

Betriebstechnisches - Büro Nr 870 (O . Bock)

2

Wärmetechnische Untersuchungen
und Bestimmung des Widerstandes
für verschiedene Flüssigkeiten am Einheits-Kühler.

Bericht

von

Josenhans / Amon

Hydrirung

Leuna Werke, d.5.3.1931

I n h a l t

<u>A)</u>	<u>Einleitung</u>	<u>Seite</u>
	Es wird ausgehend von Nachteilen der bis jetzt gebräuchlicher Bünde Kühler mit Schikunen-Blech die Konstruktion eines neuen Wärmeaustauscher Typs des Einheitskühlers, begründet.	3 - 4
<u>B)</u>	<u>Teil I</u>	
a)	Beschreibung der Konstruktion des Einheitskühlers unter Anführung der baulichen wie wärmetechnischen Vorzüge	5 - 8
b)	Zweck der wärmetechnischen Untersuchungen an der Neu Konstruktion und Beschreibung der Versuchs Apparatur	9 - 16
c)	Durchführung der Versuche und Art der Auswertung der Versuchsergebnisse	17 - 18
<u>C)</u>	<u>Teil II</u>	
	Versuchsergebnisse in tabellarischer und graphischer Darstellung	19 - 54
<u>D)</u>	<u>Teil III</u>	
	Kritische Betrachtung der gefundenen Wärmeübergangswerte und Entwicklung allgemein gültiger Gleichungen	55 - 78
	a) Widerstand	
	b) Wärmeübergang	
<u>E)</u>	<u>Zusammenfassung</u>	78 - 83
<u>F)</u>	<u>Literaturangabe</u>	84

Zusammenstellung

der regelmäßig benutzten Buchstaben-Bezeichnungen.

F	qm	Kühl- bzw. Heizfläche
f	qm	Strömungsquerschnitt
i		innen
a		außen
d	m	Rohrdurchmesser
l	m	Rohrlänge
P	mm Hg	Druck
p	mm Hg	Druckdifferenz
p	mm Hg	Widerstand
w	m/s	Geschwindigkeit
		w _i durch das Bündel
		w _a um das Bündel
	kg/cbm	Spezifisches Gewicht
	kg/l	
	kg s/m ²	absolute Zähigkeit
	qm/s	kinematische Zähigkeit
	m/s ²	Erdbeschleunigung
	$\frac{kg}{s^2}$	Dichte
	m ⁴	
t, T	°C	Temperaturen
	$\frac{kcal}{m^2 h}$	Wärmeleitfähigkeit bzw. Rohrreibungszahl
a = $\frac{1}{cp}$	$\frac{m^2}{h}$	Temp. Leitfähigkeit
cp	$\frac{kcal}{kg^{\circ}C}$	Spez. Wärme für konstanten Druck
	$\frac{kcal}{qm^{\circ}C h}$	Wärmeübergangszahl (i = innen a = außen)
K	$\frac{kcal}{qm^{\circ}C h}$	Wärmedurchgangszahl
Q	$\frac{kcal}{h}$	Wärmemenge
h		Stunde
sec, s		Sekunde
R = $\frac{w d}{\nu}$		Reynoldssche Zahl
Pe = $\frac{w d}{\alpha}$		Pécletsche Zahl
f ()		Funktion von
n, m		Exponenten.

Wärmetechnische Untersuchungen und Bestimmung
des Widerstandes für verschiedene Flüssigkeiten am Ein-
heits-Kühler.

Einleitung:

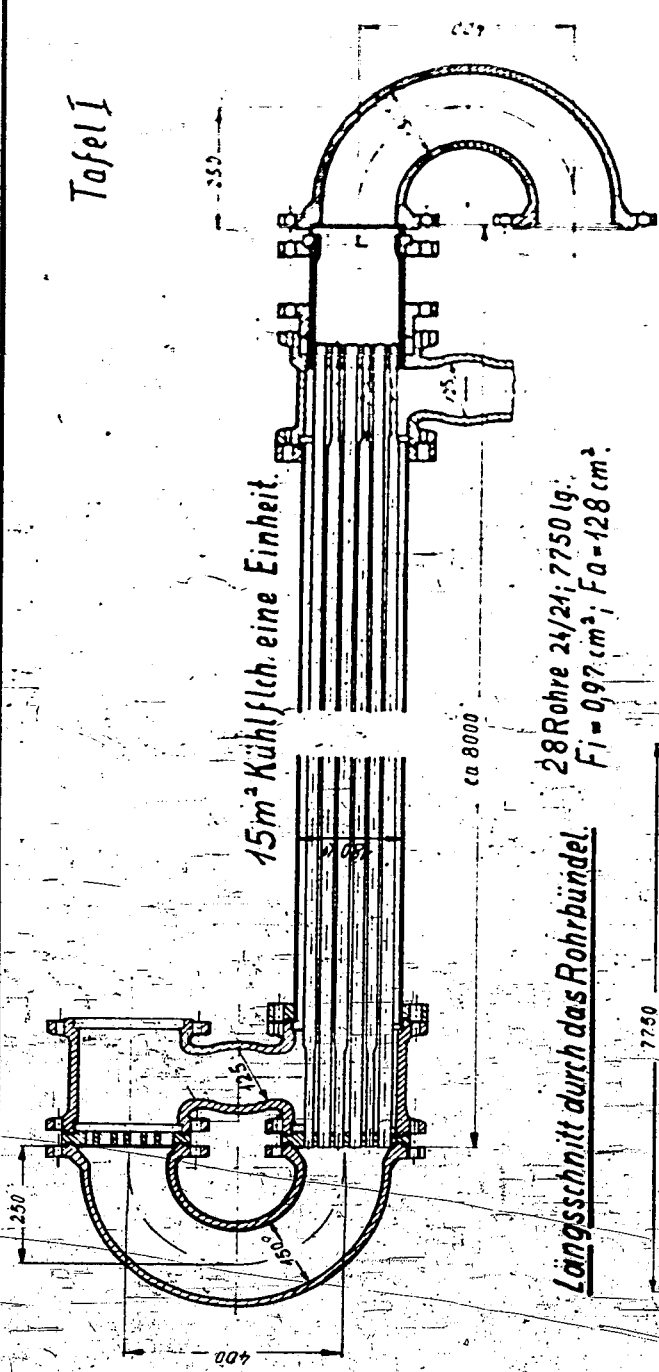
In der chemischen Industrie tritt häufig das Problem auf, Gase und insbesondere Flüssigkeiten aufzuwärmen oder abzukühlen. Beim Wärmeaustausch zwischen Gasen verwendete man bisher fast ausschließlich Rohrbündel-Austauscher von einer üblichen Länge von 3 bis 4 m, deren Rohre in zwei Rohrböden dicht eingesetzt sind. Der Weg um das Bündel ist mit Schikanenblechen ausgerüstet. Die Länge von 3 bis 4 m kann nicht wesentlich überschritten werden wegen der Wärmespannungen, die zwischen den Austauschrohren und dem Mantel auftreten. Bei diesen Kühlern kommt man bei Durchsatz von Gasen meist zu genügend hohen Geschwindigkeiten, so daß der Wärmeaustausch befriedigend ist.

Wesentlich ungünstiger wird jedoch die Verwendung dieser Kühler bei Wärmeaustausch zwischen Flüssigkeiten. Infolge der hohen Wärmekapazität der Flüssigkeiten ist zur Erreichung eines genügend hohen Regenerationswirkungsgrades ohne Vergrößerung der Heizfläche die Durchsatzmenge nach oben hin begrenzt. Dazu kommt, daß selbst bei maximal zulässigem Durchsatz die Produktgeschwindigkeit in dieser Apparatur noch tief im laminaren Gebiet liegt und damit bekanntlich mit nur niedrigen Wärmeübergangszahlen gerechnet werden kann. Die spez. Leistung des Apparates wird demnach schlecht. Die geometrische Form dieser Kühler ist fast immer mehr oder weniger ungeeignet zum Wärmeaustausch zwischen Flüssigkeiten.

Es wurde deshalb ein Apparat eigens zu diesem Zweck und speziell zum Wärmeaustausch zwischen Ölen entwickelt, der in hohem Maße den Forderungen, die man an ihn stellen muß, Rechnung trägt.

Dieser Apparat kann ebenso gut zum Kühlen von Gasen, besonders wenn dieselben unter höherem Druck stehen, z.B. als Zwischenkühler für Kompressoren, Verwendung finden.

Tafel I



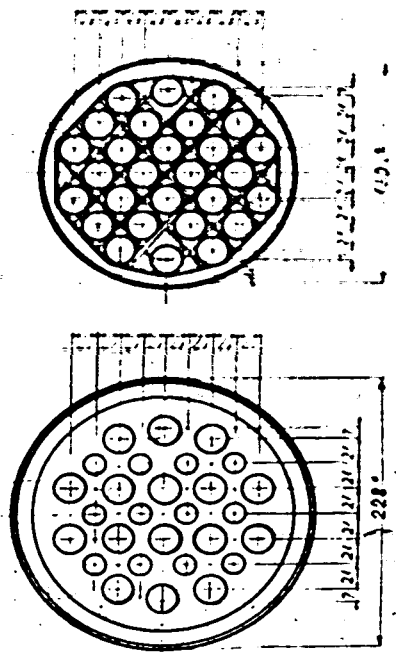
15m² Kühlfläch. eine Einheit.

ca 8000

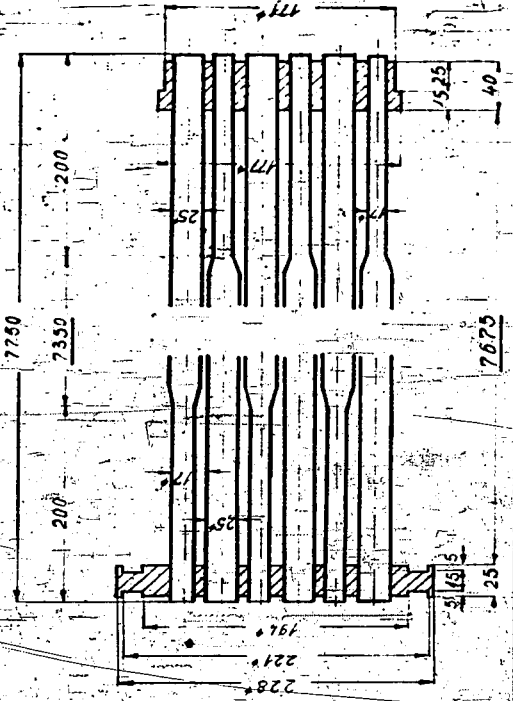
28Rohre 24/24; 7750 lg.
Fi = 0,97 cm²; Fa = 128 cm².

Walzboden

Schnitt durch Mitte Bündel



Längsschnitt durch das Rohrbündel



T e i l I .

Konstruktion des Kühlers.

Tafel I.

Der Wärmeaustauscher besteht aus einer beliebigen Anzahl von völlig gleichen Kühler- Elementen, die durch Guß- Krümmer bzw. Guß- Übergangsstücke miteinander verbunden sind, die Elemente kann man je nach Bedarf in beliebiger Weise hintereinander oder parallel schalten entsprechend dem zulässigen Widerstand und dem gewünschten Wärmeübergang. Hierbei ist die Flüssigkeits- Geschwindigkeit so zu wählen, daß sie über der kritischen Geschwindigkeit liegt.

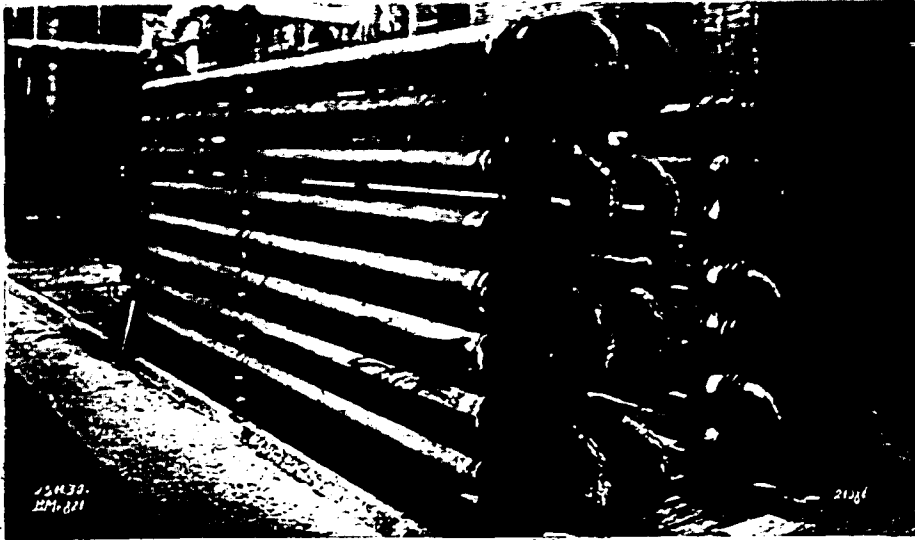
Ein Rohrbündel besteht aus 28 Rohren, 21 mm l.W. und 24 mm Außen- Durchmesser. Die lichte Weite ist die kleinstmögliche, welche eine innere Reinigung der Rohre von etwa angesetztem Kesselstein durch den Devoorde- Apparat noch zuläßt. Der äußere Querschnitt ist um 30% größer als derjenige innerhalb der Rohre. Die Rohre müssen deshalb äußerst dicht nebeneinander liegen. Um dies zu erreichen, ist in jedem Rohrboden je die Hälfte der Rohre auf 14 mm l.W. eingezogen, Schikanenbleche sind wegen des geringen Querschnitts auf der Außen-Seite nicht vorhanden, dagegen ist durch Flacheisen- Beilagen zwischen den Rohren dafür gesorgt, daß die Rohre auf der ganzen Länge parallel liegen müssen und nicht durchhängen können. Der eine Rohrboden ist zwischen Umführungs- Stück und Krümmer fest eingespannt, während der andere an einer Stopfbüchse verschiebbar angeordnet ist, um Wärmedehnungen, die zwischen den Bündelrohren und dem Mantelrohr auftreten, Rechnung zu tragen. Die Stopfbüchse ist so

konstruiert, daß im Falle einer Undichtigkeit diese nach außen zu auftritt, wodurch eine Verbindung zwischen dem Außen- und Innenraum ausgeschlossen ist. Diese kann nur auftreten, wenn die Rohre im Rohrboden undicht werden.

Die Übergangstücke und Doppelkrümmer bestehen aus dichtem, homogenen Elektro- Grauguß und sind nach hydraulischen Grundsätzen ausgebildet, sodaß der Widerstand auf ein Minimum gebracht wird.

Die Vorteile dieser Konstruktion gegenüber der bisher üblichen sind kurz zusammengefaßt folgende:

- 1.) Beliebige Zusammensetzbarkeit des Kühlers.
- 2.) Hohe Geschwindigkeit und dadurch hoher Wärmetübergang.
- 3.) Hohe Wassergeschwindigkeit im Kühler, es wird dadurch die Sauerstoffabscheidung an der Rohrwand weitgehend vermieden, wodurch die Wasserkorrosion der Rohre nur sehr gering sein dürfte.
- 4.) Ausziehbarkeit des Bündels, leichtes Reinigen auf beiden Rohrseiten. Bei Reparatur nur Auswechslung eines Teiles der gesamten Kühlfläche.
- 5.) Freie Wärmedehnungsmöglichkeit des Bündels.
- 6.) Geringer Platzbedarf des AUSTAUSCHERS.



Durch das Fehlen der Schikanenbleche wird reiner Parallelstrom der zum Wärmeaustausch gelangenden Medien erzielt. Es werden dadurch tote Räume, wie sie bei Schikanenführung auftreten können, vermieden. Es steigt dadurch der Ausnutzungsgrad der Fläche und damit eventuell die Wärmeleistung der Apparatur.

Beobachtungen, die man an beiden Kühlerarten im Betrieb gemacht hat, scheinen dies zu bestätigen. Die Klärung, inwieweit diese Beobachtungen stimmen, wäre wünschenswert und Stoff zu einer weiteren Forschungsarbeit.

Zweck der Untersuchungen und Beschreibung der Versuchsanlage.

Die Aufgabe der Untersuchungen war, die Leistungsfähigkeit der Neu-Konstruktion für verschiedene Ölsorten und Öldurchsätze zu prüfen und die Widerstände zu bestimmen.

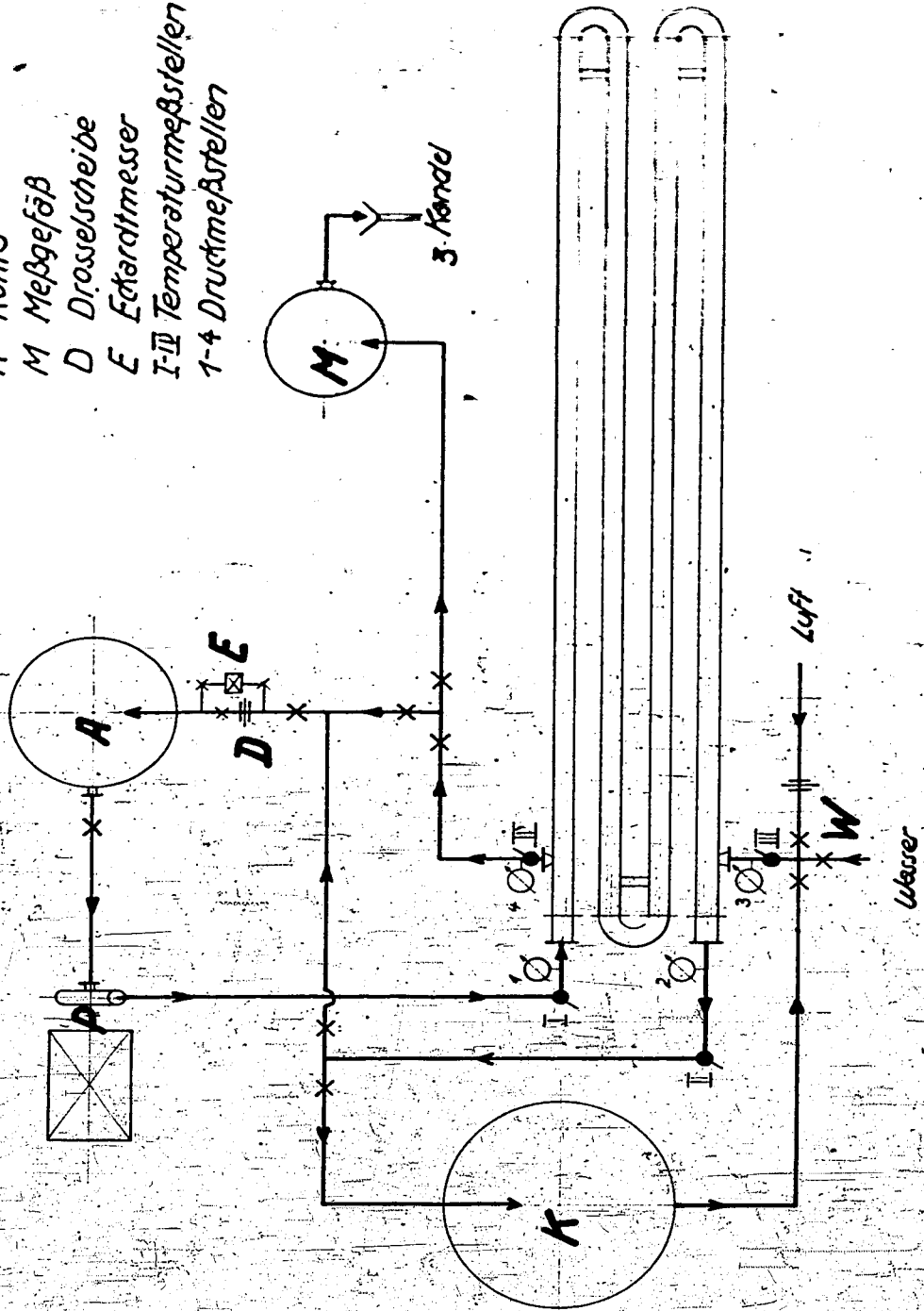
Es wurde zu diesem Zweck eine Versuchs-Apparatur aufgebaut, wie sie auf Tafel II skizziert ist.

