

A 76

Bericht Nr. 543

M

Untersuchungen an Rippenrohren

5. Teil:

Messung des Wärmeüberganges an einem Stück
Haarnadelrohr nach zweijähriger Betriebszeit. —
Wärmeleitzahl der Kruste. — Einfluß der Berippung
auf die Wandtemperaturmessung.

9539



Untersuchungen an Rippenrohren

5. Teil: Messung des Wärmeüberganges an einem Stück Haarnadelrohr nach zweijähriger Betriebszeit - Wärmeleitzahl der Kruste - Einfluss der Berippung auf die Wandtemperaturmessung.

1. Einleitung:

In einem Gasvorheizer der Gelsenberg Benzol A.G. war eine Haarnadel gerissen. Das Rohr von 90/171 mm ϕ war innen stark verkrustet, sodass das H 10 - Material infolge zu hoher Temperaturbeanspruchung wahrscheinlich Schaden gelitten hatte. Ein Probestück aus dieser Haarnadel (Ø 72) wurde uns auf Veranlassung von Herrn Dipl.-Ing. Schappert zur Untersuchung zugesandt, um daran Wärmeübergangszahlen an einem Rippenrohr zu messen, das bereits 15 040 Stunden im Betrieb lief und demgemäß stark verkrustet war. Die Versunderung der Rippen war unbedeutend.

Von Interesse ist dabei die genaue Kenntnis der Wärmeleitzahl der innen im Rohr abgesetzten Verkrustung von etwa 10 mm Stärke, die aus einer dünnen Ablagerung von Schwefeleisen und darüber aus Kohleschichten besteht. Die Wärmeleitzahlmessung kann nur an der Kruste im unbeschädigten Zustande erfolgen, da abgeschlagene und zerkleinerte Kruste als poröse Masse infolge der gasgefüllten Poren einen zu kleinen λ -Wert ergeben würde.

Besondere Beachtung verdient auch die Frage der Wandtemperaturmessung an Haarnadeln. Die Elemente werden gasseitig auf der Rohroberfläche angeheftet und durch eine Isolierung gegen Gaseinwirkungen geschützt. Eine richtige Temperaturmessung dürfte wohl bei Anbringung der Elemente zwischen den Rippen selbst am besten zu erreichen sein, wobei natürlich zur Platzgewinnung ein Teil einer Rippe entfernt werden darf. Eine wesentlich einfachere Montage der Elemente ist an den freien Flächen der Rohrverschweißungen, die auf etwa 100 bis 200 mm unberippt bleiben, möglich, wobei etwa 7-12 Rippen

fehlen. (Diese Anordnung wurde in Pölitz benützt.) - Im letzteren Falle tritt die Frage auf, inwieweit Wärme durch "Querleitung" in der Rohrwand aus den benachbarten berippten Teilen heranfliessen kann, bzw. um wieviel eine Temperatursenkung an den freien Rohrstellen gegenüber den berippten auftreten kann. Eine in Vorbereitung befindliche Arbeit von Dr. Seibert, Gelsenberg, versucht diese Querleitvorgänge theoretisch zu erfassen. Die Zuverlässigkeit der Rechnung muss allerdings bei einem solch verwickelten Wärmeübergangsproblem weitgehend von Annahmen über die Verteilung der Wärmeübergangszahlen und die Form des Strömungsfeldes abhängig sein. Ein Vorschlag Dr. Seiberts, Strömungsversuche durchzuführen, deren Ergebnisse dann von ihm nach der Impulstheorie auf den Wärmeübergang zu übertragen wären, hätte einen zu grossen versuchstechnischen Aufwand erfordert. Demgegenüber erschien es wesentlich einfacher, die sich infolge Querleitung einstellende Temperaturverteilung in der Rohrwand mit verschiebbaren Thermoelementen in unserer Versuchsanlage festzustellen. Dabei ist der Vorteil gegeben, die unbekannte Temperaturverteilung messtechnisch direkt zu bestimmen.

2. Versuchseinbau

Aus der eingesandten Haarnadel wurden zwei Versuchsrippenrohre herausgedreht. Den ersten Einbau (für Versuch vom 16.9.42) der Rohre mit den laufenden Nummern 37 und 38 in unserer Versuchsanlage zeigt Blatt 1. Beide Rohre sind nebeneinander angeordnet, der Abstand beträgt 400 mm, die Gassenbreite 710 mm. Die Rippen des linken Rohres 37 mit den Massen 260 x 310 mm sind etwas zu klein gegenüber den normalen Abmessungen 270 x 320 mm des rechten Rohres 38. Letzteres wurde daher auch für die Messungen der Temperaturverteilung verwendet.

Rohr 38 ist nochmals in Blatt 2 dargestellt unter Angabe der wichtigsten Rohrabmessungen. In der üblichen Weise sind innen die Rohrenden ausgedreht zur Aufnahme zweier Siebe, zwischen denen Stahlkugeln zur Verbesserung des Wärmeüberganges angeordnet sind. Auf kleinen Kupferplättchen von 10x10x0,5 mm sind Fe-Konstanten-Thermoelemente aufgelötet und diese mit angespitzten Stahlstiften, die über einem Durchmesser im Rohr eingeklemmt sind, an die Wandung angepresst. Je drei Elemente sind an der vorderen und hinteren Fläche, in

Richtung des Gasstromes gesehen, angebracht. Im Bild sind die Messstellen mit Kreuzen markiert. - Die Rohrwandung von Rohr 38 ist in der Längsrichtung an 4 Stellen mit Bohrungen von 6,5 mm $\varnothing$ versehen, die vom oberen Rohrende ab 610 mm tief sind. In diese Bohrungen kann ein Thermoelement eingeschoben werden. Das Element besteht aus Eisen-Konstantan-Drähten, die in einem Kupferzylinder eingelötet sind. Dieser Zylinder passt gerade in die Bohrung und wird mit einer kleinen Stahlfeder an die Wand der Bohrung gepresst, wodurch er infolge der guten Berührung deren Temperatur erreicht. Die halbe Zylinderhöhe ist als Ort der Messung angenommen worden. Rohr 37 hat keine Bohrungen in der Rohrwand.

