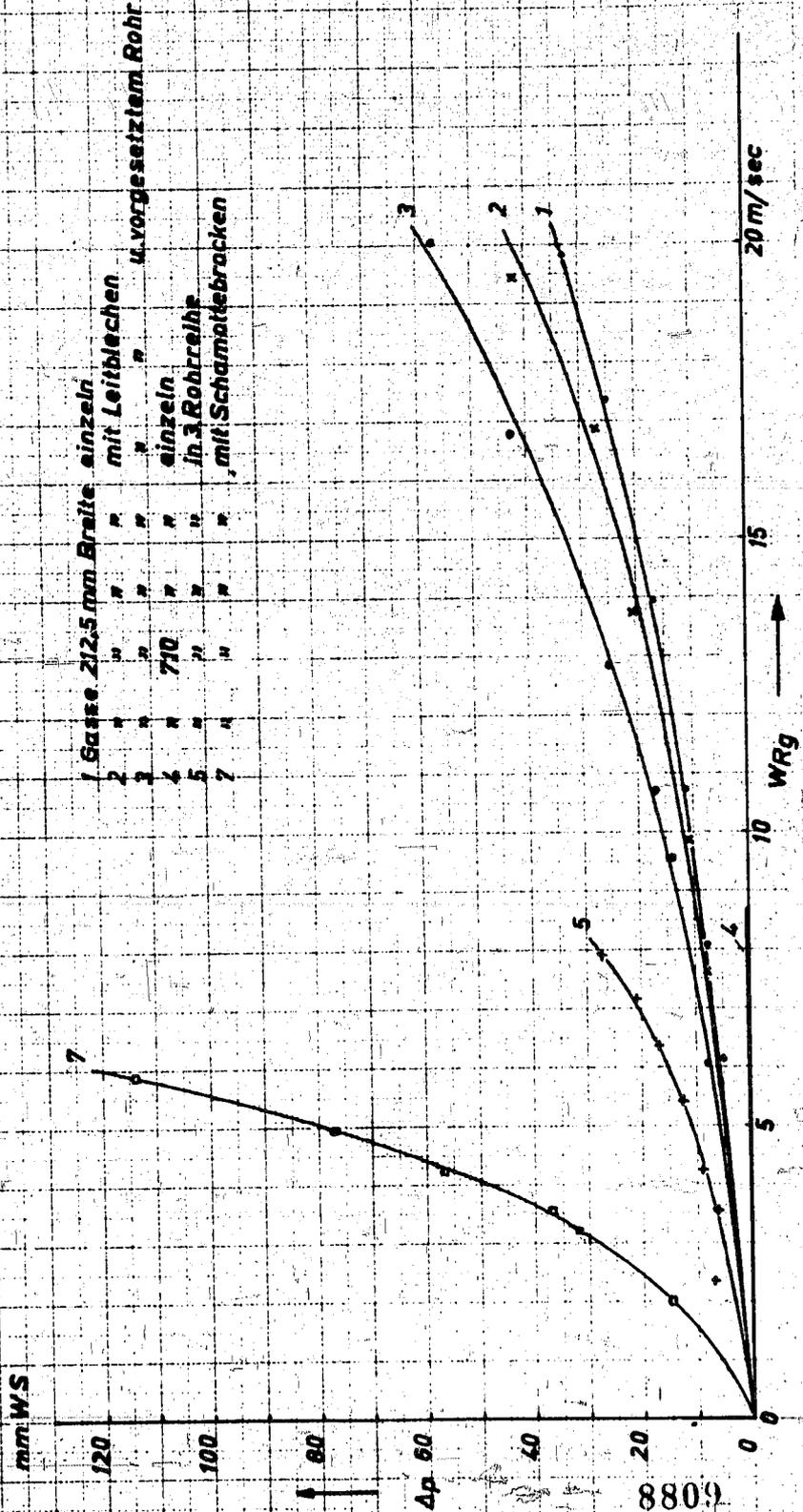
kcal/m<sup>2</sup>h °C

Abb. 8



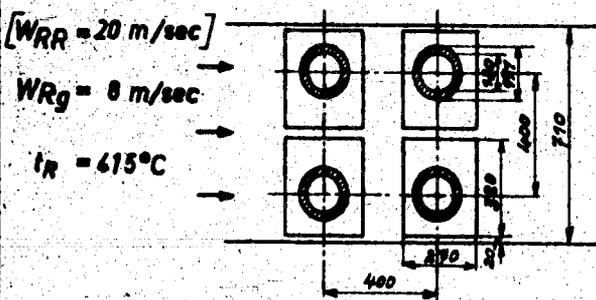
8808

Abb. 9 Druckverluste  $\Delta p$  abhängig von der Rauchgasgeschwindigkeit WRg



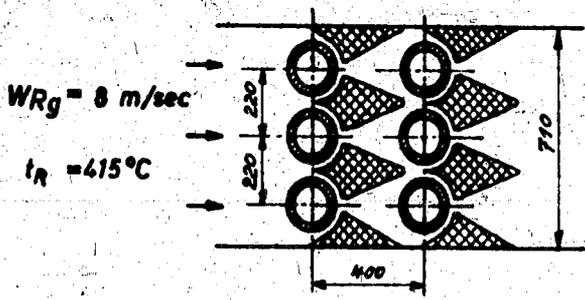
Vergleich zwischen Rippenrohren, Rohren  
mit Leitverdrängern u. Rohrbündeln  
[Gassenhöhe 500 mm]

Abb. 10 Normale Rippenrohre



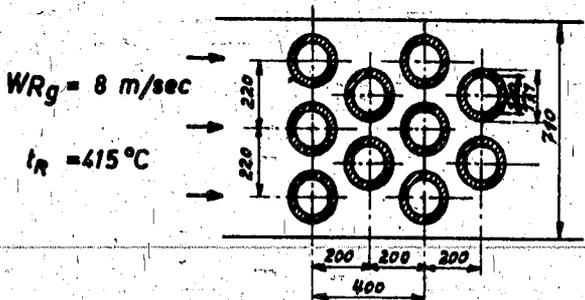
$2 \times F_a = 8,76 \text{ m}^2$   
 $\alpha_a = 6,5 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$   
 $Q = 5700 \text{ kcal/h}$   
 $\Delta p = 5,5 \text{ mm WS}$

Abb. 11 Rohre mit Leitverdrängern



$3 \times F_a = 0,813 \text{ m}^2$   
 $\alpha_a = 44,5 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$   
 $Q = 3620 \text{ kcal/h}$   
 $\Delta p = 8 \text{ mm WS}$

Abb. 12 Rohrbündel



$5 \times F_a = 1,355 \text{ m}^2$   
 $\alpha_a = 60,0 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$   
 $Q = 8140 \text{ kcal/h}$   
 $\Delta p = 5,5 \text{ mm WS}$

8810