Die Schaltung wurde so gewählt, daß die Apparatur sowohl als Kühler gefahren werden als auch als Regenerator arbeiten konnte.

Im ersten Fall saugt die Kreiselpumpe P das Produkt aus dem Gefäß A, das mit Heisschlangen versehen ist, an und drückt es durch den Innenweg der vier liegenden Bündel in die Blase A zurück. Das Kühlwasser vom Ventil W wird dem Produkt um das Bündel entgegengeführt und läuft über das Meßgefäß M ab.

Im zweiten Fall kehrt das Produkt, nachdem es den Innenweg der Bündel passiert hat, nicht direkt in die Blase zurück, sondern nimmt erst seinen Weg über den Kühler K und läuft ab - gekühlt dem warmen Produkt auf dem Weg um das Bündel entgegen.

- A Ansauggefäß
- P Pumpe
- K Kühler
- M Meßgefäß
- D Drosselscheibe
- E Eckdrütmesser
- I-IV Temperaturmeßstellen
- 1-4 Druckmeßstellen



Meß-Einrichtungen.

Die Drücke wurden an den jeweils angegebenen Punkten mit Quecksilber-Skale gemessen und zwar waren die Manometer so angeordnet und gefüllt, daß in der Nullstellung, die auf dem Quecksilber ruhende Wasserskale bei allen Manometern gleich war. Durch diese Anordnung können die Fehler, die durch die Beeinflussung der verschiedenen großen Wasserskalen, die während des Versuchs auf den einzelnen Quecksilberskalen lasten, am einfachsten eliminiert werden.

Der wirkliche Druckverlust zwischen zwei Meßstellen errechnet sich auf diese Weise zu

$$P' = P - \frac{P_1 - P_2}{2 \times 13,6}$$

wenn P_1 und P_2 die gemessenen Drücke sind.

Zur Temperaturmessung waren geeichte Thermometer eingebaut mit

$\frac{1}{10}$ Einteilung. Die Thermometer waren in direkter Berührung mit dem zu messenden Medium und so weit eingesteckt, daß der Einfluß des herausragenden Hg-Fadens im Hinblick auf die Genauigkeit der übrigen Messungen vernachlässigt werden konnte. Aus dem gleichen Grunde wurde von einer Isolation der Versuchsapparatur abgesehen, zumal

die mittlere Versuchstemperatur nie wesentlich über 50°C lag und das kältere Produkt der abkühlenden Außenluft am nächsten geführt wurde.

zur Volummessung standen eine abgerundete I.G. Drosselscheibe D, ein Eckardtmesser E und ein geeichtes Maßgefäß M zur Verfügung. Während der Dauer der einzelnen Versuche wurde hauptsächlich die Drosselscheibe, um die Stöße des Eckardtmessers zu vermeiden, benutzt, die jedoch vor jedem Versuch auf die Genauigkeit ihrer Anzeige für das jeweilige Produkt mittels der beiden anderen Geräte geprüft wurde.

Bestimmung der übrigen zur Auswertung nötigen physikalischen

Größen:

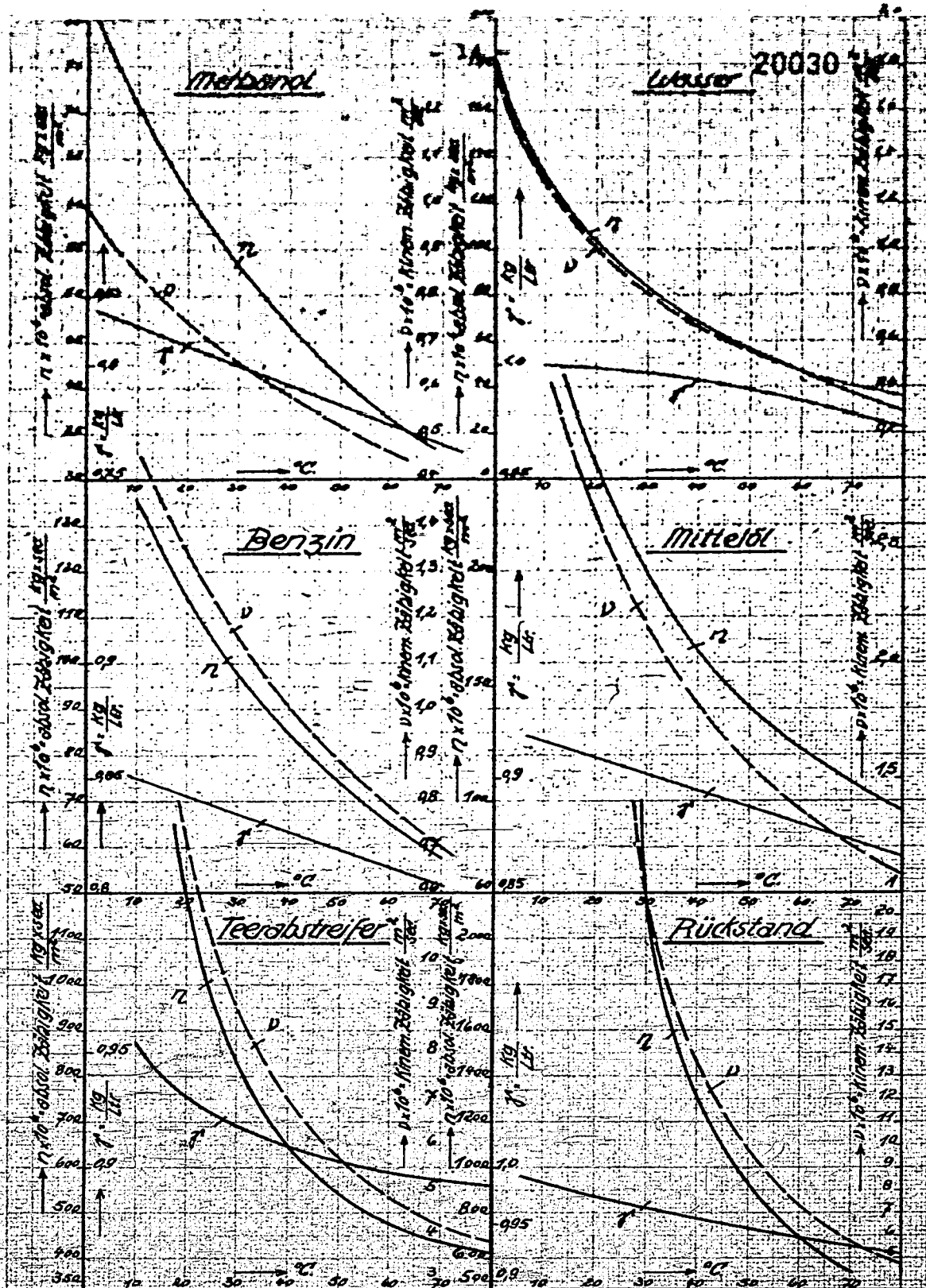
Angaben über Zähigkeiten, spezifisches Gewicht, und Wassergehalt der Öle wurden, soweit sie nicht in den Handbüchern gefunden werden konnten, auf die gebräuchliche Art bestimmt. Die Bestimmung der Zähigkeit geschah für die beiden zähesten Öle mit dem Engler-Viskosimeter, die der übrigen Medien wurde nach der Kapillar-Methode vorgenommen.

Diese Messungen wurden durch das chemische Laboratorium Me 24 ausgeführt. Die Werte für die einzelnen Medien sind kurvenmäßig in Abhängigkeit der Temperatur auf Tafel III aufgetragen.

Um in dieser Beziehung für die Versuchsauswertung brauchbare Werte zu bekommen, war es vor allem nötig, richtige Durchschnittsproben der gefahrenen Medien zu erhalten.

Es wurden deshalb von jedem Medium, nachdem der Versuch einige Zeit in Gang gekommen war, auf der Druckseite der Kreiselpumpe zu verschiedenen Zeiten Proben entnommen und die Gesamtproben, ca. 2 Liter, zur Untersuchung gegeben.

Außerdem sind zur Orientierung über die Größenordnung der spez. Wärmen und der Wärmeleitfähigkeit von Ölen in Abhängigkeit der Temperatur Tafel IV und V beigegeben. Die Werte sind nach Näherungsformeln, die das Bureau of Standards veröffentlichte, errechnet.



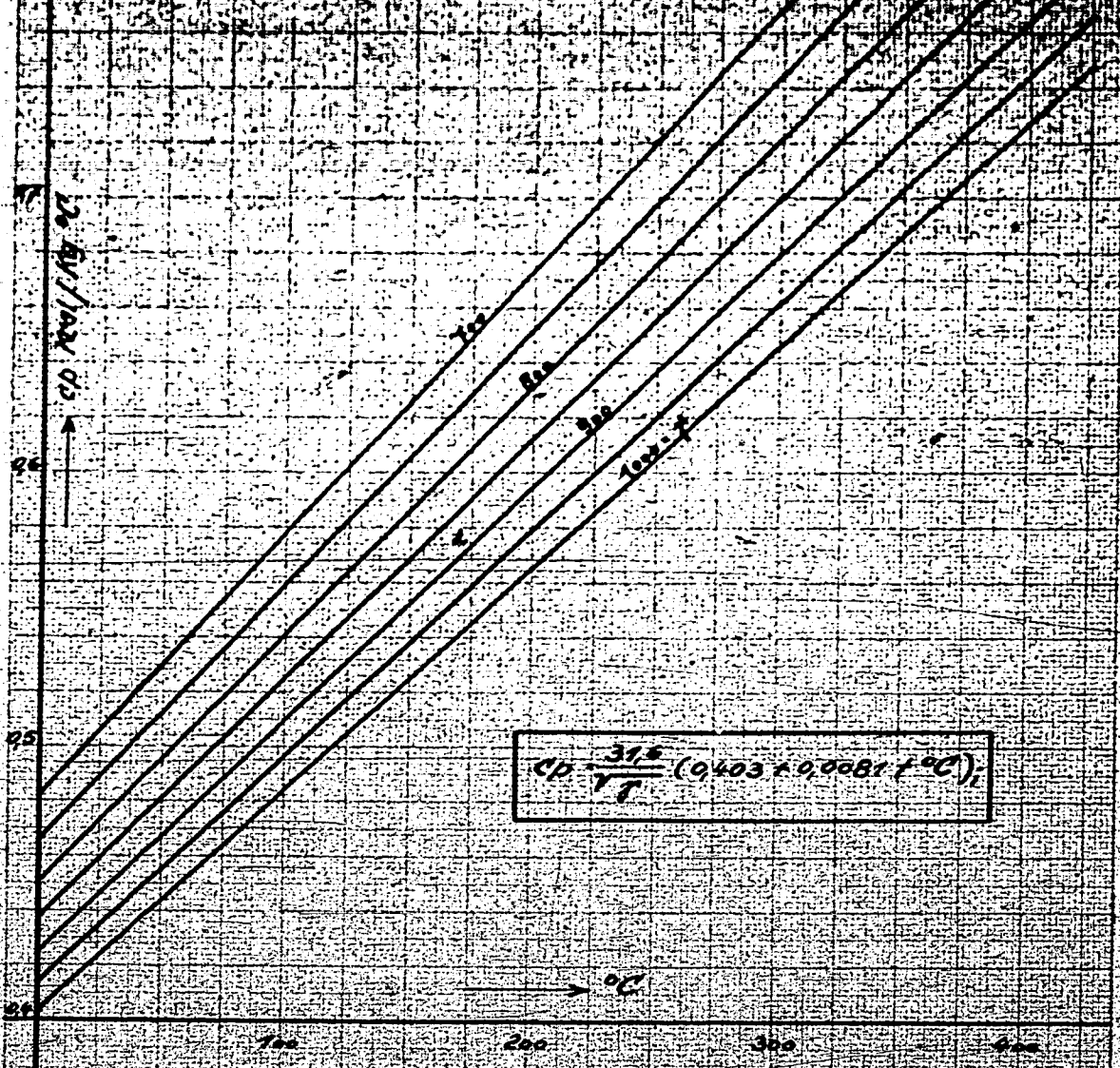
Ammoniakwerk Merseburg
 Gesellschaft mit beschränkter Haftung
 Chem. Merseburg

Spez. Gewichte u. Zähigkeiten
 der Versuchs-Flüssigkeiten

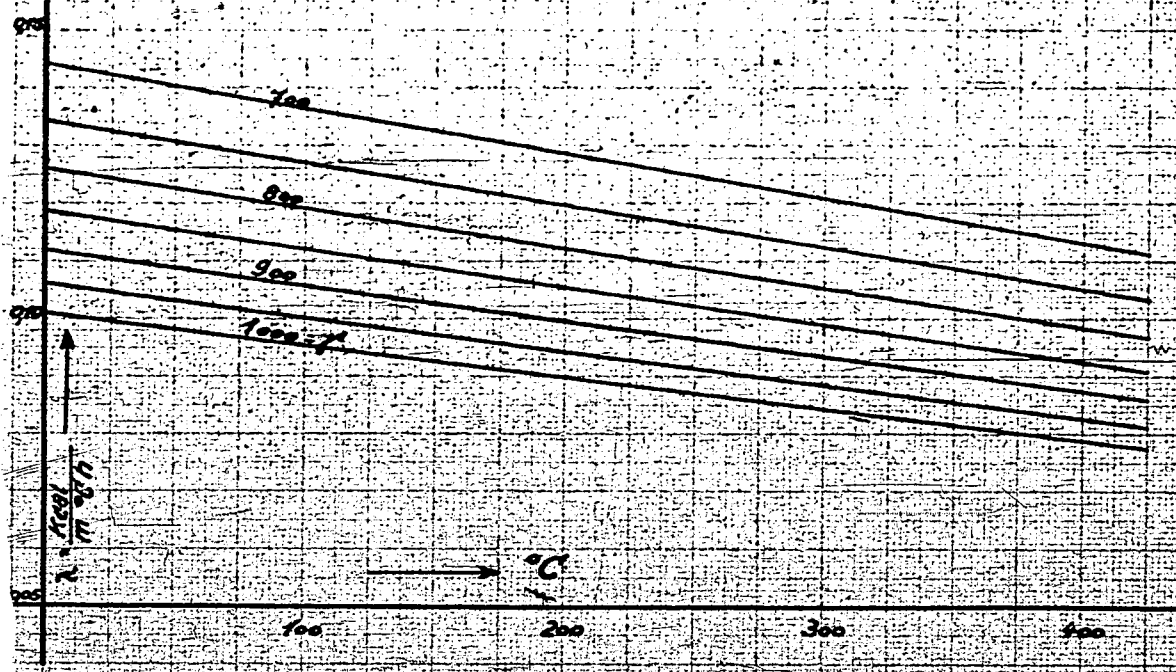
Tafel III

2.1.1911

Umrechnungstabelle
 von Celsius
 nach Fahrenheit
 des Bureau of Standards, Ta. 97, Rev. 29



Wahre Wärmeleitfähigkeit
von Erdölen
nach Veröffentlichungen
des Bureau of Standards Nr. 97/1927.



$$\lambda = \frac{101}{t} (1 - 0,005 t \text{ } ^\circ\text{C}) \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{ch}}$$

Durchführung der Versuche undArt der Auswertung der Versuchsergebnisse.

Die Reihenfolge der Versuche war festgelegt durch die großen Unterschiede der Öle in Bezug auf ihre Zähigkeit und der damit verbundenen Verschmutzung der Apparatur. Da die Zeit, die Apparatur nach jedem Versuch gründlich zu reinigen, nicht zur Verfügung stand, wurde mit dem leichtflüssigsten Medium begonnen. Die Volummessung geschah während der Versuche mittels der Drossel D, deren Anzeige für jedes Medium vor dem Versuch mit dem Eckardtmesser geprüft wurde. Die Kühlwassermessung wurde mit dem geeichten Meßgefäß M vorgenommen.

Mit den Widerstandsmessungen wurden gleichzeitig die Temperaturen zur Bestimmung der Wärmedurchgangszahlen gemessen. Der Kühlerversuch lief dem Regeneratorversuch für jedes Öl voraus, um die spezifischen Wärmen der Öle, die zur Durchführung der Regenerationsversuche notwendig sind, zu ermitteln.

Zur Ermittlung der Wärme- Durchgangs- und Übergangswerte ist zu erwähnen, daß in Folgendem alle Wärmedurchgangszahlen auf die innere Fläche des Bündels bezogen sind.

Die Übergangswerte der Regenerationsversuche wurden mit Hilfe folgender Überlegung errechnet.

Unter Vernachlässigung des Wärmewiderstandes der Rohrwandung, der unter 1% beträgt, gilt die Gleichung:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_a}} \quad \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C h}}$$

ist dann

$$F_1 = F_a \quad \text{und} \quad \alpha_1 = \alpha_a, \quad \text{so wird } K = \frac{\alpha}{2}$$

In vorliegenden Fällen ist weder $F_1 = F_a$ noch die Geschwindigkeit $w_1 = w_a$. Es muß deshalb sowohl eine Korrektur in Bezug auf die Fläche als auch auf die Geschwindigkeit vorgenommen werden

$$\text{Kühlfläche: } F_1 = 14 \text{ qm, } F_a = 16 \text{ qm,}$$

$$\text{Durchtritts-Querschnitt: } f_1 = 0,0097 \text{ qm, } f_a = 0,0128 \text{ qm, daraus ergibt sich:}$$

$$\text{Heizflächenkorrektur } \frac{16}{14} \alpha_a = \alpha_1 = 1,14 \alpha_a$$

$$\text{Geschwindigkeitskorrektur (der Geschwindigkeits- exponent angenommen zu 0,8)} \quad \left(\frac{128}{97}\right)^{0,8} \alpha_a = \alpha_1 = 1,25 \alpha_a$$

$$\text{Zusammen } 2,25 \alpha_a = 2,14 \alpha_1$$

$$\alpha_1 = 1,05 \alpha_a$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{1,05 \alpha_a} + \frac{1}{\alpha_a}}$$

$$\text{daraus } \alpha_1 = 2,05 K \quad \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C h}}$$

Teil II.