3. Messungen und Ergebnisse

a) Bestimmung der äusseren Wärmeübergangszahlen

Diese Versuche sind in genau der gleichen Art durchgeführt worden, wie alle früheren Rippenrohrmessungen (s.s.B. Bericht Dr. Kling, TPr. Nr. 463). Die Zahlenwerte sind in der Tabelle 1 zusammenfassend angegeben. Es liegen drei Versuchareihen vor. Am 16.9.42 waren beide Rohre im verkrusteten Zustand untersucht worden. Dann wurde Rohr 37 ausgebaut und die Kruste abgedreht. Der Versuch vom 14.10.42 ergab dann die Vergleichswerte zwischen einem verkrusteten und einem unverkrusteten Rohr. Dann wurden Rohr 37 und 38 miteinander vertauscht und der Vergleichsversuch am 18.11.42 wiederholt. - Im oberen Bild von Blatt 3 sind die äusseren Wärmeübergangszahlen α_a aufgetragen. In der bisher üblichen Definierung, d.h. Wärmemenge Q , bezogen auf die äussere Oberfläche F_a von Rohr und Rippen sowie auf die Temperaturspanne zwischen Gas Temperatur t_g und der mit den Thermoelementen an der Rohrrinnenwand gemessenen Temperatur t_w , ist demnach

$$\alpha_a = \frac{Q}{F_a (t_g - t_w)}$$

Die α_g -Werte sind abhängig von der Rauchgasgeschwindigkeit in der leeren Gasse vor den Rohren w_{rg} aufgetragen. Im verkrusteten Rohr ist der Wärmeübergang nur etwa halb so gross wie im unverkrusteten Rohr. Die starke Kruste macht auch den Einfluss des gaseitigen Wärmeüberganges wirkungslos, was sich in der fast horizontalen Gerade ausdrückt. Demgegenüber ist beim unverkrusteten Rohr ein merkbarer Anstieg von α_g mit der Gasgeschwindigkeit festzustellen. Der Unterschied in den α_g -Werten der verkrusteten Rohre 37 und 38 ist rein mathematisch bedingt durch die verschiedenen F_g -Werte infolge der unterschiedlichen Rippenzahlen und Flächen beider Rohre.

Der letztere Gesichtspunkt ebenso wie auch die Tatsache, dass sich bei zunehmender Verkrustung der innere Rohrdurchmesser, an dem ja t_w gemessen wird, verengt, lassen es vorteilhaft erscheinen, eine neue Definierung der äusseren Wärmeübergangszahl einzuführen, indem die innere Rohroberfläche des Stahlrohres F_{i-Rohr} als Bezugsfläche eingesetzt wird:

$$\alpha_{a, i-Rohr} = \frac{q}{F_{i-Rohr} \cdot (t_g - t_w)}$$

Die danach umgerechneten Wärmeübergangszahlen sind im unteren Bild von Blatt 3 dargestellt. Beide Rohre 37 und 38 zeigen darnach im verkrusteten Zustand dieselben Wärmeübergangseigenschaften. Der Kurvencharakter ist sonst natürlich der gleiche wie im oberen Bild. Eine 8 mm starke Verkrustung vermindert also den Wärmeübergang der Haarnadeln bereits um die Hälfte.

b) Wandtemperaturmessungen

Für diese Messungen wurde das Rohr 38 mit Kruste rechts eingebaut, das Rohr 37 links diente nur zur Füllung der Gasse. Es wurde bewusst das verkrustete Rohr für diese Messungen verwendet, da dieses ja dem Zustand des Gasvorheizers nach langer Betriebszeit entspricht, wo die Wälgastemperatur bereits in einer die Festigkeit des Rohrmaterials gefährdenden Höhe gefahren wird. Beim Versuch vom 22.4.43 war das Rohr 38 noch mit allen Rippen versehen, beim nächsten Versuch vom 8.5.43 waren 3 Rippen in der Mitte entfernt, beim Versuch vom 11.5.43 waren 9 Rippen entfernt und beim Versuche vom 13.5. waren wieder drei Rippen aufgeschweisst, sodass hier 6 Rippen fehlten. - In allen Fällen

⁴⁾ Der hier gebrauchte Ausdruck "äusserer Wärmeübergang" ist in Wirklichkeit natürlich ein Wärmedurchgang, der sich aus mehreren hintereinander und parallel geschalteten Widerständen zusammensetzt (s. Bericht Dr. Kling, Techn. Prüfstand Nr. 508).

war die Rauchgastemperatur 410°C , die Geschwindigkeit der Rauchgase vor den Rohren war etwa $8,4 \text{ m/sec}$, ein Zustand, der strömungsmässig etwa den Verhältnissen in einem Gasvorheizer entspricht. Die Luftströmung im Rohr war in allen Fällen gleich: $G = 290 \text{ kg/h}$, mit Raumtemperatur eintretend.

In den Blättern 4 bis 7 sind die Temperaturkurven für die vier Versuche vom 22.4. und vom 8., 11. und 13.5.43 eingetragen. Als Abszisse ist die Entfernung vom oberen Rohrende in mm aufgetragen, als Ordinate die Anzeige des Millivoltmeters, die für Fe-Konstantan-Elemente gegen 0°C gilt und um den Spannungsabfall in den Drähten zu korrigieren ist (Drähte $6,5\Omega$, Instrument $884,3\Omega$). Ein Schnitt durch das Rippenrohr ist eingezeichnet und die Gassenwand durch Linien mit Schrägschraffur angedeutet. Beim voll berippten Rohr ist ein parabolisches Temperaturfeld vorhanden, das durch den seitlichen Wärmefluss an die kalten Rohrenden in der dicken Rohrwand bedingt ist. Bei den Versuchen mit fehlenden Rippen hat die ursprüngliche Parabel an diesen Stellen einen Sattel, bedingt durch den verschlechterten Wärmeübergang am unberippten Rohr. Die Differenz zwischen der Temperatur am Parabelscheitel des voll berippten Rohres und der Temperatur am tiefsten Sattelpunkt beim Rohr mit fehlenden Rippen, im Verhältnis zu dem gesamten Temperaturgefälle $t_g - t_w$ gibt den Messfehler an, der bei der Anbringung der Thermoelemente in der Mitte der unberippten Rohrstücke einer Haarnadel entsteht. Er ist im oberen Bild von Blatt 8 in Abhängigkeit von der Zahl der fehlenden Rippen aufgetragen. Bei 9 fehlenden Rippen würde demnach die Wandtemperatur der Haarnadel um $11,5\%$ zu niedrig bestimmt werden, ein Fehler, der im Betrieb der Gasvorheizer bei einem Gefälle von z.B. 150°C etwa 17°C betragen würde. Eine zuverlässige Wandtemperaturmessung der Haarnadel ist also nur mit Thermoelementen direkt am Rippenfuss innerhalb der berippten Rohrteile gegeben.