Versuchsunterlagen und Ergebnisse.Reihenfolge der Versuche.

- | | |
|-----------------|--|
| A) Wasser | a) Wasser durch das Bündel
Wasser um das Bündel |
| B) Methanol | a) Methanol durch das Bündel
Wasser um das Bündel
b) Methanol durch das Bündel
Methanol um das Bündel
c) Methanol durch das Bündel
Methanol um das Bündel |
| C) Schwebbenzin | a) Benzin durch das Bündel
Wasser um das Bündel
b) Benzin durch das Bündel
Benzin um das Bündel |
| D) Mittelöl | a) Mittelöl durch das Bündel
Wasser um das Bündel
b) Mittelöl durch das Bündel
Mittelöl um das Bündel |
| E) Teerabstr. | a) Abstreifer durch das Bündel
Wasser um das Bündel
b) Abstreifer durch das Bündel
Abstreifer um das Bündel |
| F) Rückstand | a) Rückstand durch das Bündel
Wasser um das Bündel
b) Rückstand durch das Bündel
Rückstand um das Bündel |

(Bei 17° C nur zur Widerst.-Bestimmung.)

Die Versuche wurden alle mit Ausnahme von E_b) mit Temperaturen zwischen 40 und 60° C durchgeführt.

Wasser durch das Bündel
Wasser um das Bündel

Unterlagen von Versuch Aa

Fr.	Meß- stelle 1 mm Hg	Meß- stelle I °C	Meß- stelle 2 mm Hg	Meß- stelle II °C	Meß- stelle 3 mm Hg	Meß- stelle III °C	Meß- stelle 4 mm Hg	Meß- stelle IV °C	m ³ /h H 2 O innen	m ³ /h H 2 O außen	Bem.
1	405	69,4	331	36,8	142	25,2	95	57,8	19,8	19,8	
2	624	66,4	505	35,5	258	24,2	185	54,8	26,25	26,25	Appa- rate neu
3	845	71,8	579	40,2	356	27,2	192	59,0	34,35	34,35	
4	1220	65,4	797	40,2	535	28,5	276	53,3	42,6	42,6	
5	486	79,4	441	45,6	143	26,8	110	60,5	15,6	15,6	
6	410	72,0	348	39,5	126	24,7	86	56,8	17,3	17,3	
7	618	78	492	48,5	214	27,8	141	57,4	23,4	23,4	
8	527	74	397	43,4	179	26,1	102	56,1	23,5	23,5	
9	521	74,6	364	45,2	198	26,5	107	55,8	26,0	26,0	Appa- rate stark verbl
10	640	72,0	447	44,7	231	26,0	118	53,2	28,5	28,5	
11	791	73,3	509	48	295	29,3	142	54,6	33,1	33,1	
12	884	76,4	618	50,8	344	29,2	193	54,4	33,5	33,5	
13	883	72	517	48,6	335	30,3	156	54,6	36,8	36,8	
14	998	73,6	611	51,2	392	31,4	175	53,8	40,4	40,4	
15	1240	69	715	50,8	507	33,6	216	51,7	46,5	46,5	
16	1516	72,4	824	54,7	620	36,6	257	54,3	52,0	52,0	

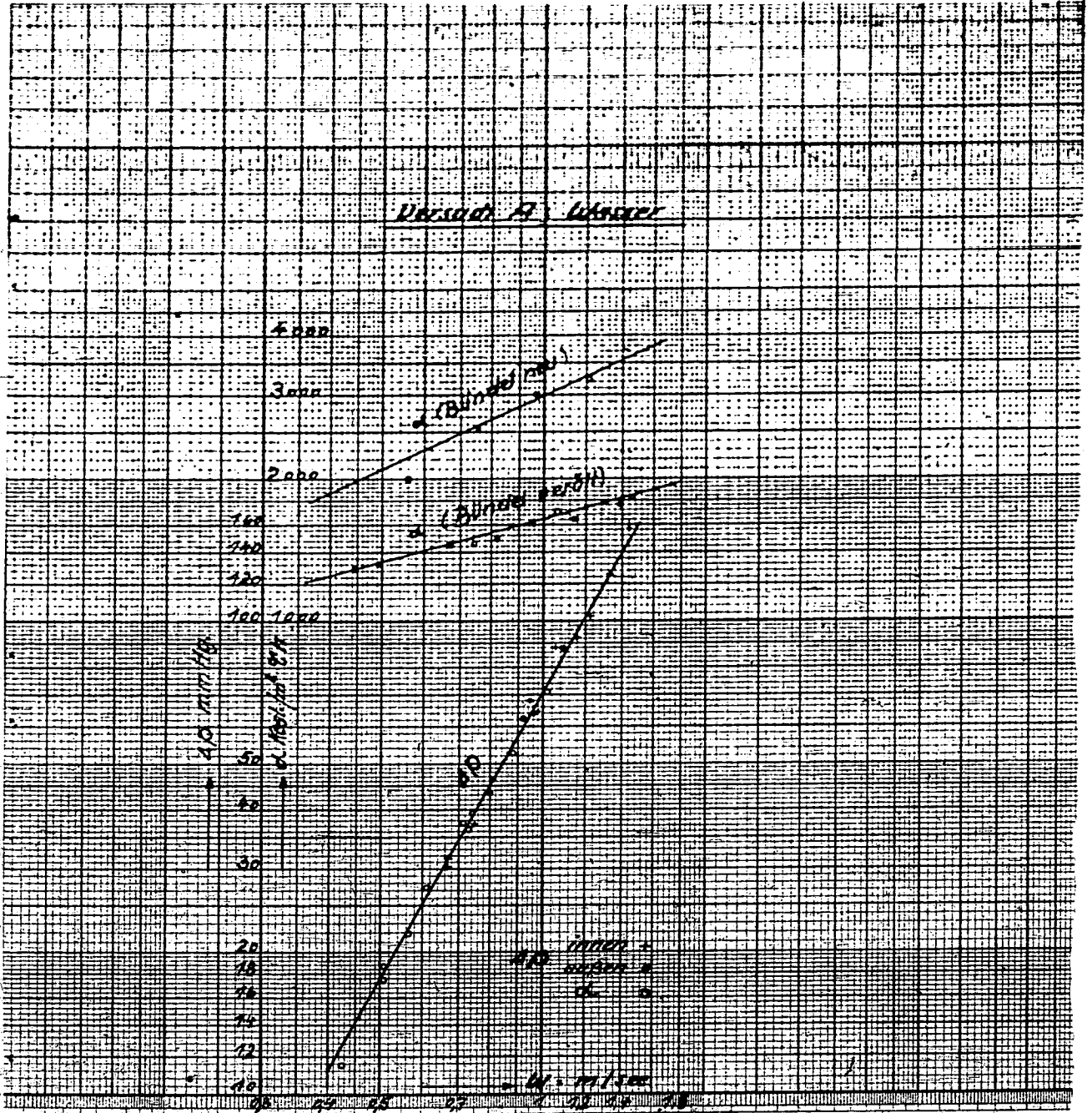
20036

Wasser durch das Bündel
Wasser um das Bündel.

Auswertung von Versuch Au

Nr.	Widerst. Einheit		Wärme- durchf. K	Wärme- überf. kcal/	Geschw. m/sek. = w _i	Geschw. m/sek. = w _a	Durchs. satz kg/h x 1000	Mittl. Temp. °C		Mittl. Temp. °C	Mittl. Temp. °C		Kinetische Zähigkeit qm/sek. x 10 ⁶	App. neu
	innen	ausen						innen	ausen		innen	ausen		
1	17,8	11,42	980	2010	0,560	0,425	19,50	53,1	41,5	0,987	0,992	0,545	0,65	
2	28,3	17,55	1240	2540	0,75	0,568	25,99	50,95	39,5	0,988	0,9925	0,550	0,66	
3	64,05	39,5	1480	3040	0,98	0,743	33,90	56,0	43,1	0,986	0,991	0,510	0,63	
4	101,75	62,1	1580	3240	1,215	0,925	42,00	52,8	40,9	0,987	0,992	0,530	0,65	
5	10,84	7,95	638	1300	0,445	0,337	15,4	62,5	43,65	0,983	0,991	0,465	0,62	
6	14,93	9,64	655	1345	0,495	0,376	17,2	55,75	40,75	0,986	0,992	0,510	0,65	
7	30,34	17,48	590	1205	0,665	0,505	23,0	63,25	42,6	0,982	0,9915	0,455	0,63	
8	31,3	18,5	710	1450	0,670	0,51	23,1	58,7	41,1	0,984	0,992	0,490	0,65	
9	37,75	21,9	721	1475	0,745	0,565	25,8	59,9	41,15	0,9835	0,992	0,480	0,65	
10	46,5	27,25	732	1505	0,818	0,62	28,25	58,35	39,1	0,9845	0,993	0,490	0,67	
11	68	36,9	790	1620	0,947	0,72	32,70	60,55	41,95	0,9835	0,992	0,470	0,64	
12	64	36,2	678	1380	0,96	0,73	33,15	63,6	41,8	0,982	0,992	0,450	0,64	
13	88	43,1	830	1700	1,055	0,80	36,5	60,3	41,95	0,9835	0,992	0,475	0,64	
14	93	52,1	800	1645	1,155	0,876	39,9	62,4	42,6	0,983	0,9915	0,465	0,63	
15	126	70	868	1720	1,33	1,01	46,0	59,9	42,65	0,984	0,9915	0,480	0,625	
16	169,5	87	900	1850	1,45	1,10	51,5	63,55	45,45	0,9825	0,990	0,450	0,60	
							Mittel	58,86	41,86	0,9843	0,9918	0,488	0,639	

20037



Methanol durch das Bündel
Wasser um das Bündel

Unterlagen von Versuch B₈

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Meß- stelle I mm Hg	Meß- stelle I OC	Meß- stelle 2 mm Hg	Meß- stelle II OC	Meß- stelle III OG	Meß- stelle IV OC	obm/h H 2 O	kg/h H 2 O x 1000	obm/h Methanol	kg/h Methanol x 1000		
336	46	153	29,0	17,0	34,5	13,6	13,5	28,8	23,1		
568	45,6	219	32,3	17,0	36,4	13,6	13,5	40,9	32,7		
285	46,4	171	27,2	17,1	32,1	13,6	13,5	22,3	18,0		

Auswertung von Versuch B_a

Methanol durch das Bündel
Wasser um das Bündel.

	Widerstand mm Hg innen	Wärme- durch- gang K ^{cal} m ² 0°C ^h	Geschw. des Methanols m/s	Geschw. des H ₂ O m/s	Wärme- über- gang d.H 2·0 α	Wärme- über- gang d.Methanols α	Spez. Wärme d Methanols op. Kcal kg ⁰ C	Mittl. Temp. °C innen	ρ kg/Ltr. innen	Kinemat. Zählgk. qm/s. x 10 ⁶	
1	44	361	0,822	0,295	800	660	0,6	37,5	0,794	0,595	
2	84	395	1,165	0,295	800	780	0,6	38,95	0,793	0,59	
3	27,3	302	0,638	0,295	800	486	0,585	36,8	0,7945	0,59	
								Mittel:	37,75	0,7938	0,595

Unterlagen zum Versuch B b

Methanol durch das Bündel

Methanol um das Bündel.

Temperatur 17° C, $\rho = 0,82$.

	Meß- stelle 1 mm Hg	Meß- stelle 2 mm Hg	Meß- stelle 3 mm Hg	Meß- stelle 4 mm Hg	cm/h Methanol	kg/h Methanol x 1000
1	489	312	232	132	28,5	23,4
2	657	392	326	172	35,0	28,75
3	887	510	411	214	40,6	33,2
4	1019	584	493	244	45,2	37
5	1233	684	582	283	49,5	40,6
6	1414	792	669	324	53,5	44,0
7	1509	842	712	343	55,2	45,4

Anwertung zum Versuch B b

Methanol durch das Bündel

Methanol um das Bündel

Temperatur 17° C, $\nu = 0,82$

	Widerstand mm Hg innen	Widerstand mm Hg außen	Geschwindigk. m/s innen	Geschwindigk. m/s außen	Kinemat. Zähigkeit ν m ² /s x 10 ¹
1	40,2	24,1	0,815	0,62	0,77
2	63,2	37,2	1,0	0,76	0,77
3	90,5	47,5	1,16	0,88	0,77
4	128,5	60,0	1,295	0,98	0,77
5	131,5	71,8	1,42	1,08	0,77
6	149,0	83,0	1,535	1,16	0,77
7	161,0	88,8	1,58	1,20	0,77

Unterlagen zu Versuch B₀

Methanol durch das Bündel
Methanol um das Bündel.

	Meßstelle I mm Hg	Meßstelle II mm Hg	Meßstelle III °C	Meßstelle IV mm Hg	Meßstelle V °C	cbm/h Methanol	kg/h Methanol x 1000
1	362	201	20,6	105	31,9	22,3	18,0
2	669	483	20,2	152	34,3	28,8	23,1
3	839	535	21,7	181	34,2	35,5	28,5
4	898	524	22,3	206	31,7	40,9	32,7

20043

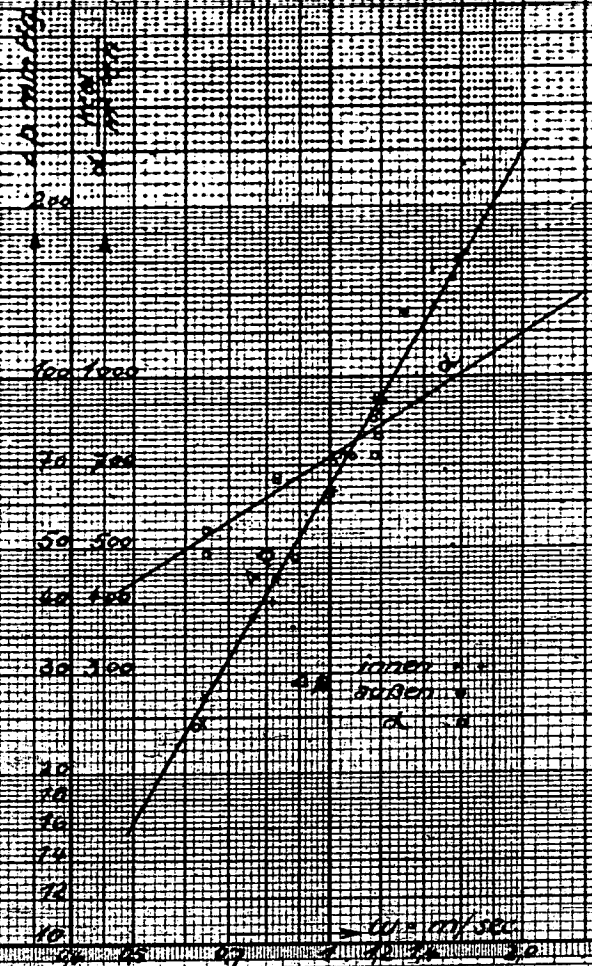
- 27 -

Auswertung von Versuch B.

Methanol um das Bündel
Methanol durch das Bündel.

	Widerst. mm Hg innen	Widerst. mm Hg außen	Wärme- durch- gang $\times \frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C h}}$	Geschw. des Methanols m/s innen	Geschw. des Methanols m/s außen	Wärme- über- gang $\times \frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C h}}$	Mittl. Temp. $^\circ\text{C}$ innen	m kg/Ltr. innen	Kinemat. Zählgk. $\frac{\text{qm}}{\text{s}}$ 10^6 innen	Mittl. Temp. $^\circ\text{C}$ außen	m kg/Ltr. außen	Kinemat. Zählgk. $\frac{\text{qm}}{\text{s}}$ 10^6 außen
1	24,3	16,6	262	0,638	0,482	537	34,60	0,796	0,752	26,25	0,803	0,68
2	44,6	22,8	329	0,821	0,622	672	37,95	0,793	0,708	27,25	0,802	0,675
3	73	35,6	346	1,015	0,770	710	38,00	0,793	0,708	27,95	0,801	0,67
4	90	42,7	356	1,165	0,882	730	36,30	0,794	0,728	27,00	0,802	0,675
						Mittel	36,71	0,794	0,724	27,11	0,802	0,675

Version B: Method



- 30 -

Unterlagen zum Versuch σ_a

Schwerbenzin durch das Bündel
Wasser um das Bündel.

Bündel verschmutzt.

Mess- stelle I mm Hg	Mess- stelle I °C	Mess- stelle 2 mm Hg	Mess- stelle II °C	Mess- stelle 3 mm Hg	Mess- stelle III °C	Mess- stelle 4 mm Hg	Mess- stelle IV °C	cm ³ /h Benzin	kg/h Benzin x 1000
228	49,8	105	33,7	16,8	38,8	22	18,2	5,75	5,72
353	40,8	140	31,5	16,3	32,6	28,4	23,4	5,75	5,72
493	48,5	182	37,7	16,8	41,2	35,2	29,2	5,75	5,72
597	41,1	208	33,9	16,5	34,2	40,3	33,3	5,75	5,72
753	45,4	254	37,2	16,7	40	45	37,2	5,75	5,75
881	46,0	289	38,6	16,8	38,2	49,4	40,8	5,75	5,75
1154	46,8	366	39,8	16,7	41,9	56,8	46,9	5,75	5,75
1258	47,5	392	40,4	16,8	41,8	59,8	49,4	5,75	5,75

Auswertung von Versuch C₂

Schwerbenzin durch das Bündel
Wasser um das Bündel

	Widerst. Einheit mm Hg innen	Wärme durchgg. kcal $\frac{qm}{1000 h}$ bez. F1	Geschw. m/Sek. w ₁ Benzin innen	Geschw. m/Sek. w ₂ H ₂ O außen	Mittl. Temp. °C innen	μ kg/Ltr. innen	Kinemat. Zählg. $m^2/s \times 10^6$ innen	Spez. Wärme kcal $\frac{kg}{1000}$ Benzin
1	29,6	166	0,63	0,124	41,6	0,826	0,985	0,432
2	51,2	149	0,815	0,124	36,15	0,830	1,055	0,432
3	74,5	191	1,01	0,124	43,1	0,824	0,965	0,446
4	93,5	164	1,155	0,124	37,5	0,829	1,040	0,424
5	120	215	1,29	0,124	41,3	0,826	0,985	0,439
6	142,5	174	1,41	0,124	42,3	0,825	0,975	0,415
7	189	214	1,625	0,124	43,3	0,824	0,965	0,438
8	208	205	1,71	0,124	44,85	0,823	0,955	0,412
				Mittel:	41,3	0,826	0,990	0,429

Unterlagen zum Versuch C_b

Schwerbenzin durch das Bündel
Schwerbenzin um das Bündel.

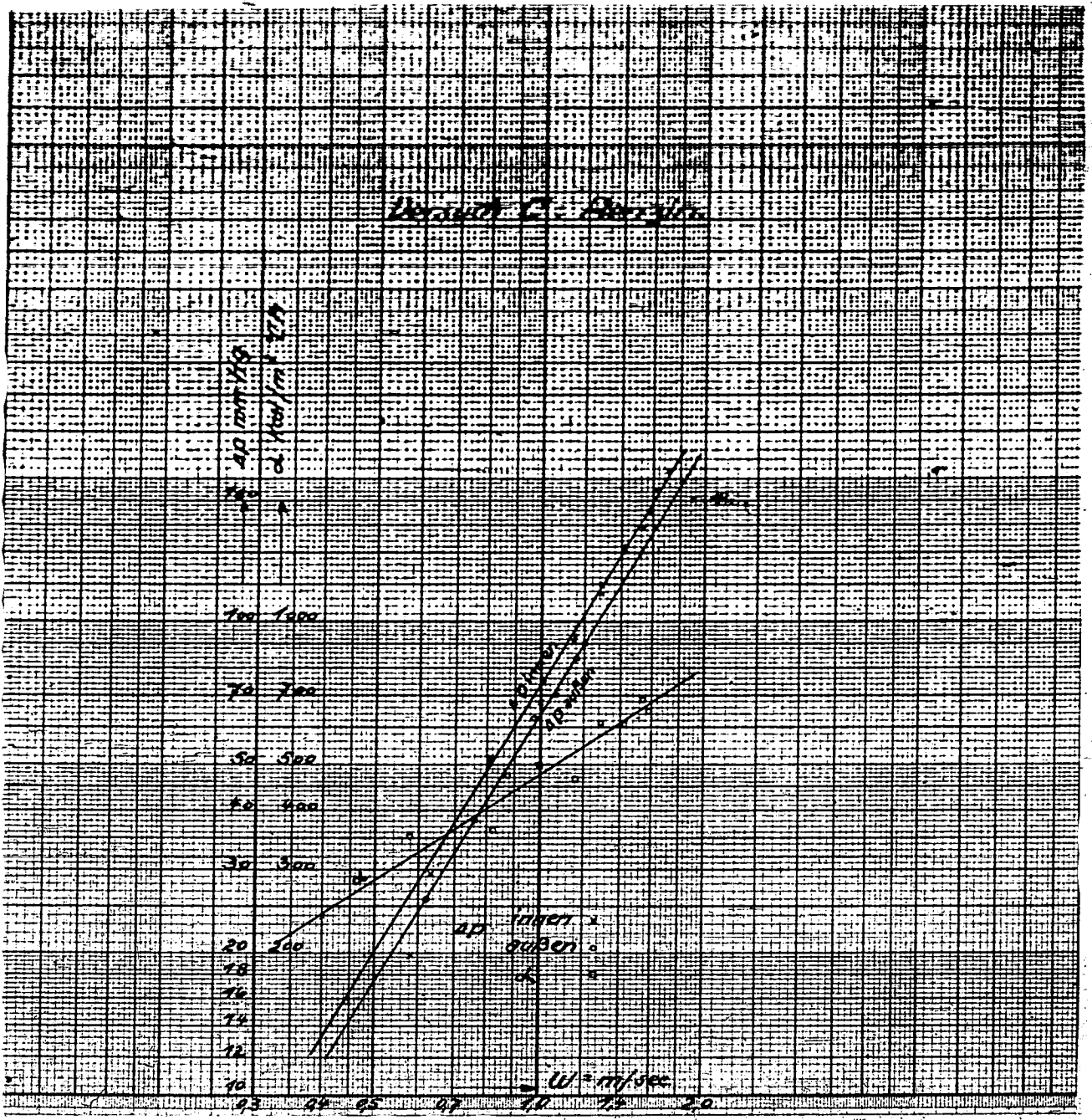
	Meß- stelle I mm Hg	Meß- stelle I °C	Meß- stelle 2 mm Hg	Meß- stelle II °C	Meß- stelle 3 mm Hg	Meß- stelle III °C	Meß- stelle 4 mm Hg	Meß- stelle IV °C	cbm/h Benzin	kg/h Benzin x 1000
1	240	56,8	158	35,8	150	20,0	92	41,2	20,2	16,65
2	725	43,5	513	32	242	20,1	137	31,8	28,4	23,45
3	663	53,8	274	37,6	243	21,1	175	39	35	28,9
4	921	45,3	525	34,7	406	23,4	208	33,5	40,3	23,2
5	1086	53,0	602	39,2	513	26	252	39,8	45	37,2
6	1302	50,6	702	38,6	585	26,1	288	38	49,3	40,7
7	1450	51,8	792	39,7	674	27,5	323	39,4	53,5	44,2
8	1568	51,2	854	39,9	718	27,7	347	38,7	55,5	45,8
<u>Bündel verschmutzt.</u>										

Schwerbenzin durch das Bündel
Schwerbenzin um das Bündel.

Auswertung von Versuch 03
03 a 0 429

Nr	Miderst- mm Hg		Geschw. m/sek		Miderst- mm Hg		Geschw. m/sek		Mittl. Temp. °C		Mittl. Temp. °C		kg/utr		Kinet. Wdhg. $\frac{1}{2} v^2 \times 10^6$		Wärme- durchg.		Wärme- übersch.		Finest- Schicht.				
	innen	außen	innen	außen	innen	außen	innen	außen	innen	außen	inner	außen	kg/utr	inner	außen	kg/utr	inner	außen	in	OC	h	in	OC	h	außen
1	19,8	15,8	0,58	0,44	46,3	30,6	0,82	0,834	0,93	170	354	1,145													
2	51	25,6	0,815	0,62	36,8	30	0,828	0,834	1,05	176	362	1,145													
3	08	38,3	1,0	0,76	45,7	31,05	0,821	0,833	0,935	243	500	1,135													
4	95,5	47,8	1,155	0,875	40	28,5	0,826	0,836	1,05	229	470	1,18													
5	116	52,8	1,29	0,98	46,1	32,9	0,821	0,82	0,92	298	612	1,11													
6	143,5	62,8	1,415	1,07	44,5	32	0,822	0,833	0,95	297	611	1,12													
7	159	84,5	1,535	1,16	45,7	33,45	0,821	0,832	0,935	332	681	1,1													
8	171,5	89,2	1,592	1,205	45,6	33,2	0,821	0,832	0,935	315	648	1,105													
		Mittel		45,85		31,45		0,822		0,832		0,938		Bündel verschliffen.										1,120	

20049



Unterlagen von Versuch D_a

Mittelöl durch das Bündel

Wasser um das Bündel.

	Mess- stelle 1 mm Hg	Mess- stelle I °C	Mess- stelle 2 mm Hg	Mess- stelle II °C	Mess- stelle III °C	Mess- stelle IV °C	cm/h H 2 O außen	cm/h Öl innen	Bem.
1	229	62,9	112	28,1	19,0	37,7	15,9	21,15	x
2	339	64,1	148	30,3	19,1	42,1	15,9	28,1	x
3	474	62,9	193	32,7	19,0	45,1	15,9	34,8	x
4	593	61,9	231	32,5	19,0	47,5	15,9	39,65	x
5	528	62,4	208	26,8	19,0	32,5	39,5	36,5	x
6	769	62,7	287	28,2	19,0	35,2	39,5	45,4	x
7	1193	67,3	393	41,1	19,0	47,3	22,0	57,0	y
8	986	66,5	333	39,1	19,2	45,3	22,0	51,0	y
9	1006	67,0	339	39,3	19,0	45,5	22,0	51,0	y
10	781	66,5	270	37,4	19,2	43,7	22,0	44,0	y
11	725	67,7	256	37,2	19,2	43,5	22,0	42,5	y
12	506	64,4	191	33,2	19,2	39,4	22,0	34,6	y
13	525	64,0	195	33,4	19,2	38,8	22,0	34,6	y
14	325	64,3	138	30,4	19,2	35,6	22,0	25,7	y

x = Bündel neu,

y = Bündel verölt innen und außen.

Angabe von Versuch

Mittelwert nach 600 Bündel
Messer um das Bündel

Bündel neu	Widerst. Einheit mm Hg	Wärme durchgang Kcal/m ² h	Geschw. m/sek Cl	Geschw. m/sek außen	Durch- satz in kg/h x 1000	Wasser- durchgang kg/h x 1000	Mittl. Temp. °C	kg/Ltr. Spez. Gew.	Kinemat. Zähligk. cm ² /s	Spez. Wärme Kcal kg °C
1	28,2	342	0,608	0,345	18,65	15,8	45,5	0,883	1,65	0,445
2	46,0	414	0,805	0,345	24,8	15,8	47,3	0,882	1,61	0,430
3	67,8	481	0,995	0,345	30,7	15,8	50,28	0,88	1,55	0,444
4	86,8	592	1,135	0,345	35	15,8	47,2	0,882	1,61	0,435
5	77	590	1,042	0,85	32,2	39,4	41,6	0,884	1,68	0,458
6	116	705	1,30	0,86	40	39,4	45,45	0,883	1,65	0,456
7	195	521	1,635	0,478	50	21,9	54,2	0,877	1,47	0,465
8	159	490	1,460	do.	44,7	do.	52,8	0,878	1,49	0,455
9	160,5	494	1,460	do.	44,7	do.	53,15	0,878	1,490	0,458
10	123	466	1,260	do.	38,6	do.	51,95	0,879	1,51	0,467
11	113	448	1,215	do.	37,25	do.	52,45	0,878	1,49	0,459
12	75,5	402	0,99	do.	30,4	do.	48,8	0,881	1,57	0,455
13	79,5	390	0,99	do.	30,4	do.	48,6	0,881	1,57	0,452
14	75,2	311	0,735	do.	22,5	do.	47,35	0,882	1,61	0,453
					Mittel:		49,26	0,8806	1,568	0,451

Unterlagen von Versuch D_0

Mittelöldurch das Bündel

Mittelöl um das Bündel

	Meß- stelle 1 mm Hg	Meß- stelle I °C	Meß- stelle 2 mm Hg	Meß- stelle II °C	Meß- stelle 3 mm Hg	Meß- stelle III °C	Meß- stelle 4 mm Hg	Meß- stelle IV °C	innen m ³ /h Öl außen	innen kg/h Öl x 1000 außen	
1	1003	53	597	37,5	478	27	247	42,2	42,45	37,5	x
2	1100	61,9	706	41,2	431	26,2	228	46,4	39,7	35,2	x
3	826	54,7	551	37,3	343	25,0	187	42,3	34,2	30,04	x
4	834	63,3	543	41,7	339	25,6	186	47,2	34,0	30,0	x
5	605	52,1	399	36,4	267	23,6	152	39,5	29,5	26,1	x
6	568	51,2	388	35,7	231	22,6	137	37,7	26,6	23,6	x
7	442	53,6	314	35,1	171	22,4	109	41,3	21,5	19,0	x
1	254	54,9	172	37,0	145	22,6	87	40,6	17,4	15,4	y
2	369	53,0	231	37,8	204	24,2	110	39,2	22,8	20,2	y
3	516	55,6	310	40,2	264	26,3	136	41,7	28,1	24,95	y
4	738	50,45	426	38,4	363	27,3	178	38,9	34,0	30,1	y
5	904	54,3	516	41,7	434	29,7	209	42,5	38,9	34,4	y
6	1276	47,9	712	38,7	603	29,2	285	38,1	46,7	41,4	y
7	1554	54	857	43,8	708	32,2	333	41,9	51	45,2	y
8	1677	47,0	928	39,6	786	31,0	264	38,2	54,4	48,25	y

x = Bündel neu,
y = Bündel verschmutzt.

Auswertung von Versuch D₃

$c_p = 0,451$

Mitteltl durch das Bündel
Mitteltl um das Bündel.

Widerst. Einheit	Widerst. Einheit	Mittl. Temp. °C		Geschw. m/sek.		kg/Ltr.	kg/Ltr.	m	K kcal/m ² °C h bezw. F1	Wärmeübergang kcal/m ² °C h bezw. F1	Kinetat. Zähigk. x 10 ⁶	Kinetat. Zähigk. x 10 ⁶
		innen	außen	innen	außen							
mm Hg	mm Hg											
innen	außen											
1	97,8	45,25	34,6	1,21	0,915	0,8835	0,892	434	890	1,66	1,98	Bündel neu
2	94,8	51,55	35,3	1,14	0,865	0,879	0,890	376	775	1,52	1,91	
3	71	46,0	33,7	0,98	0,745	0,883	0,893	340	700	1,64	2,01	
4	70,5	52,5	36,4	0,975	0,74	0,878	0,89	324	660	1,50	1,91	
5	49,5	44,3	31,5	0,845	0,64	0,884	0,895	250	535	1,68	2,07	
6	43,3	42,4	37,7	0,76	0,578	0,885	0,889	218	446	1,70	1,87	
7	30,8	44,35	31,85	0,615	0,468	0,884	0,895	-	-	1,60	2,07	
1	12,8	45,8	31,60	0,497	0,378	0,883	0,896	-	-	1,64	2,07	Bündel verschmutzt
2	33,3	45,4	31,7	0,652	0,495	0,883	0,895	178	365	1,64	2,07	
3	49,5	47,9	34,0	0,805	0,61	0,882	0,8925	220	452	1,59	2,01	
4	76,2	44,47	32,8	0,97	0,735	0,884	0,8935	254	520	1,68	2,02	
5	93,2	48,0	35,1	1,11	0,84	0,882	0,89	294	604	1,59	1,91	
6	136	43,4	33,6	1,335	1,015	0,885	0,893	309	632	1,70	2,01	
7	167,5	48,9	35,6	1,46	1,105	0,881	0,891	320	658	1,57	1,94	
8	180	42,2	31,6	1,555	1,18	0,885	0,892	324	663	1,70	1,98	
	Mittel:	46,295	34,13			0,8827	0,8925			1,632	1,99	

20054

Unterlagen zum Versuch E_2

Teerabstreifer durch das Bündel

Wasser durch das Bündel

	Kupf- stelle 1 mm Hg	Kupf- stelle I °C	Kupf- stelle 2 mm Hg	Kupf- stelle II °C	Kupf- stelle III °C	Kupf- stelle IV °C	cm ³ /h 01	kg/h 01 x 1000	cm ³ /h Wasser	kg/h Wasser x 1000
1	245	65	125	44,6	17,7	27,2	18,8	17,0	19,5	19,4
2	398	63,8	148	41,2	17,8	32,8	27,2	24,7	19,5	19,4
3	549	65	185	40,6	17,8	37,4	33,4	30,25	19,5	19,4
4	703	63,2	228	41,3	17,9	38,3	38,5	34,9	19,5	19,4
5	827	65,7	263	43,8	17,7	40,3	43,0	39	19,5	19,4
6	982	62	311	41,8	17,8	40,1	47,2	42,8	19,5	19,4
7	1130	64,3	354	43,9	17,7	43,1	50,95	46	19,5	19,4
8	1278	64,4	389	44,4	17,9	43,5	54,4	49,4	19,5	19,4
1	303	57,6	108	35,9	17,4	32,4	23,7	21,5	17,5	17,45
2	371	56,8	153	34,2	17,5	32,4	25	22,7	17,5	17,45
3	524	57,1	196	35,6	17,5	34,6	31,4	25,5	17,5	17,45
4	556	55,4	204	36,3	17,4	33,7	33,2	30,1	17,5	17,45
5	666	56	240	36,3	17,6	36,4	36,4	33	17,5	17,45
6	808	56,7	286	36,8	17,6	38,3	41,0	37,1	17,5	17,45