Im unteren Bild von Blatt 8 sind noch die übertragene Wärmemenge und die äussere Wärmeübergangszahl in Abhängigkeit von der Berippung dargestellt. Die Wärmeleistung Q sinkt danach bei 9 fehlenden Rippen nur um 7% . Bei stark verkrustetem Rohr ist der Wärmerwiderstand eben vorwiegend durch

die Kruste gegeben, wo hingegen der äussere Wärmewiderstand verhältnismässig sehr klein wird. Diese Kurve veranschaulicht auch, dass alle Fragen der Berippung nur solange von Bedeutung für den Betrieb der Gasvorheizer sind, als diese noch nicht oder nur wenig verschmutzt sind.

c) Wärmeleitzahl der Kruste

Aus den Wärmeübergangsmessungen vom 22.4.43 lässt sich auch in einfacher Weise die Wärmeleitzahl λ der Kruste berechnen. Nach der Zylinderformel ist:

$$\lambda = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{d_1}{d_w}\right)}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot (t_1 - t_w)}$$

wobei d_1 der Durchmesser der Rohrrinnenwand, d_w der innere Durchmesser der Kruste ist; l ist die Länge der Kruste und t_1 die Temperatur der Rohrrinnenwand. Zur Bestimmung von t_1 werden die Temperaturparabeln in Blatt 4 innerhalb der Gasse planimetriert und daraus die mittlere Wandtemperatur an der Stelle der Bohrungen zu 316°C ermittelt. Der Temperaturabfall von dem Durchmesser der Bohrungen bis zur Rohrrinnenwand kann nach der Zylinderformel gerechnet werden ($\lambda_{\text{Eisen}} = 20$), wonach sich ergibt $t_1 = 287^\circ\text{C}$. Weiter ist $Q = 3940 \text{ kcal/h}$, $l = 0,47 \text{ m}$, $d_1 = 91 \text{ mm}$, $d_w = 72,8 \text{ mm}$, $t_w = 59^\circ\text{C}$. Damit errechnet sich eine Wärmeleitzahl der Kruste von

$$\lambda = 1,3 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$$

bei einer Mitteltemperatur von 175°C und in Luft.

Es wurde auch versucht, die Wärmeleitzahl λ der Kruste nach einem anderen Verfahren zu bestimmen. Hierzu wurde ein Teil der Haarnadel abgestochen und die Rippen entfernt. Dieses innen noch verkrustete Rohrstück hatte einachsial eingebaute elektrische Heizung und wurde in ein Hochdruckrohr druckfest eingebaut. Alle Hohlräume wurden mit Isoliersteinen oder Sand ausgefüllt, um die Konvektionsströme klein zu halten. Die Drähte von Heizung und Thermoelementen waren in isolierten Stopfbüchsen durchgeführt. Das Hochdruckrohr konnte mit H_2 oder N_2 (auch Öl war vorgesehen) bis 200 at gefüllt werden. Diese λ -Messungen sollten den Einfluss anderer Stoffe als Luft in den Porenräumen zeigen, wobei auch der Temperatureinfluss auf λ festzustellen war. Verschiedene Schwierigkeiten bei den Messungen (Konvektionsströmungen,

häufige Zerstörung der Heizdrähte und Thermoelemente durch Einwirkung der Gase usw.) sowie Personalmangel zwangen dazu, diese seitraubenden Versuche vorzeitig abubrechen. Obgleich die wenigen vorliegenden Messwerte ziemlich ungenau sind, wie schon ihre beträchtliche Streuung erkennen lässt, seien sie trotzdem hier mitgeteilt:

Messungen in:		Wasserstoff		Stickstoff	
Druck	at	166	178	154	214
Temperatur	°C	48	99	109	85
Wärmeleitzahl λ	$\frac{\text{kcal}}{\text{mh}^\circ\text{C}}$	0,80	0,98	0,88	1,21

Die Ungenauigkeit ist zu gross, um aus diesen Zahlen einen Druck oder Temperatureinfluss bestimmen zu wollen. Wesentlich sei nur die Erkenntnis, dass die Wärmeleitzahl der Kruste in H_2 und N_2 unter Druck in der gleichen Grössenordnung liegt wie der aus den Rippenrohrmessungen in Luft unter Niederdruck ermittelte Wert.

Aus den λ Werten dieser verschiedensten Messungen ist als Ergebnis die Wärmeleitzahl der Kruste in den Grenzen von 0,8 bis 1,3 $\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ bei geringer Abhängigkeit vom Medium in den Poren, von Druck und Temperatur anzunehmen. Für eine vorsichtige Rechnung des Wärmeüberganges in der verkrusteten Haarnadel wäre einzusetzen:

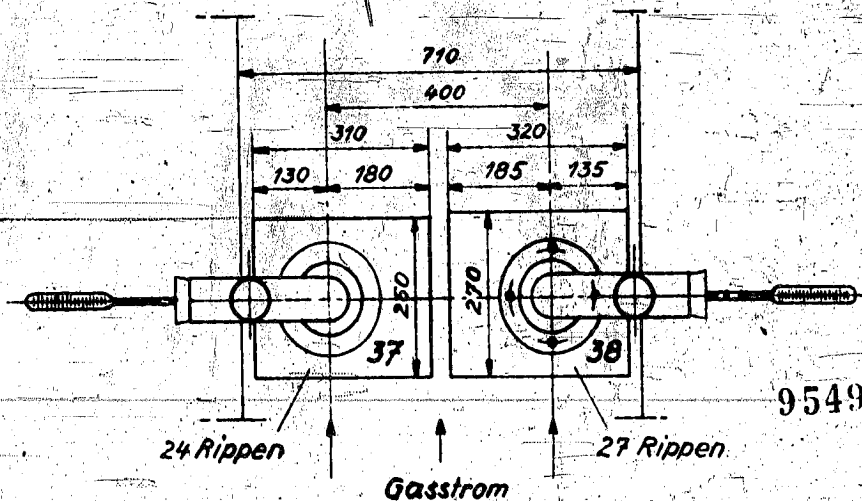
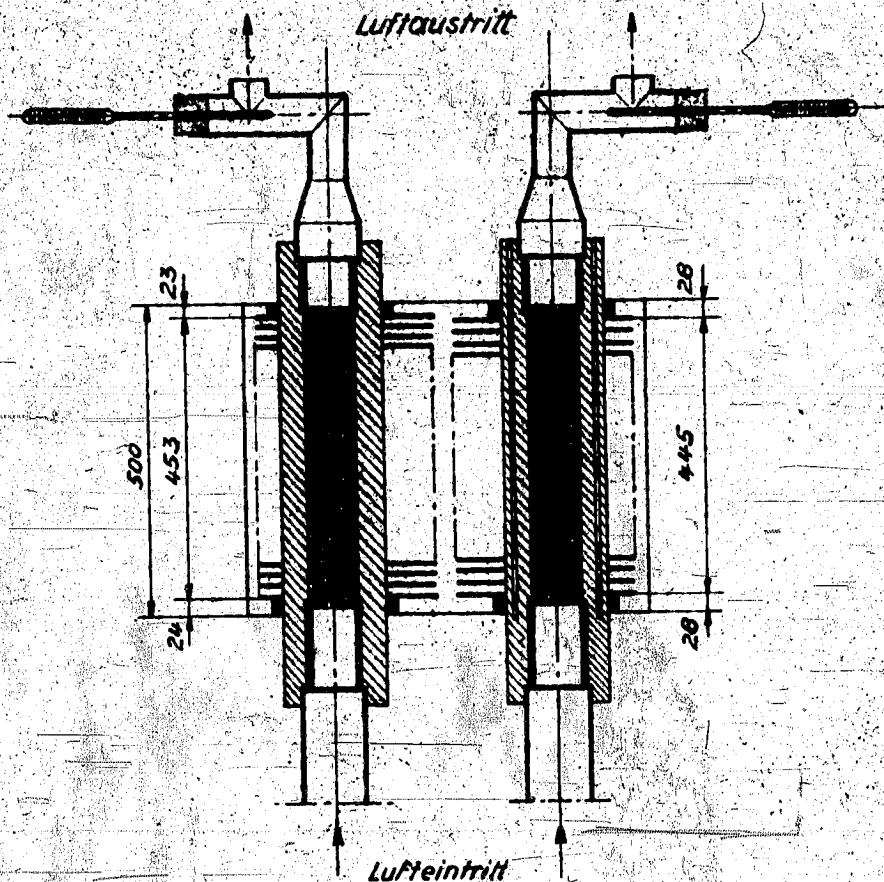
$$\lambda \approx 0,9 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$$

Die Festlegung dieses ungefähren Wertes dürfte für praktische Berechnungen genügen, zumal zu bedenken ist, dass auch weitgehende Differenzen durch verschiedene Zusammensetzung oder Porosität der Krusten in den Gasvorheisern möglich sind.