ALBWEISSUNG VON VORSTÄBEN

28

Verarbeitete durch das Bündel

... des Bündel

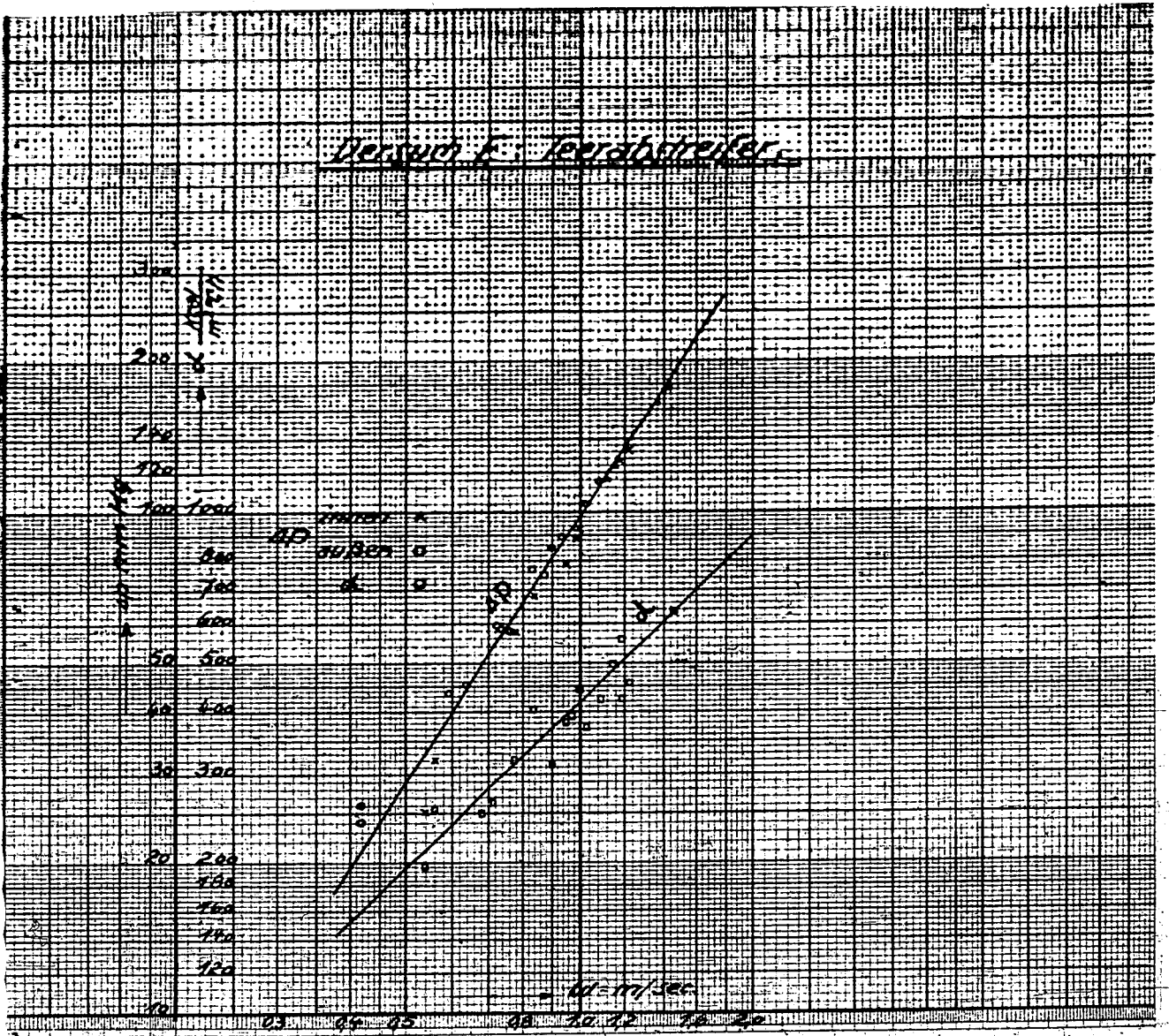
Widerst. Einkauf mm Hg	Wärme- übergang Koeff. qm ² /h °C/K	Geschw. m/sec. des Öls innen	Querschnitt des H 2 O außen	Mittl. Temp. °C innen	Spez. Gewicht des Öls	Spez. Wärme kapazität des Öls	Minimale Zähigkeit des Öls x 10 ⁶ innen	Spez. Wärme kapazität des Öls	Wärme- übergang des H ₂ O	Wärme- übergang des Öls
1	29,4	0,54	0,422	54,8	0,900	0,532	5,30	0,532	1420	112
2	50	0,78	0,423	52,5	0,902	0,522	5,50	0,522	1420	227
3	87,5	0,95	0,423	52,8	0,903	0,518	5,45	0,518	1420	335
4	114,5	1,1	0,423	52,25	0,903	0,520	5,55	0,520	1420	372
5	136	1,23	0,423	54,4	0,901	0,495	5,35	0,495	1420	391
6	161	1,35	0,423	52	0,904	0,50	5,55	0,50	1420	429
7	186	1,45	0,423	54,1	0,901	0,525	5,35	0,525	1420	508
8	214	1,56	0,423	54,4	0,901	0,502	5,35	0,502	1420	503
			Mittel:	53,40	0,9018		5,425			
1	47	0,68	0,383	45,8	0,905	0,565	6,15	0,565	1740	250
2	52,5	0,715	0,383	45,5	0,9065	0,515	6,35	0,515	1740	298
3	79	0,90	0,383	46,4	0,906	0,490	6,20	0,490	1740	315
4	85	0,95	0,383	46,0	0,906	0,500	6,10	0,500	1740	297
5	102	1,04	0,383	45,4	0,906	0,510	6,20	0,510	1740	373
6	126	1,175	0,383	46,8	0,905	0,490	6,15	0,490	1740	425
			Mittel:	46,32	0,906		6,19	0,513		

x = Bündel veralt.
y = Bündel neu.

Unterlagen zum Versuch E_0

Teerabstreifer durch das Bündel
Teerabstreifer um das Bündel

	Meß- stelle 1	Meß- stelle I	Meß- stelle 2	Meß- stelle II	Meß- stelle 3	Meß- stelle III	Meß- stelle 4	Meß- stelle IV	m ³ /h 01	kg/h 01	
	mm Hg	°C	mm Hg	°C	mm Hg	°C	mm Hg	°C	innen außen	innen außen	
1	357	59,7	252	49,2	211	31,8	102	42,2	18,8	17	Bündel um Teerabstreifer
2	828	64,2	587	48,7	319	26,4	139	42	27,1	24,5	
3	817	55,4	490	46,9	418	24,7	171	43	33,3	30,1	
4	1248	59,5	764	47,4	547	28,8	227	40,8	38,7	35	
5	1283	56,0	739	48,9	624	37,8	252	44,7	43,1	39	
6	1616	59,7	927	49	730	34	299	44,4	47,1	42,6	
7	1700	58,5	960	48,8	807	36,6	328	45,4	50,1	45,6	
1	428	56,6	293	44,2	214	28,2	113	40,6	19,6	17,8	Bündel durch Teerabstreifer
2	762	56,3	474	44,9	350	31,1	163	42,3	29,4	26,6	
3	1008	56,7	622	46,1	445	32	203	42,5	35,0	31,8	
4	940	55,3	568	46,7	451	33,6	207	42,5	34,4	31,2	
5	1326	55	809	45,3	562	31,1	247	41,5	40,5	36,7	
6	1320	56,1	778	47,3	626	36,5	273	45,1	41,3	37,5	



Unterlagen zum Versuch F₂

Rückstand durch das Bündel
Wasser um das Bündel.

	Meß- stelle 1 mm Hg	Meß- stelle I °C	Meß- stelle 2 mm Hg	Meß- stelle II °C	Meß- stelle III °C	Meß- stelle IV °C	m ³ /h H ₂ O	kg/h H ₂ O x1000	m ³ /h Rückst.	kg/h Rückst. x1000
1	361	78	143	57,6	18,1	32,8	15,5	15,4	24,5	23,1
2	526	78,8	166	60,8	18,2	36,1	15,5	15,4	33,3	31,3
3	697	75,6	212	58,5	18,2	39,2	15,5	15,4	39,2	36,9
4	908	74,8	263	58	18,2	41,7	15,5	16,4	46,2	43,5
5	743	76	214	56	18,1	32,9	28,8	28,6	41,4	39
6	1002	71,7	275	55	18,2	32,8	28,8	28,6	49,0	46

Anwertung von Versuch P_a

Rückstand durch das Bündel
Wasser um das Bündel.

	Wider- stand an Hg innen	Wärme- durch- gang $\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{Oh}}$	Geschw. des Öls m/s	Geschw. des H 2 O m/s	Wärme- über- gang H 2 O	Wärme- über- gang Öl	Spez. Wärme des Öls kg/Ltr	Mittl. Temp. °C innen	Spez. Gew. innen kg/Ltr	Kinem. Zähigk. $\gamma \times 10^6$ cm/sek.
1	52,5	98	0,7	0,335	1600	104	0,560	66,8	0,932	6,2
2	87	115,5	0,955	0,335	1600	124	0,490	69,8	0,930	5,8
3	117	150	1,12	0,335	1600	164	0,512	67,05	0,932	6,2
4	156	176	1,32	0,335	1600	197	0,495	66,4	0,933	6,25
5	128	187	1,18	0,622	2450	203	0,542	66,0	0,933	6,3
6	171	198	1,40	0,622	2450	206	0,545	63,35	0,935	6,7
					Mittel:		0,524	66,57	0,9325	6,24

Unterlagen zum Versuch Pa I

Rückstand durch das Bündel
Wasser um das Bündel.

	Meß- stelle 1 mm Hg	Meß- stelle I °C	Meß- stelle 2 mm Hg	Meß- stelle II °C	Meß- stelle III °C	Meß- stelle IV °C	cbm/h H 2 O außen	kg/h H 2 O x1000 außen	cbm/h 01 innen	kg/h 01 x1000 innen
1	524	55,1	158	45,1	16,5	23,2	19,8	19,7	26,5	25,2
2	642	55,7	204	46,4	16,4	23,8	19,8	19,7	32,5	30,9
3	798	56	238	45,1	16,4	26,5	19,8	19,7	37,5	35,5
4	904	55	278	44	16,4	27,4	19,8	19,7	42,0	40,0
5	1081	54,3	322	44,2	16,4	27,4	19,8	19,7	45,75	43,5
6	1286	57,9	372	45	16,4	31,8	19,8	19,7	49,2	46,8
7	1406	54,15	403	43,4	16,4	30,6	19,8	19,7	53,0	50,5
1	283	86,1	134	61,5	17,4	40,2	10,5	10,4	18,9	17,7
2	392	86,8	158	63,5	17,0	46,8	10,5	10,4	26,6	25,0
3	560	84,3	208	61,2	17,4	50,3	10,5	10,4	32,5	30,5
4	711	81,9	238	60,9	17,4	53,2	10,5	10,4	37,8	35,4
5	862	80,3	284	60,7	17,4	54,8	10,5	10,4	42,3	39,7
6	973	82,1	317	62	17,4	57,3	10,5	10,4	45,7	42,9
7	1072	84,2	341	64,3	17,4	59,6	10,5	10,4	48,8	45,7
8	1244	82,7	395	64,4	17,4	61,1	10,5	10,4	53,0	49,7

Anwertung von Versuch P₈ I

Rückstand durch das Bündel
Wasser um das Bündel.

	Wider- stand mm Hg innen	Wärme- durch- gang $\frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$	Geschw. des Öls m/s innen	Geschw. d. H ₂ O m/s außen	Wärme- über- gang H ₂ O	Wärme- über- gang Öl	Spez. Wärme $\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{C}}$	Mittl. Temp. °C innen	μ kg/Ltr innen	Kine- mat. Zähig- keit $\frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$ $\times 10^6$
1	88	78	0,76	0,43	1500	84	0,520	50,10	0,946	9,75
2	105	84,5	0,93	0,43	1500	89	0,510	51,15	0,945	9,35
3	135	122,5	1,07	0,43	1500	135	0,515	50,55	0,946	9,50
4	151	140	1,20	0,43	1500	156	0,495	49,50	0,946	9,90
5	183	184	1,31	0,43	1500	211	0,500	49,25	0,9465	9,75
6	220	198,0	1,41	0,43	1500	230	0,505	51,45	0,945	9,75
7	240	199	1,52	0,43	1500	230	0,518	48,75	0,947	9,50
						Mittel	0,509	50,107	0,9459	9,643
1	36,0	125	0,54	0,227	1200	140	0,540	73,80	0,928	5,35
2	56,5	129	0,765	0,227	1200	144	0,530	75,15	0,926	5,20
3	84,5	161	0,93	0,227	1200	186	0,490	72,45	0,928	5,50
4	114	189	1,08	0,227	1200	233	0,505	71,40	0,929	5,60
5	139	236	1,215	0,227	1200	293	0,500	70,50	0,930	5,70
6	182	233	1,31	0,227	1200	273	0,485	72,00	0,928	5,50
7	176,5	233	1,4	0,227	1200	288	0,490	74,00	0,927	5,35
8	294	249	1,52	0,227	1200	312	0,502	73,55	0,928	5,35
						Mittel	0,505	72,85	0,928	5,44

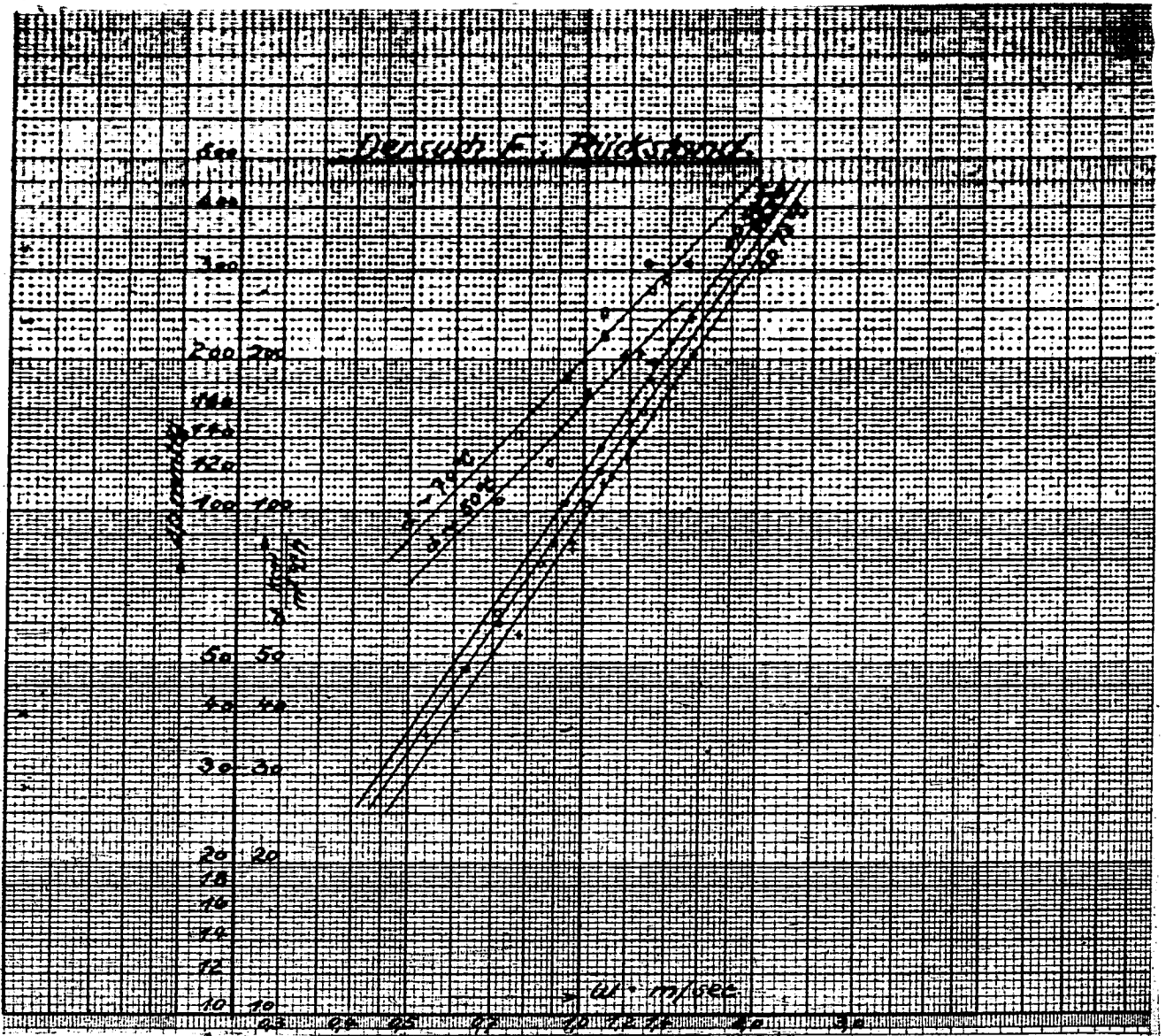
Unterlagen zum Versuch P₀

Rückstand durch das Bündel
Rückstand um das Bündel.

	Meß- stelle 1 mm Hg	Meß- stelle I °C	Meß- stelle 2 mm Hg	Meß- stelle II °C	Meß- stelle 3 mm Hg	Meß- stelle III °C	Meß- stelle 4 mm Hg	Meß- stelle IV °C	cm/h 01	kg/h 01 x1000
1	818	54,3	569	50,6	404	36,6	174	40,2	26,5	25,2
2	905	52,6	642	49,3	402	34,1	190	37,6	26,5	25,2
3	1080	53,3	721	50,3	550	37,1	216	39,9	32,5	31,0
4	1282	54,6	847	51,3	637	37,6	248	41,3	37,6	35,7
5	1705	53,9	1007	50,9	834	39,5	316	42,3	46,0	43,8
1	1655	70,2	996	63,2	755	45,3	276	52,3	45,0	42,6
2	1338	69,0	838	63,1	641	47,0	233	53,0	37,7	35,6
3	1151	61,9	734	60	597	48,8	223	50,6	33,5	31,8
4	994	68,7	664	63,8	506	46,1	185	50,9	29,7	28,1
5	666	71,4	464	65,6	327	44,3	137	50,1	22,0	20,8

Auswertung von Versuch P_b $q_p = 0,51 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$ Rückstand durch das Bündel
Rückstand um das Bündel

	Widerst. mm Hg		Geschw. m/s		Geschw. m/s außen	Wärme- durch- gang K kcal/ m ² °C h	Wärme- über- gang Kcal/ m ² °C h	Mittl. Temp. °C		m kg/Ltr.		Kinemat.Zähigkeit m ² /s x 10 ⁶	
	innen	außen	innen	außen				innen	außen	innen	außen	innen	außen
1	60	55	0,72	0,545	60	122,5	52,45	38,40	0,944	0,956	9,0	12,8	
2	63	51	0,72	0,545	52	106	50,80	35,85	0,946	0,959	9,5	15,5	
3	86,5	80	0,885	0,672	61,5	126	51,60	38,50	0,945	0,956	9,2	12,8	
4	104	93,5	1,02	0,772	84,5	174	53,00	39,45	0,944	0,955	8,8	13,6	
5	168	124	1,25	0,95	100	205	52,40	40,90	0,944	0,954	9,0	13,0	
1	159	115	1,28	0,975	152	312	66,70	48,80	0,932	0,947	6,2	10,0	
2	120	98,2	1,08	0,82	121	248	66,05	50	0,937	0,946	6,3	9,7	
3	100	90	0,96	0,73	./.	./.	61,00	49,70	0,937	0,946	7,1	9,9	
4	79,5	77,2	0,85	0,649	70,5	145	66,25	48,50	0,933	0,947	6,3	10,2	
5	48,5	45,7	0,63	0,48	51,5	106	68,50	47,20	0,931	0,949	5,9	10,6	
						Mittel:	58,875	43,730	0,9393	0,9515	7,73	11,81	



Gefundene spezifische Wärmen:

Medium	Temp. °C	Spez. Gew. kg/l	H ₂ O Gehalt Vol.-%	cp kcal. kg °C	cp kcal/m ³ ohne H ₂ O	cp kcal/m ³ nach Doepke Oppau	amerikan. Werten
Methanol	35	0,795	0	0,595	0,595	0,58	-
Schwerbenzin	40	0,827	1,6	0,429	0,420	0,453	0,470
Mittelöl	50	0,888	0	0,451	0,451	0,450	0,460
Teerabstr.	50	0,904	13	0,513	0,441	0,452	0,454
Teerrückst.	60	0,935	9	0,510	0,461	0,455	0,450

Zur allgemeinen Orientierung seien hier noch einige Gesetzmäßigkeiten für die spezifische Wärme von Erdölen angeführt:

- a) Labor-Bericht Oppau: N 926 v. Dr. Doepke.