Tafel 1

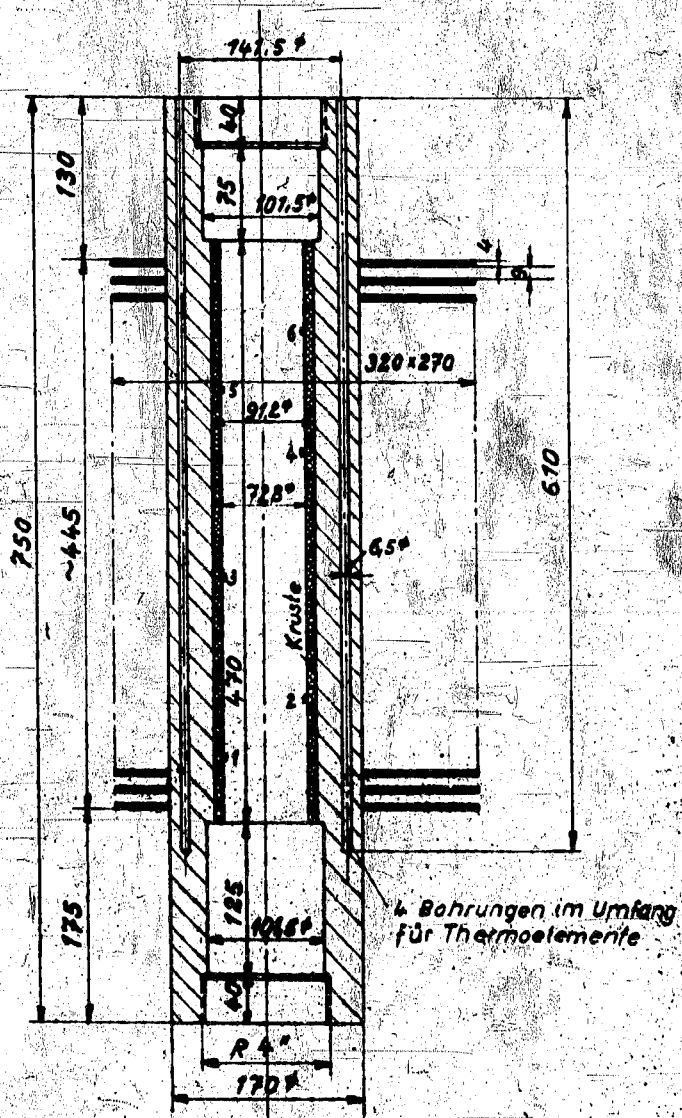
Tag	Zeit	G	t ₁	t ₂	Q	t _w	α _a	α _{a1-Rohr}	t _g -t _w	t _g	R _g		
		kg/h	°C	°C	kcal/h	°C	kcal/m ² h	kcal/m ² h	°C	°C	m/sec		
15.9.42	11 ⁴⁰	284,5	19,0	75,5	3860	55	3,55	80,4	356	411	5,64	Rohr 37 mit Kruste links	
	13 ⁴⁰	263,0	20,0	81,0	3850	59	3,61	81,7	350	409	4,42		
	14 ²⁵	264,5	20,5	78,5	3710	56	3,43	77,6	355	411	2,72		
	15 ¹⁰	263,0	22,0	82,0	3780	62	3,56	80,6	348	410	5,72		
	15 ⁵⁵	268,0	21,5	81,5	3855	63	3,65	82,6	347	410	6,74		
	16 ²⁵	269,0	21,0	81,5	3900	63	3,69	83,5	347	410	8,26		
	17 ²⁰	275,0	22,0	79,0	3765	59	3,50	79,3	353	412	3,12		
	11 ⁴⁰	282,5	19,0	75,5	3835	54,5	2,88 ₅	80,0	356,5	411	5,64	Rohr 38 mit Kruste rechts	
	13 ⁴⁰	256,3	20,0	81,0	3750	59,0	2,87	79,5	350	409	4,42		
	14 ²⁵	254,0	20,5	78,5	3565	59	2,72 ₅	75,5	352	411	2,72		
	15 ¹⁰	256,3	22,0	81,5	3655	63	2,83	78,5	347	410	5,72		
	15 ⁵⁵	264,5	21,5	81,5	3810	63	2,95	81,8	347	410	6,74		
	16 ²⁵	266,0	21,0	81,5	3860	62	2,98	82,6	348	410	8,26		
	17 ²⁰	267,3	22,0	79,0	3658	56	2,76	76,5	356	412	3,12		
14.10.42	11 ¹⁰	314,0	17,5	102,0	6370	92,8	6,6	149,7	317,2	410	4,78	Rohr 37 ohne Kruste links	
	12 ⁰⁰	313,0	16,0	103,5	6570	95,0	6,85	155,2	315,0	410	5,91		
	14 ¹⁰	308,7	21,5	112,0	6705	104,0	7,26	164,7	303,0	407	7,00		
	14 ⁴⁵	308,7	21,0	113,0	6820	105,0	7,34	166,2	305,0	410	7,42		
	15 ⁰⁰	310,2	20,0	115,0	7080	104,5	7,69	174,1	302,5	407	8,22		
	16 ⁴⁰	308,0	20,0	116,5	7140	107,9	7,76	176,0	302,1	410	9,05		
	17 ²⁰	311,0	23,5	108,0	6310	99,5	6,76	153,2	306,5	406	3,02		
	11 ¹⁰	306,3	17,5	68,5	3755	49,2	2,795	77,4	360,8	410	4,78	Rohr 38 mit Kruste rechts	
	12 ⁰⁰	305,2	16,0	69,0	3810	49,5	2,84	78,7	360,5	410	5,91		
	14 ¹⁰	301,3	21,5	74,0	3790	55,8	2,90	80,2	351,2	407	7,00		
	14 ⁴⁵	298,2	21,0	74,5	3832	56,0	2,91	80,5	354,0	410	7,42		
	15 ⁰⁰	299,0	20,0	74,5	3915	56,0	2,99	82,9	351,0	407	8,22		
	16 ⁴⁰	297,2	20,0	75,0	3925	56,5	2,98	82,5	353,5	410	9,05		
	17 ²⁰	296,8	23,5	74,0	3600	54,0	2,75	76,2	352,0	406	3,02		
18.11.42	11 ³⁰	294,0	5,5	59,5	3810	40,0	2,72	75,4	375,0	415	4,70	Rohr 38 mit Kruste links	
	13 ⁰⁰	311,5	6,5	58,0	3850	43,8	2,75	76,2	375,2	419	4,00		
	14 ¹⁰	317,0	7,0	54,5	3615	40,0	2,61	72,4	372,0	411	3,13		
	15 ²⁰	316,0	7,0	58,5	3900	40,0	2,81	77,9	373,0	412	4,64		
	16 ²⁰	315,5	7,0	59,0	3938	41,0	2,85	79,0	371,0	411	5,71		
	17 ⁰⁰	317,5	7,0	60,0	4040	44,0	2,92	81,0	372,0	416	6,77		
	17 ²⁰	318,5	7,0	60,5	4090	41,0	2,96	82,0	371,0	411	8,79		
	11 ³⁰	288,0	5,5	100,0	6540	89,0	6,59	149,1	326,0	415	4,70	Rohr 37 ohne Kruste rechts	
	13 ⁰⁰	302,0	6,5	94,5	6380	88,6	6,34	143,6	330,4	419	4,00		
	14 ¹⁰	306,0	7,0	91,0	6180	84,8	6,20	140,5	327,2	411	3,13		
	15 ²⁰	302,5	7,0	100,8	6815	90,0	6,93	157,0	323,0	412	4,64		
	16 ²⁰	304,5	7,0	102,5	6965	88,8	7,08	160,3	323,2	411	5,71		
	17 ⁰⁰	307,5	7,0	105,0	7240	95,0	7,41	168,0	321,0	416	6,77		
	17 ²⁰	310,0	7,0	106,0	7370	95,0	7,64	173,0	317,0	411	8,79		
22.4.43		293,0	19,5	75,5	3940	65,3	2,97	82,2	344,7	410	8,35	Rohr 38 mit Kruste rechts	Zahl der fehlenden Rippen
8.5.43		294,5	20,5	72,0	3647	61,0	3,14	77,6	349,0	410	8,50		
13.5.43		287,5	35,5	89,8	3752	83,0	3,89	85,3	327,0	410	8,39		
11.5.43		297,0	21,0	72,0	3642	58,0	4,06	77,0	352,0	410	8,43		