Es gilt allgemein die Bezeichnung

$$x \cdot cp = \text{konstant,}$$

außerdem

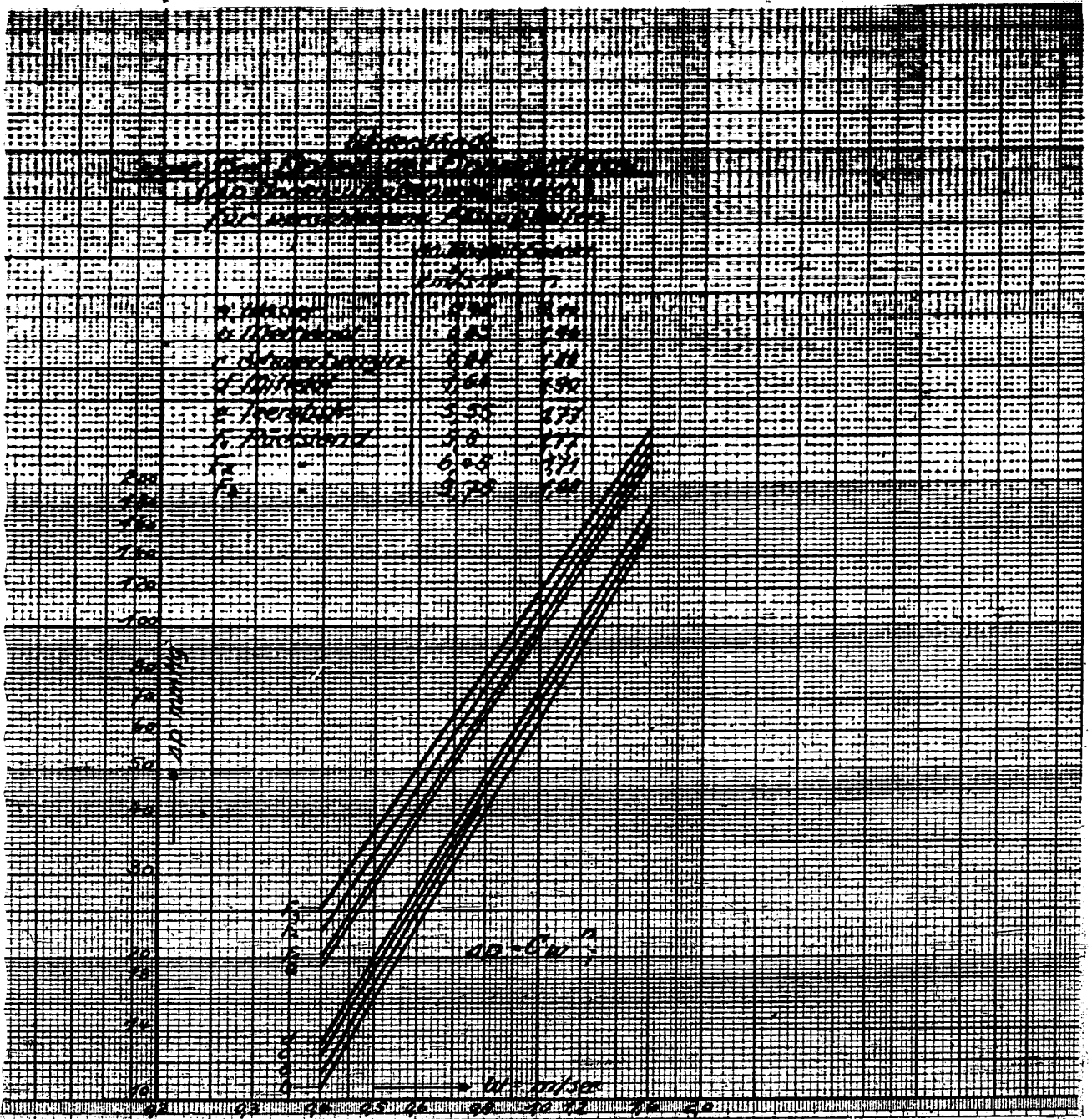
$$\frac{\text{Heizwert}}{cp} = \text{konst. (f. homologe Reihen).}$$

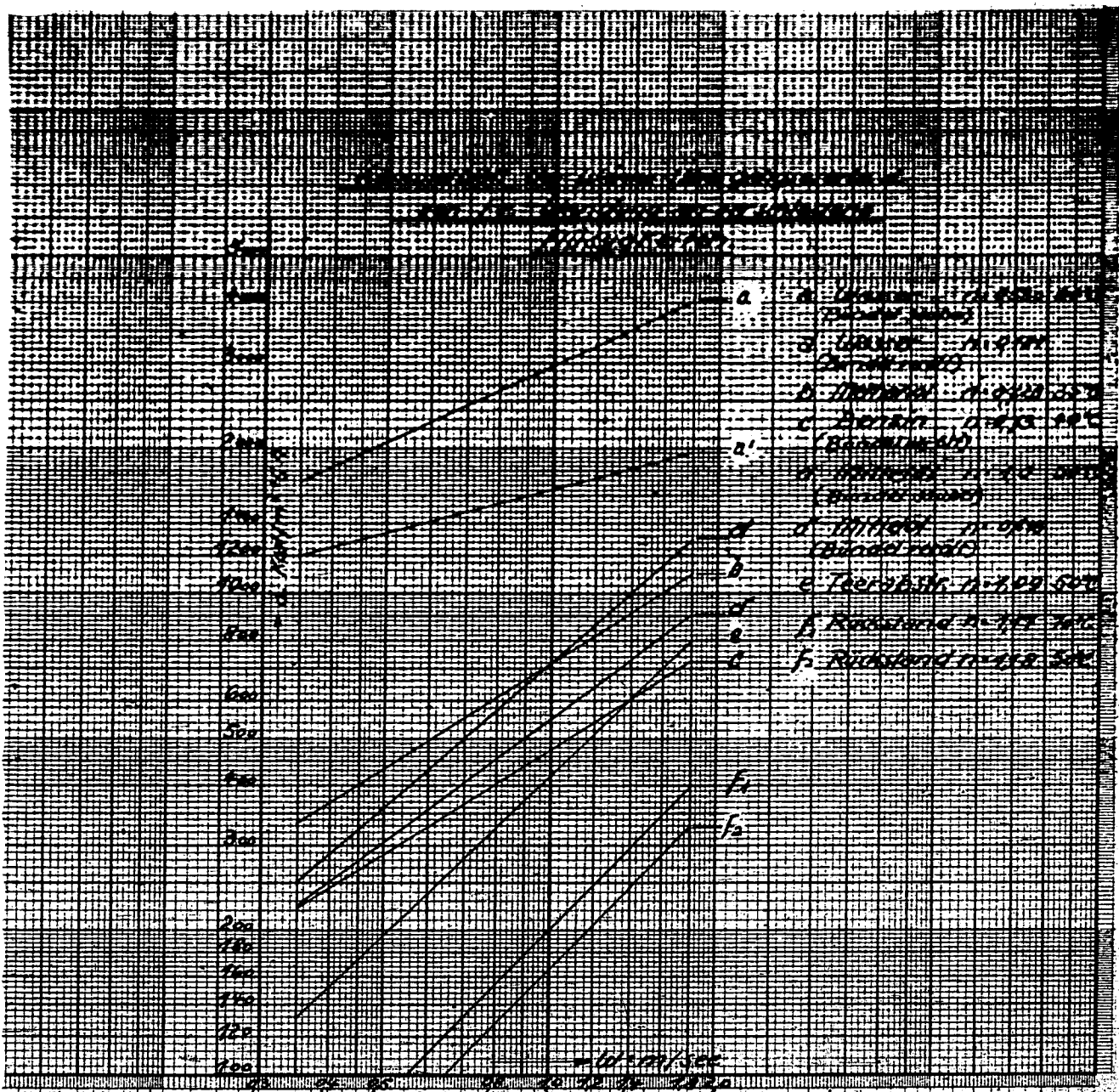
- b) Mitteilungen des "Bureau of Standards, Heft 27:

für Erdöle gilt es

$$cp = \frac{31,6}{\rho} (0,403 + 0,00081 \cdot t^{\circ}\text{C})$$

in kg/cbm bei 15° C einzusetzen.





Teil III.

Kritische Betrachtung der gefundenen Widerstände - und
Wärmeübergangswerte zur Entwicklung allgemeiner gültiger Gleichungen.

Widerstände

In dem vorhergehenden Teil dieser Arbeit hat es sich neben der Bestimmung der Wärmeübergangszahlen, in der Hauptsache darum gehandelt, den Widerstand des Apparates für die verschiedenen Medien zu finden, um Beziehungen zwischen Wärmeübergang und aufgewandtem Energieverbrauch zur Überwindung des Druckverlustes zu erhalten.

In folgendem Abschnitt soll untersucht werden, ob sich eine Gesetzmäßigkeit der gefundenen Widerstände, wie sie das von Reynolds aufgestellte Ähnlichkeitsgesetz verlangt, bestätigt. Es wird dies zugleich eine Kontrolle über die Brauchbarkeit und Genauigkeit der Messungen geben.

Die von Reynolds gefundene Erkenntnis besagt, daß zwei Strömungen nur dann einander ähnlich sind, wenn der für die gebildete dimensionslose Ausdruck $\frac{w d}{\nu}$ denselben Zahlenwert besitzt (ν bedeutet die kinematische Zähigkeit). Stellt man nun den in einer Rohrleitung auftretenden Druckabfall Δp durch die bekannte Gleichung

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \frac{w^2}{2g} ;$$

dar, so besagt dieselbe, daß der Druckabfall Δp proportional dem Staudruck $\frac{w^2}{2g}$, der Rohrlänge l und umgekehrt proportional

dem Rohrdurchmesser d ist und das der Widerstand außerdem von einem Koeffizienten λ abhängt, der sich als Funktion der Reynolds'schen Zahl und einem Rauigkeitsfaktor der begrenzenden Oberfläche darstellen läßt.

Die Größe des Widerstandskoeffizienten λ muß durch experimentelle Untersuchungen jeweils gefunden werden.

Es wurden deshalb zu den bei den einzelnen Medien gefundenen Versuchswerten jeweils die dazugehörigen Widerstandszahlen nach der Gleichung

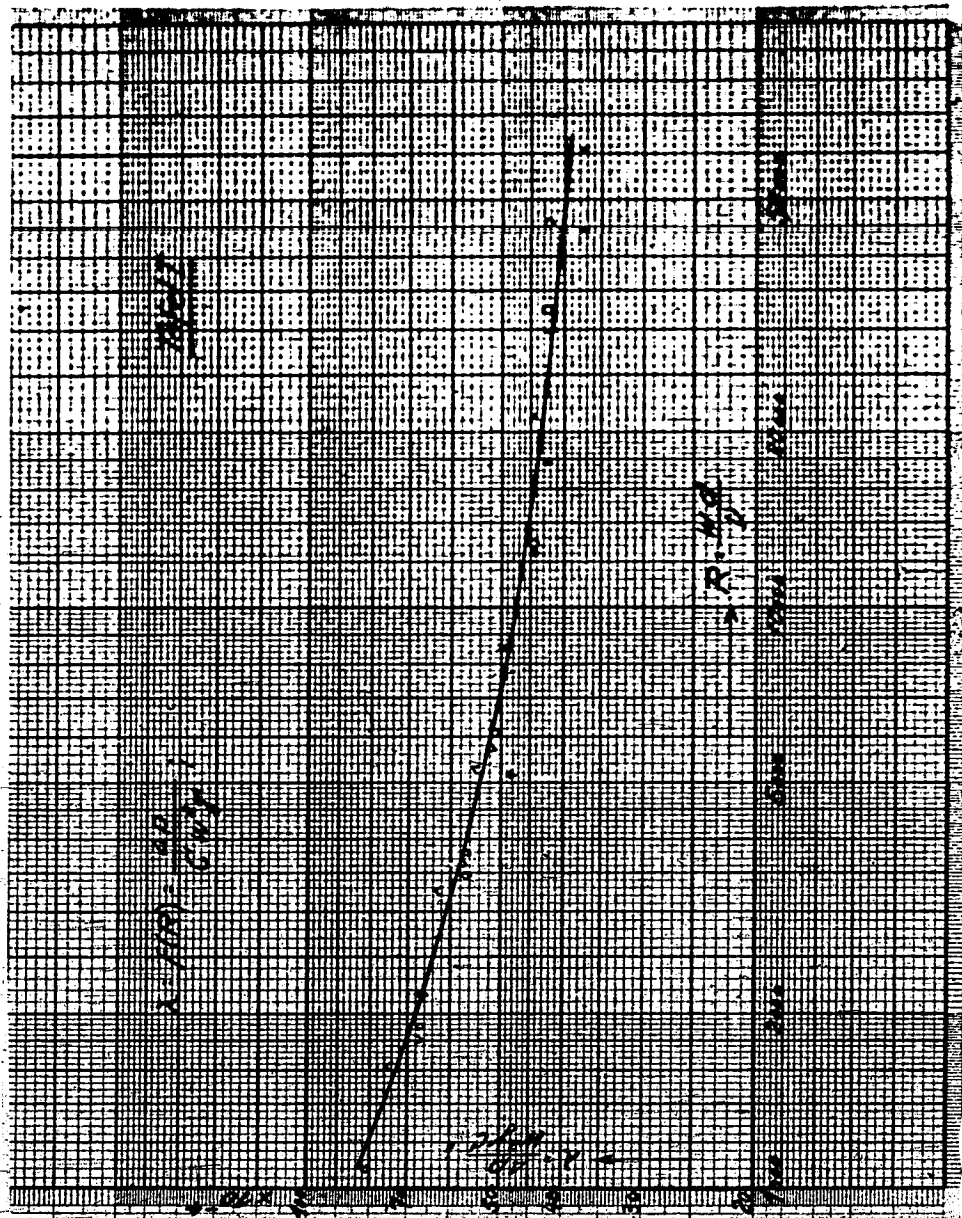
$$\lambda = \frac{\Delta p}{w^2 \cdot l \cdot d}$$

und die betreffende Reynolds'sche Zahl $R = \frac{w \cdot d}{\nu}$ ermittelt. Bei allen Berechnungen wurden hierbei die geometrischen Verhältnisse eines Bündelröhrchens des Kühlers eingesetzt.

In Tabelle 1 sind die errechneten Werte zusammengestellt und auf Tafel I in log. Koordinatensystem eingetragen.

Tabelle 1.

Medium	w m/s	Δp mm Hg	ρ kg/m ³	$\gamma \times 10^6$ cm/s	$\frac{\Delta p}{\rho \times 10^4}$	$\frac{w}{\gamma \times 10^{-3}}$	$\frac{\rho}{\rho \times 10^4}$
Wasser	0,4	11,2	984	0,48	37,8	17,50	37,8
	1,0	69			37,3	43,75	37,3
	1,4	136			37,4	61,20	37,4
Methanol	0,4	10,6	800	0,65	44,1	12,95	43,1
	1,0	64			42,4	32,40	42,4
	1,4	124			42,2	45,40	42,6
Benzin	0,4	12,4	825	0,98	49,9	8,6	45,1
	1,0	69			44,5	21,4	44,5
	1,4	130			42,75	30,0	44,4
Mittelöl	0,4	13,0	891	1,64	48,5	5,13	44,7
	1,0	74			44,3	12,8	44,3
	1,4	140			42,6	17,95	44,2
Teerabstr.	0,5	28,5	903	5,55	67	1,895	56,9
	1,0	97,0			57	3,780	57,0
	1,6	225			51,8	6,050	57,5
Rückst. 70°	0,5	29	930	5,8	66,3	1,810	56,2
	1,0	100			57,1	3,620	57,1
	1,6	232			51,6	5,790	57,5
Rückst. 65°	0,5	23	934	6,45	75	1,630	61,5
	1,0	109			62,2	3,260	62,2
	1,6	245			54,6	5,210	62,4
Rückst. 50°	0,5	36,5	946	9,75	82,4	1,075	66,4
	1,0	118			66,4	2,150	66,4
	1,6	261			57,5	3,450	66,8



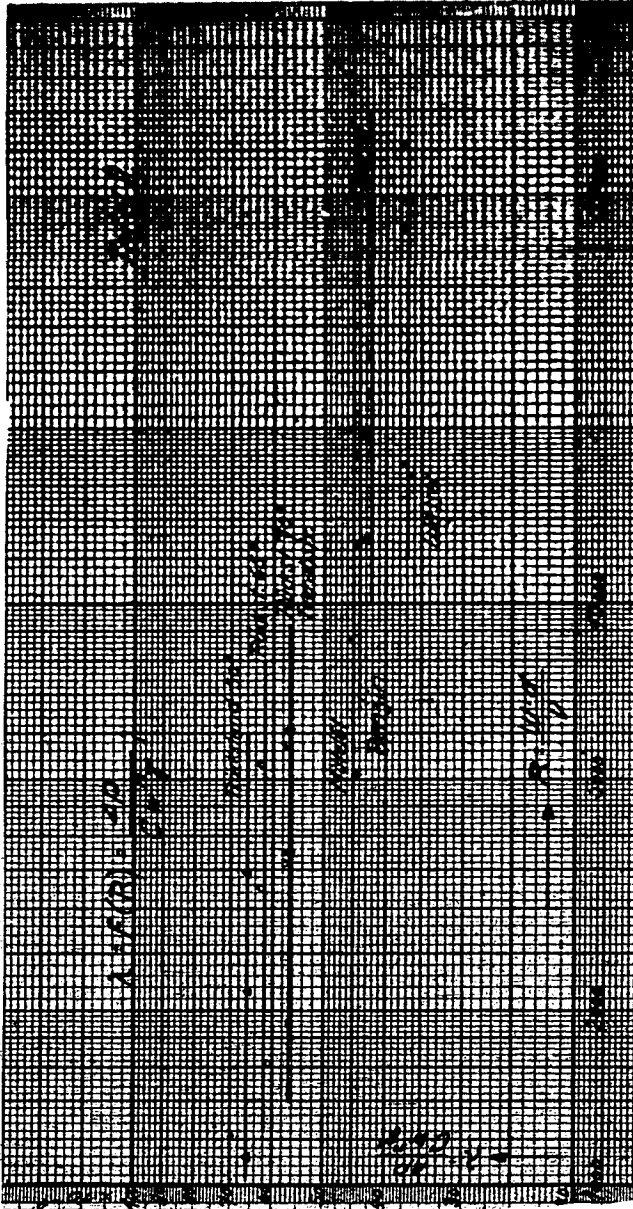
Vergleicht man die in Abhängigkeit von R gefundenen λ Werte mit denen verschiedener Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet (s. Mitte, Jahrg. 25, S. 350 u. f.), so zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung. Daß die Werte dieser Arbeit etwas höher liegen, mag durch den Einfluß der Verbindungskrümmung und Rohrböden herrühren, die ja in der Reynoldsschen Zahl unberücksichtigt bleiben mußten.