Einbau der Rippenrohre in der Gasse



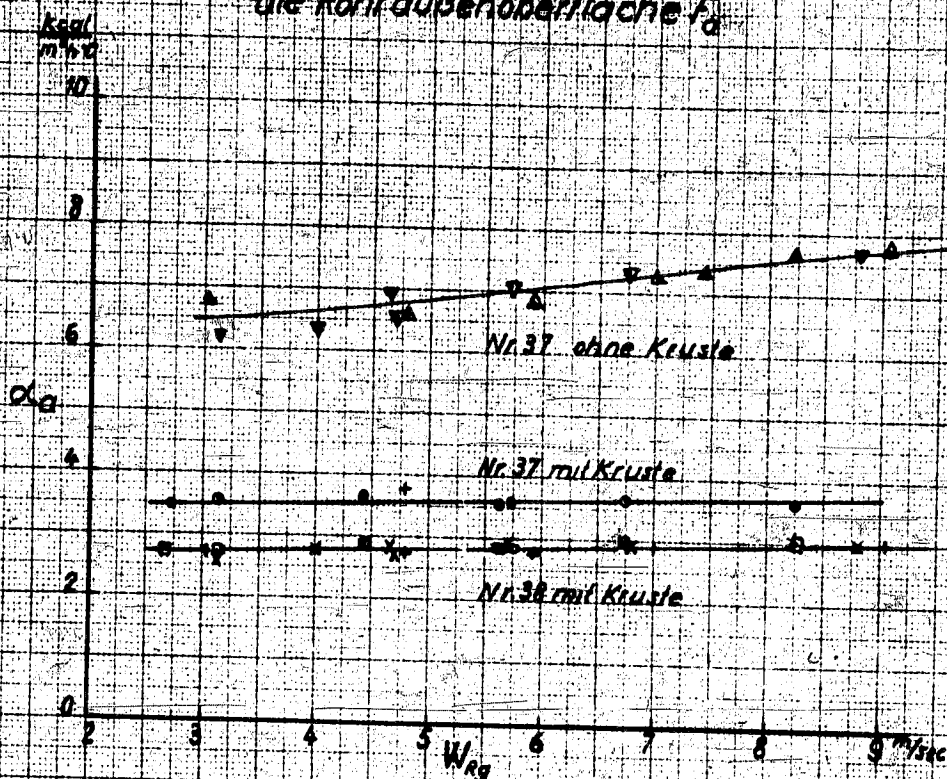
9549

Rippenrohr Nr. 38

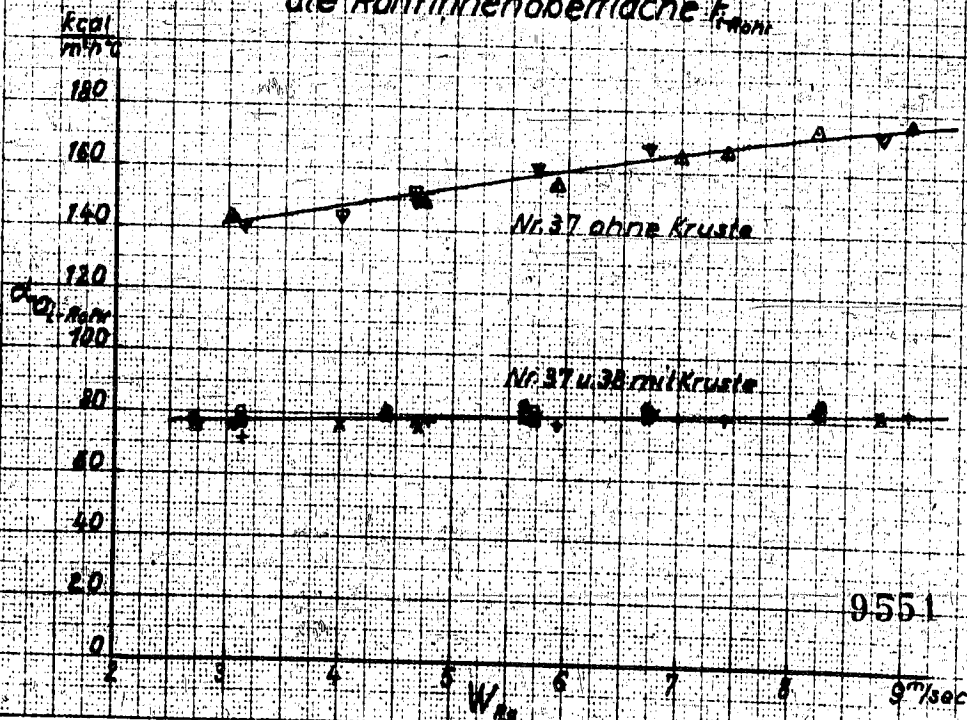


9550

Äußere Wärmeübergangszahlen, bezogen auf die Rohraußenoberfläche F_a



Äußere Wärmeübergangszahlen, bezogen auf die Rohrrinnenoberfläche F_{rohr}



9551

Temperaturverlauf längs der Rohrwand

Versuch vom 22.4.43

mV

22

20

18

16

14

12

10

8

6

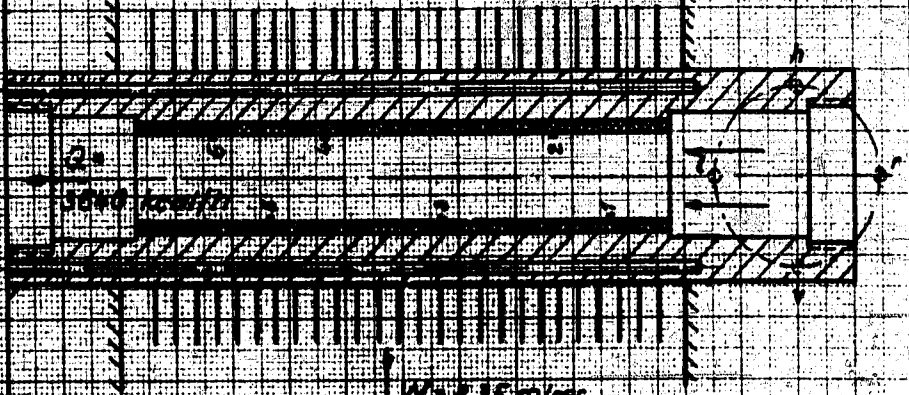
4

2

0

Rohrwandtemperaturen

links vorn hinten rechts