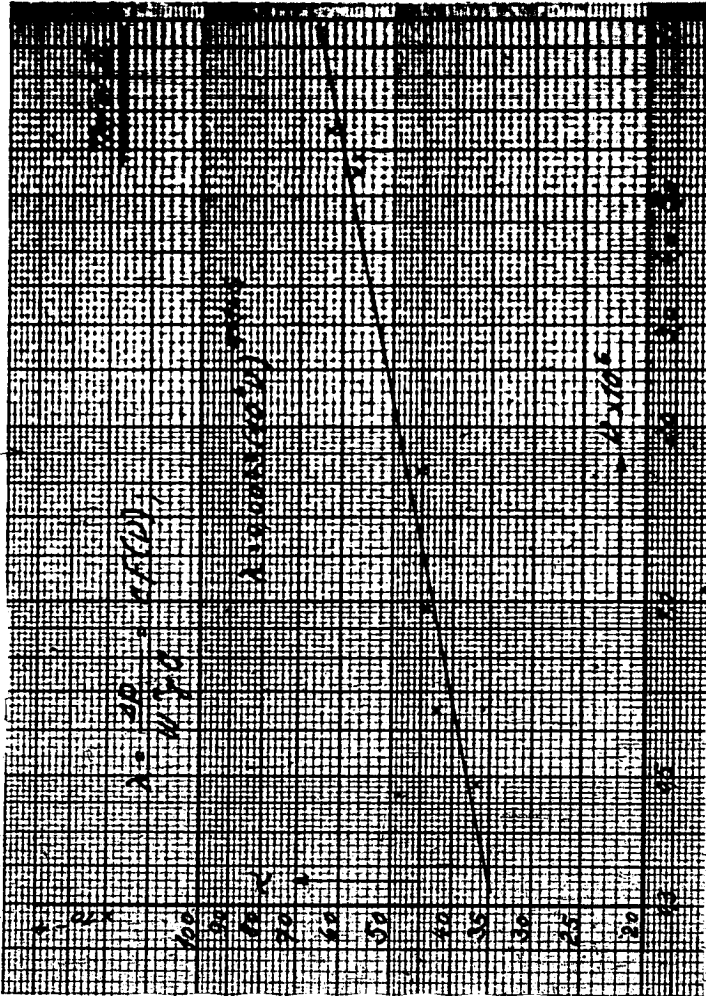
Wie aus dem Verlauf des Liniensuges auf Tafel I zu ersehen ist, läßt sich die Widerstandszahl λ nicht oder nur grob angenähert durch eine einfache Exponentialfunktion der Reynoldsschen Zahl ausdrücken. Um auf eine genaue, unabhängige Gleichung zur Berechnung des Druckverlustes zu kommen, sei die Gleichung

$$\Delta p = \lambda \frac{1}{d} w^2 \frac{l}{2g}$$

von der ausgegangen wurde, weiter zergliedert.

Die Versuche haben gezeigt, daß der Exponent der Geschwindigkeit für jedes Produkt ein anderer war.







Auf Tafel II wurden deshalb in Abhängigkeit der Reynoldsschen Zahl die λ - Werte getrennt nach verschiedenen Produkten aufgetragen und zwar unter Einsetzung der bei den Versuchen gefundenen Exponenten der Geschwindigkeit.

Man sieht an Hand der Tafel ohne weiteres, daß in diesem Fall keine Abhängigkeit der Widerstandszahl von der Reynoldsschen Zahl festgestellt werden kann, daß aber deutlich die kinematische Zähigkeit ihren Einfluß auf die Rohrreibungszahl auswirkt.

Trägt man, wie es auf Tafel III geschehen ist, die auf Tafel II für die einzelnen Produkte gefundenen Widerstandszahlen in Abhängigkeit ihrer kinematischen Zähigkeiten auf, so ergibt sich eine einfache exponentiale Abhängigkeit.

Endlich erkennt man an Hand der Tafel IV die Gesetzmäßigkeit der gefundenen Exponenten der Geschwindigkeit. Es wurde in Abhängigkeit der kinematischen Zähigkeit der jeweils gefundene Exponent aufgetragen.

Da nun auch diese Größe sich als eine Exponentialfunktion darstellt, sind hiermit alle Variablen der Widerstandsgleichung eindeutig erfaßt.

Die gefundene Gleichung schreibt sich damit in allgemeiner Form:

$$p = C_1 \left(\frac{m}{g} \right)^{0,1865} \cdot \frac{1}{d} \cdot w^{1,925} \quad \text{of} \quad (\dots)$$

oder mit den gefundenen Konstanten und Exponenten

$$p \text{ (mm Hg)} = 0,0043 (10^6 \dots)^{0,1865} \cdot \frac{1}{d} \cdot w^{1,925} (10^6 \dots)^{-0,0554}$$

dabei sind die Dimensionen aller rechtsstehenden Faktoren, m , kg sec. eingesetzt.

Vergleicht man die in dieser Arbeit gefundenen Geschwindigkeitsexponenten mit der von Blasius gefundenen Tatsache, daß im Gebiet höherer Reynoldsscher Zahlen bei glatten Rohren der Widerstand nicht im Quadrat, sondern mit der 1,75 Potenz der Geschwindigkeit wächst, daß aber die Abhängigkeit bei Rohren mit rauher Wand annähernd quadratisch ist, so ist der Schluß berechtigt, daß der Rauheitsgrad der Rohre nicht konstant zu bleiben scheint, sondern vom Medium beeinflusst wird. Man kann sich vorstellen, daß die Unebenheiten der Rohroberfläche durch einen ruhenden Flüssigkeitsfilm, der sich je nach der Zähigkeit des betreffenden Mediums mehr oder minder stark ausbildet, in verschiedenem Maße geglättet werden; d.h. man nähert sich beim Durchsetzen von zähem Produkt den Widerstandsverhältnissen wie sie bei glattem Rohr herrschen.

Die entgültige Klärung dieser Frage bedarf jedoch noch weiterer Untersuchungen und muß einer anderen Arbeit vorbehalten bleiben. Die Versuchunterlagen sind in dieser Hinsicht zu wenig vollständig, da die Arbeit aus betrieblichen Gründen vorzeitig abgebrochen werden mußte.

Wärmeübergangszahl:

Bei der großen Rolle, die die Wärmeübergangsfragen in der Technik spielen, ist es erklärlich, daß schon viele Untersuchungen auf diesem Gebiet ausgeführt worden sind. So liegen besonders für den Wärmeübergang von Gasen und Dämpfen ausführliche Versuche vor. Es seien hier nur die Arbeiten von Grüber, Josse, Poensgen und Musselt genannt. Nicht so zahlreich sind die Versuche mit Flüssigkeiten. Hier mögen die Arbeiten von Stanton, Soennecken und Stender und als Neueste die von Burbach Erwähnung finden. Während die Arbeiten mit Gasen und Dämpfen bei den verschiedenen Forschern gut übereinstimmen, ist dies bei den Versuchen mit Flüssigkeiten nur relativ der Fall. Es fehlen insbesondere eindeutige Versuche, die mit zäheren Medien, z.B. mit verschiedenen Ölarten durchgeführt worden sind.

In folgendem soll nun versucht werden, die Abhängigkeit und die physikalischen Zusammenhänge der in dieser Arbeit gefundenen Wärmeübergangszahlen für zähere Medien in einer allgemein gültigen Gleichung zu erfassen. Da, wie schon der Aufbau der in einschlägigen Forschungsarbeiten angeführten Gleichungen zeigt, zwischen Wärmeübergang und Widerstand eine enge Beziehung herrscht, sollen die hier gefundenen - Werte auf ganz analoge Weise wie die in vorhergehendem Kapitel behandelten Widerstandswerte geprüft werden.

Man muß sich jedoch darüber in klarem sein, daß die Zusammenhänge des Wärmeübergangs wesentlich komplizierter sind

als die des Widerstandes. Während zum Vergleich von Widerständen nur nötig ist das Strömungsbild, ausgedrückt durch die Reynolds'sche Zahl, zu kennen, muß, um die Beziehungen von Wärmeübergangszahlen zueinander zu erfassen, zum Strömungsbild auch das Temperaturfeld der Strömung bekannt sein. Analog der Reynolds'schen Zahl hat hier die Ähnlichkeitstheorie ebenfalls einen dimensionslosen Ausdruck $\frac{w \cdot d}{\alpha}$, die Péclet'sche Zahl entwickelt ($\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$ und bedeutet die Temp.-Leitfähigkeit). Die Theorie sagt aus, daß die Temperaturfelder zweier Strömungen nur dann ähnlich sind, wenn diese Zahl für beide Zustände die gleiche Größe hat, d. h. der Wärmeübergang ist sowohl eine Funktion der Reynoldsschen als auch der Péclet'schen Zahl. Es müßten demnach, um auf diesem Weg zur Entwicklung einer allgemein gültigen Gleichung zu gelangen, Temperaturfeld und Strömungsverlauf in einem bestimmten Verhältnis zu einander stehen. Da dies jedoch nur bedingt vorausgesetzt werden darf, kommt man auf diese Weise für gewöhnlich zu keiner befriedigenden Lösung. Immerhin zeigt die Ähnlichkeitstheorie von welchen Variablen die Übergangszahl abhängig ist und dient als Wegweiser zur Aufstellung einer praktischen Beziehung die auch dem Betriebsmann nicht zu große Schwierigkeiten zur Auswertung bietet.

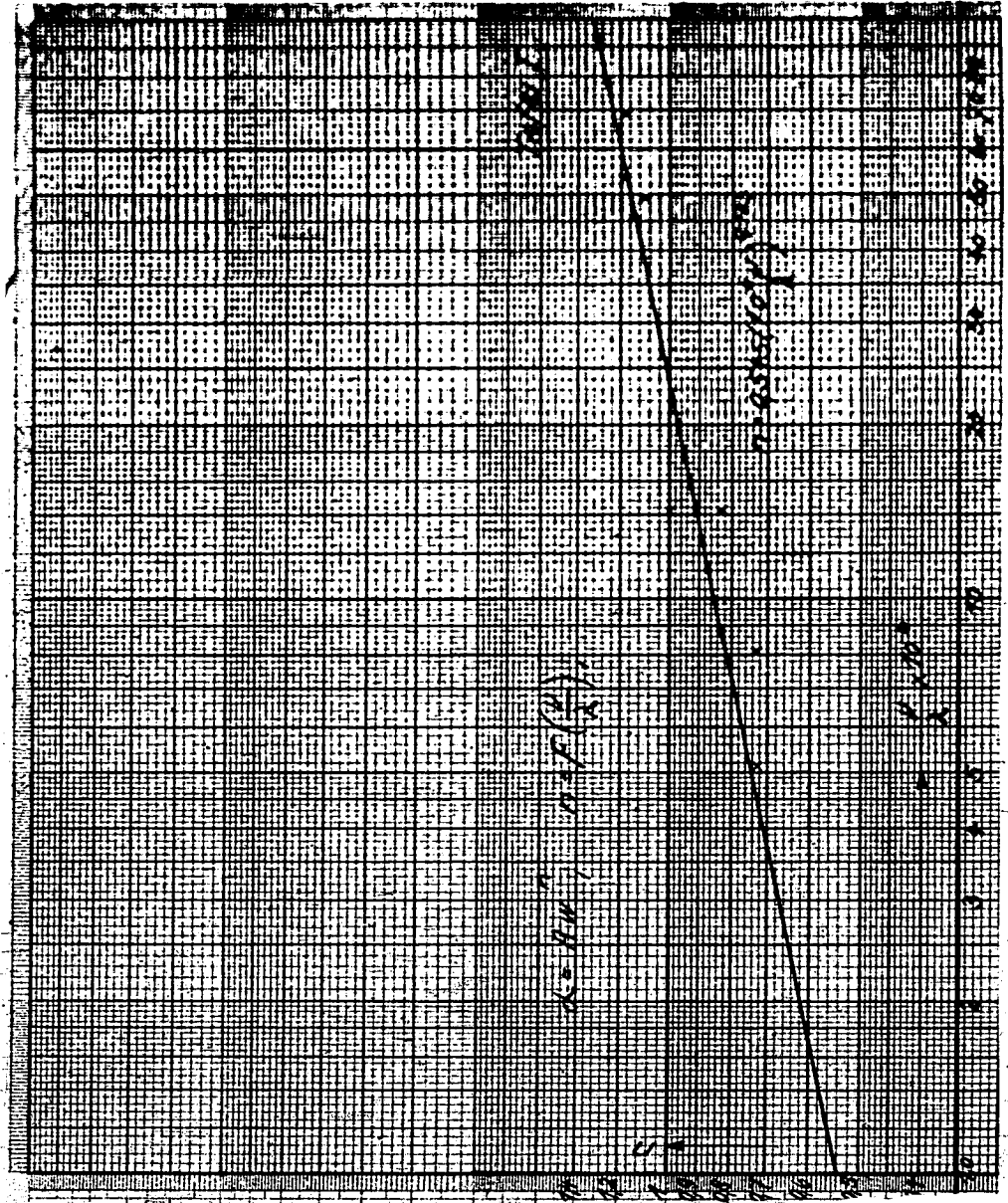
Die Wärmeübergangszahl ist demnach allgemein gesprochen von zwei Gruppen von Faktoren abhängig, von den physikalischen Eigenschaften des Mediums λ, ρ, c und von den geometrischen Ausmaßen der umschließenden Apparatur ausgedrückt durch w, d, l .

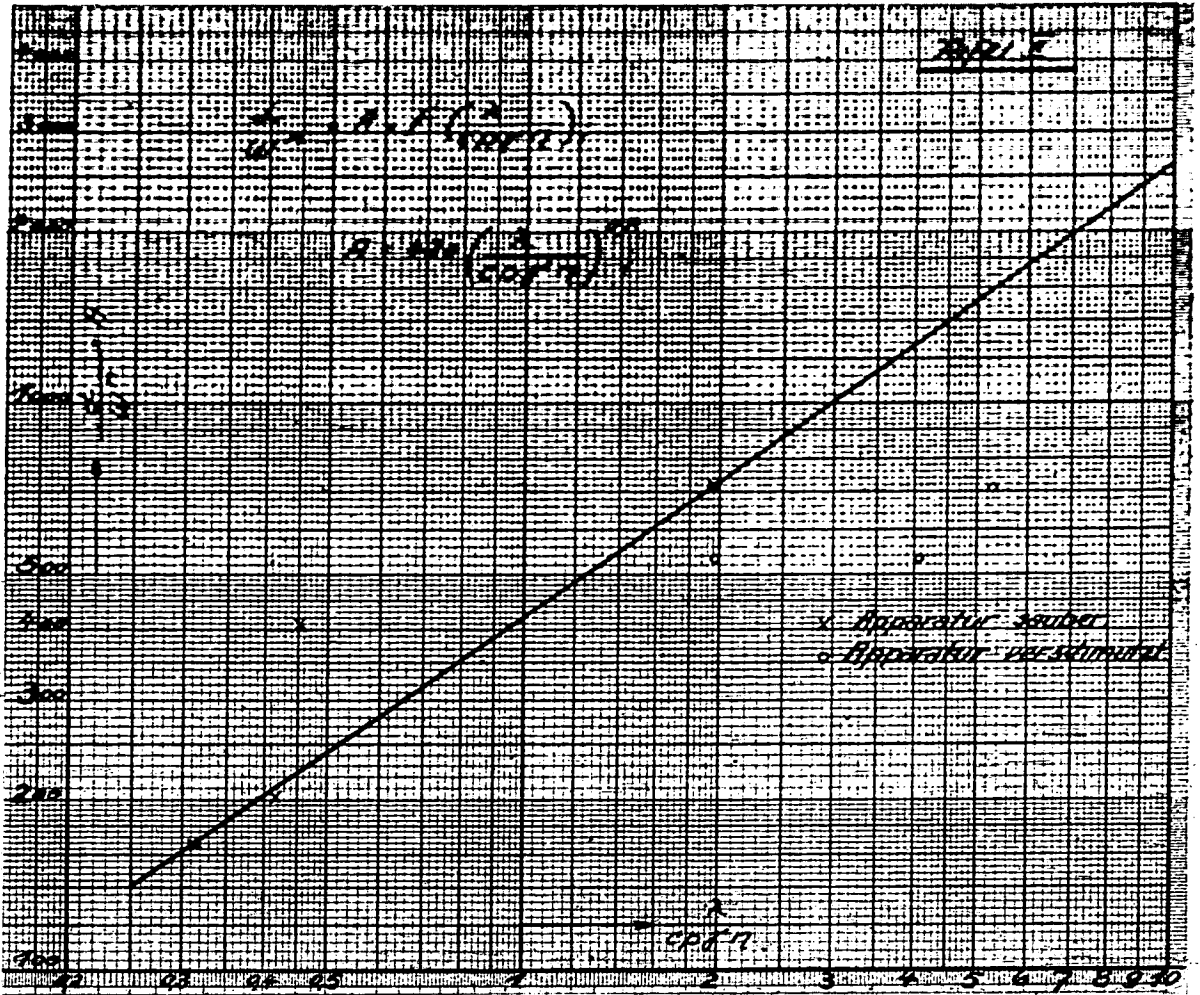
zur Entwicklung der allgemeinen Gleichung gehen wir nun von der einfachen Exponentialfunktion aus

dabei bedeuten also A und n Variable und Funktionen der physikalischen Eigenschaften der Medien und der Apparatur. Auf Sammeltafel Teil II, auf welcher für die untersuchten Flüssigkeiten abhängig von der Geschwindigkeit die gefundenen n -Werte in logarithmisches System eingetragen sind, ergeben sich die jeweiligen Werte für n und A getrennt nach Produkten. Betrachten wir den Geschwindigkeits-Exponenten n , so ergibt sich aus folgender Tabelle 1 Tafel I eine einfache exponentiale Abhängigkeit des Exponenten von der Wärmeleitfähigkeit und kinematische Zähigkeit des Mediums.

Tabelle I.

Medium	M/s	sau- ber	ver- schmutzt	kcal msh ⁰⁰	kcal kg ⁰⁰	$\times 10^3$ qm/s	kg m ³	10 ³		sau- ber (ver- schmutzt)	op
Wasser	1	2980	1640	0,562	1,0	0,48	984	48	0,85	0,53	11,9
Metha- nol	1	-	720	0,126	0,595	0,65	800	49	5,18	0,728	5,4
Benzin	1	-	475	0,122	0,429	0,98	825	83	6,02	0,73	4,16
Mittel- öl	1	720	540	0,1145	0,451	1,64	891	145	14,3	1,0 (0,848)	1,965
Abstr.	1	415	415	0,113	0,513	5,55	903	555	49,1	1,09	0,45
Rückst. 70° C	1	200		0,110	0,524	5,8	930	540	52,8	1,17	0,417
Rückst. 60° C	1	166		0,108	0,524	7,4	946	700	68,5	1,18	0,312





Durch die in logarithmisches Coordinatensystem eingezeichneten Punkte läßt sich mühelos eine Gerade legen. Die Gleichung, von der ausgegangen wurde, läßt sich schon entwickelter schreiben.

$$- A_w \cdot 10^c \quad (-) \quad \text{wobei } A \text{ noch eine zu findende Funktion von } \dots \text{ ist.}$$

Mit eingesetzten Größen:

$$- A_w \cdot 0,545 \cdot (10^6 \dots) \cdot 0,183.$$

Findet man nun noch eine Abhängigkeit von A, so ist damit eine gemeinsame Gleichung für verschiedene Flüssigkeiten zur Errechnung der ... Werte gefunden.

Auf Tafel II sind die für jedes Medium experimentell gefundenen A-Werte in Abhängigkeit von ($\frac{\dots}{cp}$) aufgetragen. Betrachtet man die Punkte, die bei sauberer Apparatur gefunden wurden, so liegen sie mit Ausnahme eines Ausreißers, der wahrscheinlich auf ungenauer Bestimmung der Zähigkeit zurückzuführen ist, alle auf einer Geraden.

Auf die ...-Werte bei verschmutzter Apparatur soll nicht eingegangen werden, da sich der jeweilige Verschmutzungsgrad nicht feststellen ließ.

Die in dieser Arbeit gefundene Gleichung zur Berechnung der ...-Werte lautet demnach für Rohrdurchmesser $\phi = 0,021 \text{ m}$ und Rohrlänge $l = \dots 8 \text{ m}$,

$$= 420 \cdot \left(\frac{\dots}{cp} \right)^{0,8} \cdot 0,545 \cdot (10^c \dots) \cdot 0,183$$

In dieser Gleichung ist der Einfluss der geometrischen Gestalt der das Medium umschließenden Wandung noch nicht enthalten. Um zu einer allgemein gültigen Gleichung zu gelangen, soll in folgendem die gefundene Beziehung nach der von Musclet theoretisch aufgestellten Gleichung ergänzt werden. Musclet findet, daß die Wärmeübergangszahl in der $(\frac{1}{d} \cdot n)$ Funktion vom Durchmesser abhängt, wobei der Exponent n der gleiche wie der der Geschwindigkeit ist.

Überträgt man diese Grundlagen auf die in dieser Arbeit gefundene Gleichung unter Einsetzung eines mittleren Geschwindigkeitsexponenten von 0,8, so erhält man

$$= 194 \left(\frac{1}{d} \right)^{0,8} \frac{w}{0,2} \cdot 0,545 (10^6)^{0,35} \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C h}}$$

dabei sind alle Größen in m, kg, h einzusetzen mit Ausnahme der Geschwindigkeit in m/sec.

Da diese Gleichung für den praktischen Gebrauch etwas kompliziert erscheint, wird in folgendem versucht, eine Gleichung zur Errechnung der Wärmeübergangswerte von Öl an Eisenwandung zu finden, die bei einfacher und handlicher Form noch genügende Genauigkeit besitzt.

Nach Veröffentlichungen von dem Bureau of Standards N 97 New York 1929 kann mit einer Genauigkeit von ca. 5% für Erdöle gesetzt werden: (Die Formeln gelten für einen Temperaturbereich von 0 bis ca. 400° C).

$$\text{Wärmeleitfähigkeit} \frac{\text{kcal}}{\text{m}^{\circ}\text{C h}} = \frac{10^3}{1 - 0,00054 t^{\circ}\text{C}}$$

Spez. Wärme: $c_p = \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} = \underline{11,6}$ (0,403 · 0,00081 t°C)

das spez.-Gewicht ist in kg/m^3 und bei 15°C einzusetzen.

Begnügt man sich zur Errechnung der Wärmeübergangszahlen von Öl an Rohre mit einem Genauigkeitsgrad von 10 %, so können diese beiden Gleichungen noch wesentlich vereinfacht werden. Für den Temperaturbereich von 0 bis 200°C und einen Genauigkeitsgrad von 10 % gelten die einfachen Beziehungen

$$\alpha = \frac{96}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h}} \cdot \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h}}$$

$$c_p = \frac{15,25}{0,5} = \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

Setzt man diese Größen in die in dieser Arbeit für den Wärmeübergang gefundenen Gleichung ein, so erhalten wir eine einfache Formel, die sich bei genügender Genauigkeit gut für den Betrieb eignet.

Es gilt also für Erdöle zwischen 0 und 200°C bei einem Genauigkeitsgrad von 10 % die Beziehung:

$$\alpha = \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h}} = 0,240 \cdot \left(\frac{1}{\rho}\right)^{1,2} \cdot \left(\frac{1}{v}\right)^{0,8} \cdot \frac{0,36(10^6)}{d^{0,2}} \cdot 0,183$$

darin ist :

Spez. Gewicht $\text{kg}/\text{ltr.}$

Zähigkeit $\frac{\text{kg}}{\text{cm} \cdot \text{sec.}}$

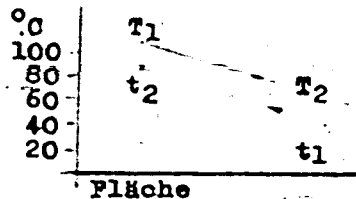
Geschwindigkeit m/s ,

Rohrdurchmesser m .

Zum Beispiel:

Mit Hilfe von Einheitskühlern sollen 55 bzw. Mittelöl an 79 bzw. Abstreiferöl stündlich aufgewärmt werden.

Das Temperaturbild des Wärmeaustauschers soll sich wie folgt darstellen:



Eingang 100 — 50°C Ausgang
 Ausgang 85 — 20°C Eingang
 Mittl.Temp.Differenz $\Delta t = 21,5^\circ \text{C}$.

Es ist zu bestimmen:

- a) für reine Serien-Schaltung der Einheiten
- b) für Parallelschaltung von je 2 Einheiten
 - 1.) wieviel Regenerationsfläche und Einheiten des Kühlers sind erforderlich?
 - 2.) welcher Widerstand ist auf beiden Wegen zu überwinden? (Abstreiferprodukt geht um das Bündel, das Mittelöl durch das Bündel).

Zur Lösung dieser Fragen müssen zunächst die physikalischen Größen der Öle und die jeweilige Geschwindigkeit ermittelt werden. Zur Bestimmung dienen die Tafeln III und IV, Teil I.

	Mittl. Temp. °C	Spez. Gew. kg/m ³	Abs. Zähigkeit x 10 ⁶	Kinet. Zähigkeit x 10 ⁶	Spez. Wärme	Geschwindigkeit m/s	Geschwind. m/s bei Parallel-Schaltung.
Mittelöl	52,5	886	136	1,5	0,476	1,58	0,79
Abstreiferöl	75	892	425	4,66	0,49	1,52	0,76

Die abzuführende Wärmemenge beträgt nach der Gleichung

$$\frac{\text{kcal}}{\text{h}} = v \frac{\text{m}^3}{\text{h}} (\rho) \cdot c_p \cdot (t_2 - t_1)$$

$$\frac{\text{kcal}}{\text{h}} = 55 \cdot 0,476 \cdot 65 = 1.510.000 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

Mit Hilfe der gefundenen Gleichungen bzw. durch Linienzug auf den am Schlusse dieser Arbeit aufgestellten Diagrammtafeln A und B ergeben sich die Wärmeübergangszahlen und Widerstände

a) für Serienschaltung.

	Wärme- übergang	Widerstand pro Einheit m ² /m Hg	Wärmedurchgangszahl K
Mittelöl	1120	180	350
Abstreiferöl	510	200	

Die benötigte Heizfläche errechnet sich nach Gleichung

$$F_{\text{qm}} = \frac{Q}{\alpha \cdot \Delta t} \quad \Delta t = \text{mittl. Temperaturdifferenz.}$$

$$F_{qm} = \frac{1510000}{21,5 \cdot 350} = 200 \text{ qm.}$$

Es sind zu dieser geforderten Wärmeleistung nötig:

15 Einheiten (à 15 qm) des Kühlers,

der Gesamtwiderstand beträgt :

Innen: 3,2 at

Außen: 3,55 at,

b) für Parallelschaltung.

	Wärmeübergang	Widerstand pro Einheit mm Hg	Wärmedurchgangszahl K
Mittelöl	590	45	170
Abstreiferöl	240	52	

$$F_{qm} = \frac{1500000}{21,5 \cdot 170} = 410 \text{ qm.}$$

Es sind zu dieser geforderten Wärmeleistung nötig :

2 x 14 Einheiten (à 15 qm) des Kühlers,

der Gesamtwiderstand beträgt :

Innen: 0,86 at

Außen: 0,99 at.

Zusammenfassung.Einleitung

Bei den Bündelkühlern und Regeneratoren, wie sie z. Zt. sehr häufig zur Abkühlung und Aufwärmung von Ölen im Gebrauch sind, herrschen infolge ihrer kurzen Bauart und großen Durchmesser-Querschnitte sehr geringe Geschwindigkeiten. Die Wärmeübergangszahlen sind deshalb sehr klein und die Heizfläche damit schlecht ausgenutzt.

Teil I

Es wurde deshalb ein neuer Wärmeaustauscher entworfen. Auf dessen konstruktive Einzelheiten dieser Abschnitt eingeht. Es werden die bauweisen sowie die wärmetechnischen Vorteile angeführt. Außerdem wird die Versuchsanordnung, die zur Untersuchung der Neukonstruktion auf Widerstand und Wärmeübergang hier aufgestellt wurde, beschrieben.

Teil II.

Die Versuchsergebnisse werden nach Medien geordnet tabellarisch und kurvenmäßig gebracht und in zwei Sammelblättern zusammengestellt.

Im noch geringeren Maße wie das Kapitel über die Zusammenhänge der gefundenen Widerstände kann der Abschnitt, der die Verhältnisse der Wärmeübergangszahlen von zähen Medien an Wandung zu erfassen such, als abgeschlossen gelten.

Wenn auch die Versuchsergebnisse trotz der verhältnismäßig großen Meßgeräte eine überraschend gute Übereinstimmung

ergaben und deshalb als genügend genau erachtet werden können, so fehlt dieser Arbeit vor allem, daß die Versuche nicht auf verschiedene Rohrdimensionen und Rohr-Materialien ausgedehnt wurden. Dieser Mangel erklärt sich daraus, daß die Versuche lediglich zur betrieblichen Orientierung an der Neukonstruktion gedacht sind, um bei Verwendung dieses Apparates Berechnungsgrundlagen zu besitzen. Bei Beurteilung der gefundenen Werte darf deshalb dieser Umstand, der eine gewisse Toleranz im Hinblick auf die Genauigkeit der Arbeit in sich schließt, nicht außer Acht gelassen werden. Die Aufstellung einer allgemeinen Beziehung konnte deshalb nur unter Heranziehung ähnlicher Arbeiten und Versuche erreicht werden und ist durch Versuch nicht belegt.

Während also die Werte und Gleichungen speziell für den Einheitskühler als genügend genau angesehen werden können, ist dies bei den verallgemeinerten Gleichungen nur bedingt der Fall und es ist Aufgabe einer weiteren Arbeit, diese allgemeinen Beziehungen praktisch zu bestätigen. Besonders fördernd dürfte die Heranziehung und Weiterentwicklung der Grenzschicht-Theorie wirken, da bereits in dieser Arbeit viele Beobachtungen auf den großen Einfluß eines sich mehr oder minder stark bildenden Flüssigkeitsfilms auf die Wärmeübergangszahl bei zähen Medien hinweisen. Immerhin werden auch die allgemein gehaltenen Gleichungen für die Praxis gute Dienste tun und in den meisten Fällen genügend genau sein.

Teil III :

Unter Heranziehung ähnlicher Arbeiten wurde versucht, die physikalischen Zusammenhänge der gemessenen Werte zu finden. Es

wurden die Ergebnisse der Arbeit in zwei Gleichungen und zwei Diagrammtafeln zusammengefaßt.

(a) Allgemeine Gleichung zur Errechnung von Rohrwiderständen bei Öldurchsatz.

$$p \text{ (mm Hg)} = 0,0043 (10^6)^{0,1865} \frac{1}{2 \kappa} w^{1,925} (10^6)^{-0,0556}$$

(a') Spezielle Widerstandsgleichung für eine 15 qm-Einheit des Gruppenkühlers.

$$p \text{ mm Hg} = 0,08 (10^6)^{0,1865} w^{1,925} (10^6)^{-0,0556}$$

In Gleichung a) und a') ist κ in kg/cbm, w in m/s, in qm/s einzusetzen. Mit Hilfe der Gleichung a') ist die Diagrammtafel A zur Ermittlung der Widerstände der 15 qm - Einheit entworfen.

(b) Allgemeine Gleichung zur Bestimmung des Wärmeübergangs von Öl an Eisenrohre normaler Rauigkeit:

$$\frac{\text{kcal}}{\text{qm}^2 \text{C}^{\circ} \text{h}} = 194 \left(\frac{1}{c \cdot p} \right)^{0,8} \frac{w}{d} 0,546 (10^6)^{0,183}$$

(b') Näherungsgleichung für den Wärmeübergang von Öl an Rohre

$$\frac{\text{kcal}}{\text{qm}^2 \text{C}^{\circ} \text{h}} = 0,24 \left(\frac{1}{c \cdot p} \right)^{1,2} \left(\frac{1}{d} \right)^{0,8} w 0,36 (10^6)^{0,183}$$

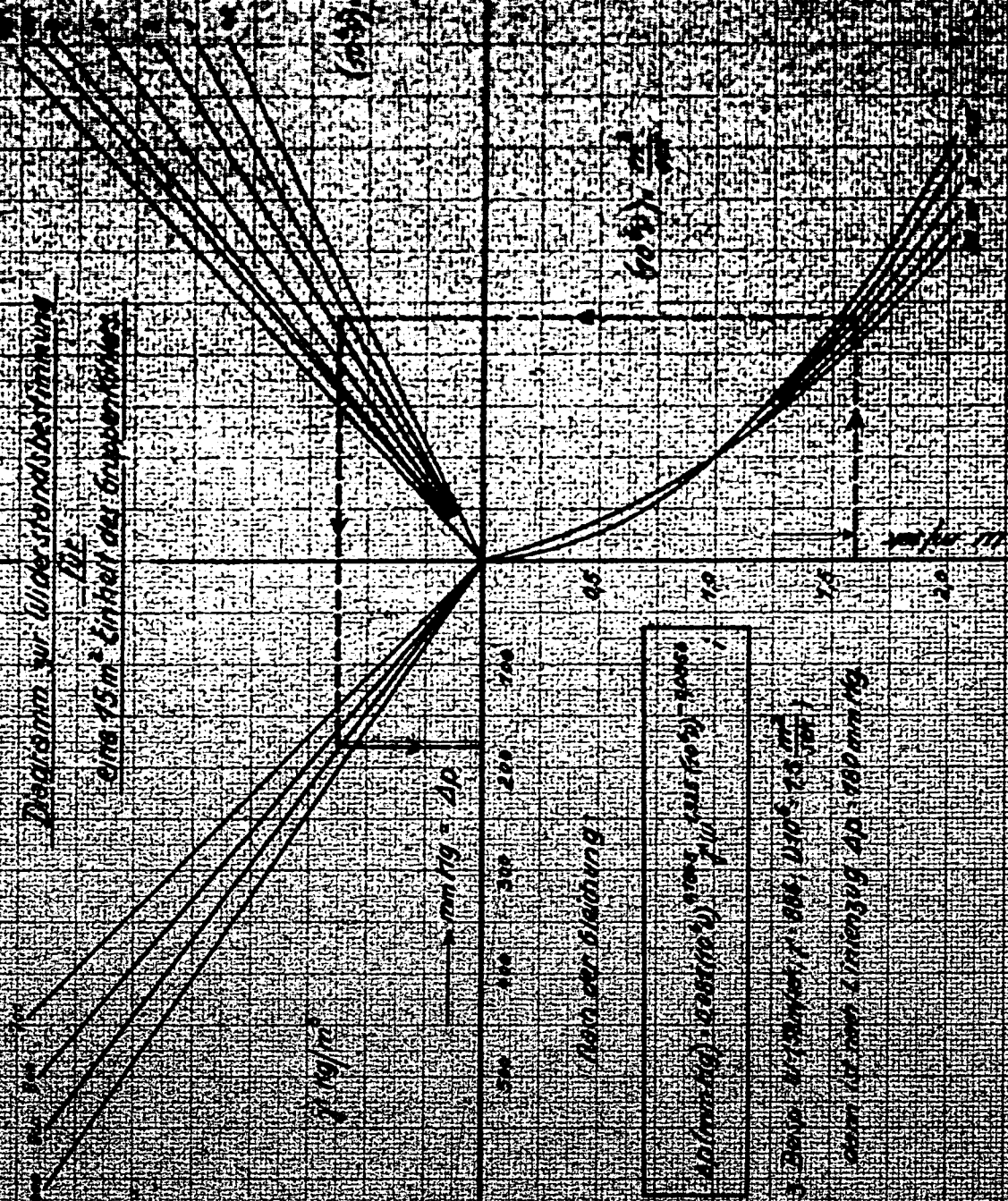
- 2! -

(b) Spezielle Gleichung des Wärmeübergangs von Öl an Eisenwandung für einen Gruppenkühler

$$\alpha = \frac{\text{kcal}}{\text{qm}^{\circ}\text{C h}} = 0,521 \left(\frac{1}{d}\right)^{1,2} \left(\frac{1}{w}\right)^{0,8} \cdot 0,36 (10^6)^{0,183}$$

In Gleichung b), b') und b'') ist ρ in kg/l, ν in $\frac{\text{kg}}{\text{sec}}$, w in m/s und d in m einzusetzen. Mit Hilfe der Gleichung b'') ist eine Diagrammtafel B aufgestellt, auf der sich die Wärmeübergangszahl für den Gruppenkühler ohne weiteres ablesen läßt.

Diagramm zur Widerstandsbestimmung
 eine 15m. Einheit der Temperatur



0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.

Benutzte Literatur.

- Hütte: - Band 1, 25. Auflage.
- Nusselt: Der Wärmeübergang in Rohrleitungen,
Mitteilungen über Forschungsarbeiten auf dem Gebiet
des Ingenieurwesens, Heft 89.
- Soennecken: Der Wärmeübergang von Rohrwänden an strömendes Wasser.
Mitteilungen über Forschungsarbeiten auf dem Gebiet
des Ingenieurwesens, Heft 108 und 109.
- Merkel: Die Grundlagen der Wärmeübertragung.
- Physikalische Tabellen von Landolt-Börnstein.
- Miscellaneous Publication of Bureau of Standards N 97, Nov.29.
- Schack: Der industrielle Wärmeübergang für Praxis und Studium.
- Burbach & Hermann:
Strömungswiderstand und Wärmeübergang in Rohren.