$W = 0,15 \text{ m/sec}$

hinten vorn

Innere Wandtemperaturen t_w

9552

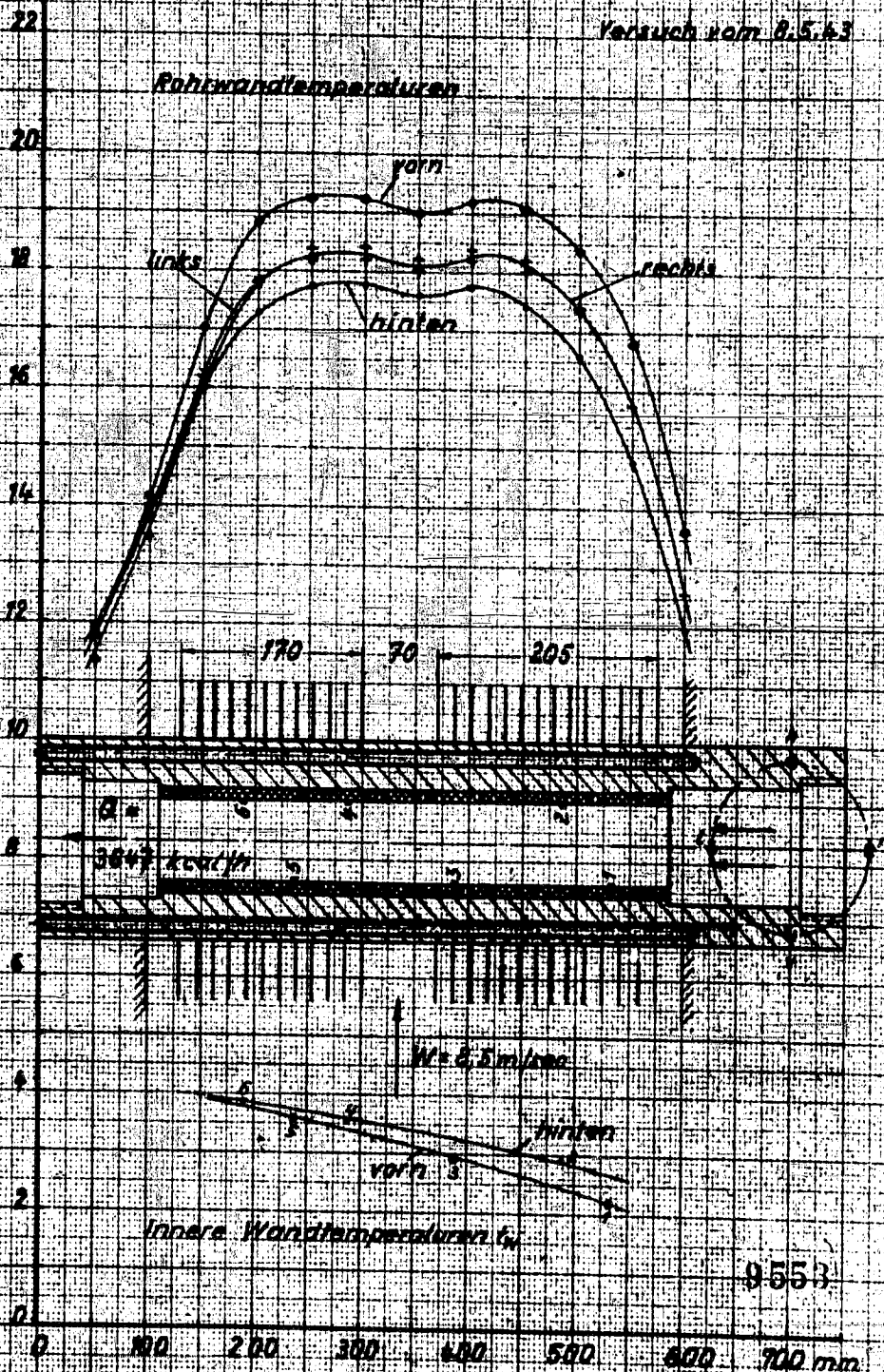
0 100 200 300 400 500 600 700 mm

Temperaturverlauf längs der Rohrwand bei 3 fehlenden Rippen

my

Versuch vom 8.5.43

Rohrwandtemperaturen

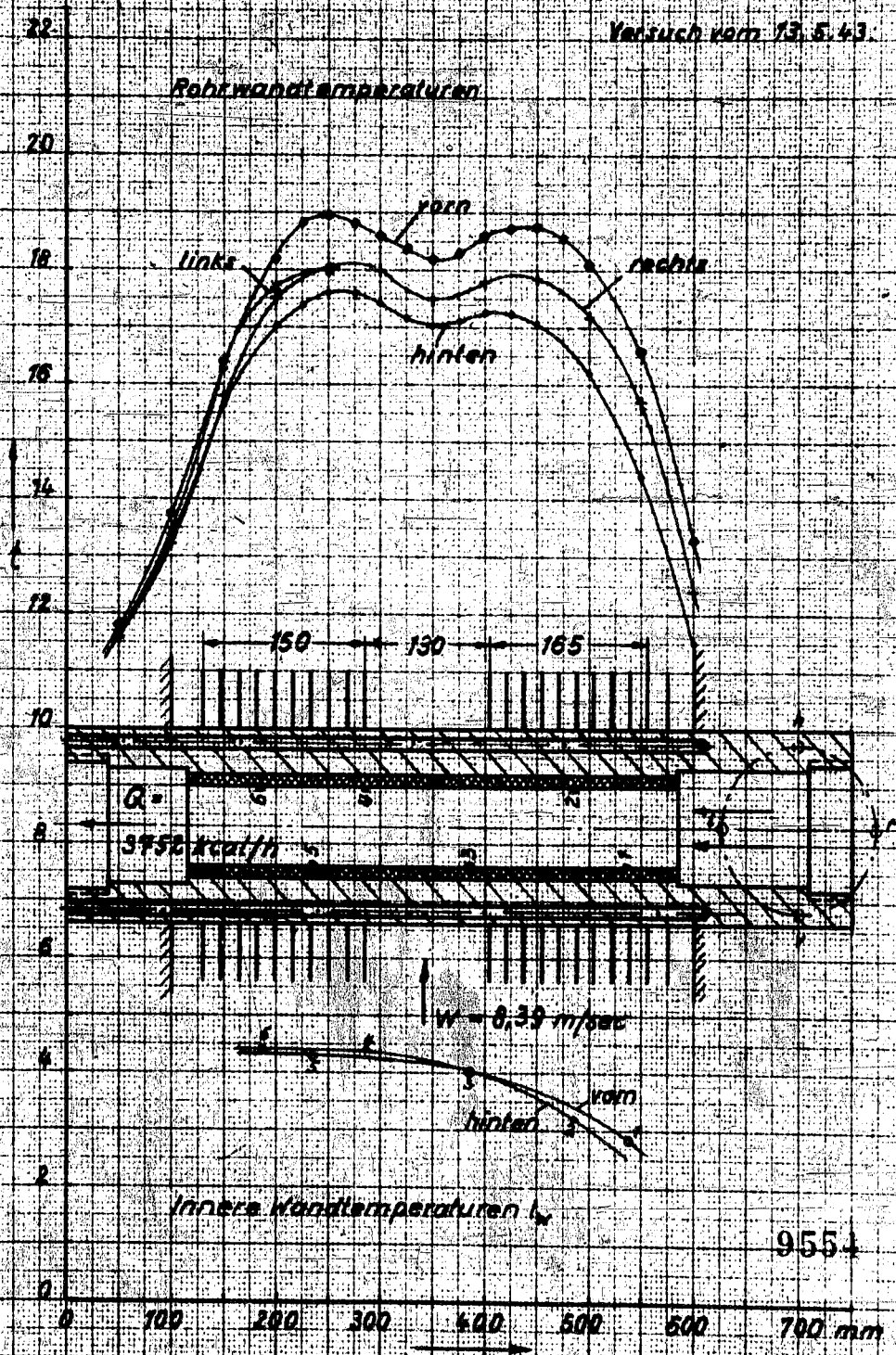


Temperaturverlauf längs der Rohrwand bei 6 fehlenden Rippen

mV

Versuch vom 13. 5. 43.

Rohrwandtemperaturen



Innere Wandtemperaturen t_w

9554

Temperaturverlauf längs der Rohrwand bei 9 fehlenden Rippen

Versuch vom 11.5.43

mV

22

Rohrwandtemperaturen

20

18

16

14

12

10

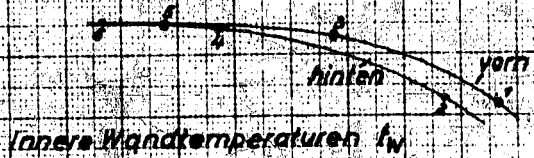
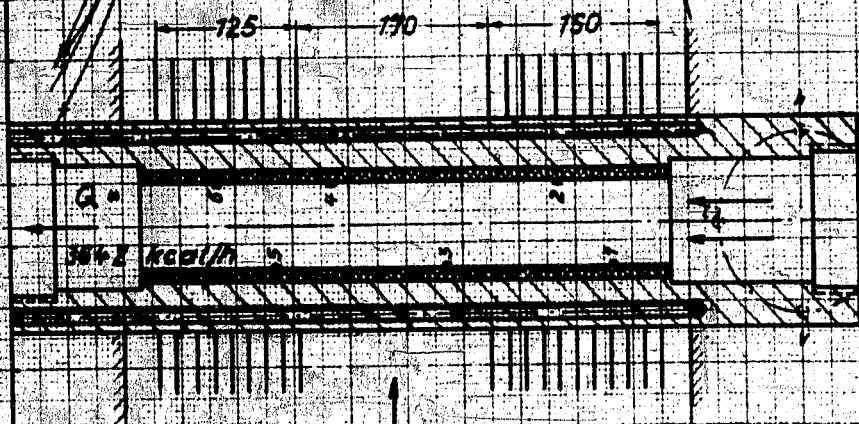
8

6

4

2

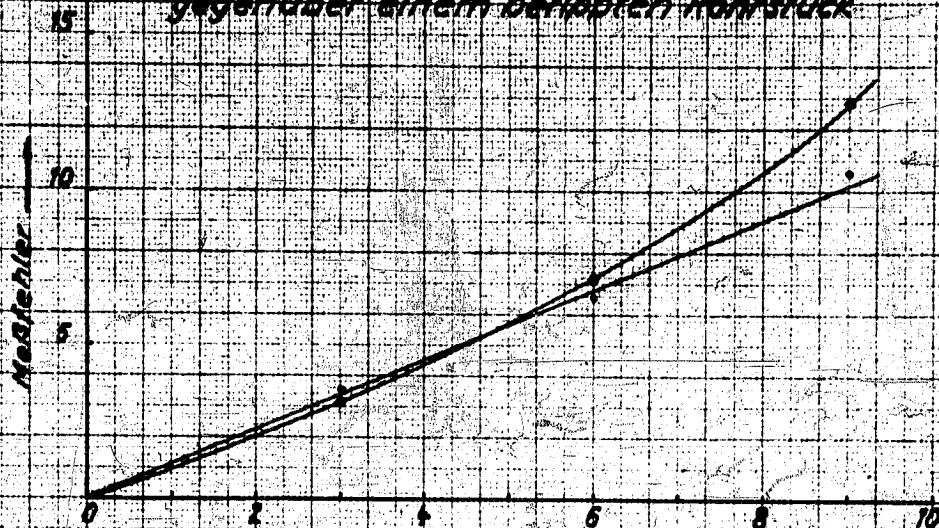
0



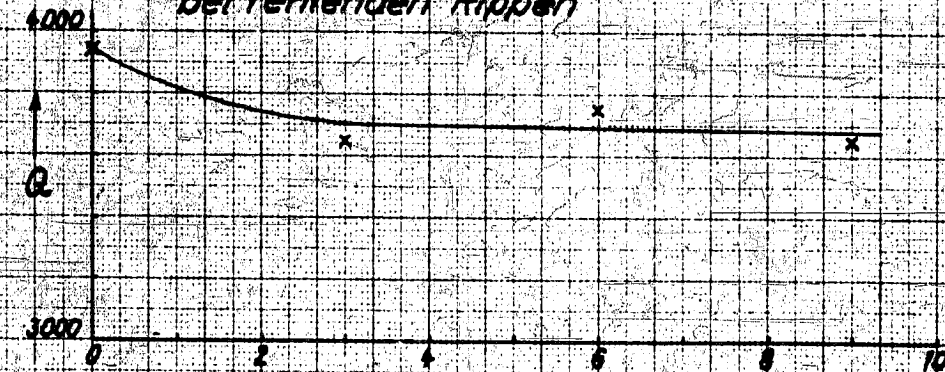
9:555

100 200 300 400 500 600 700 mm

Prozentuale Temperaturverringerung
in der Mitte eines ungerippten Rohrstückes
gegenüber einem gerippten Rohrstück



Wärmeleistung des Versuchsrohres
bei fehlenden Rippen



Wärmeübergangszahlen des Versuchsrohres
bei fehlenden Rippen

