

ke

-24173

Untersuchungen
— und Betriebserfahrungen an
Kondensatoren.

23

1

24174

Dr. Sauer

Dr. Strombeck

Dr. von Staden

Dr. ...

Dr. ...

Dr. ...

Dr. ...

Dr. ...

Dr. ...

Dr. ...

Dr. ...

Inhaltsverzeichnis.

- I. Einleitung
- II. Thermodynamische Untersuchungen.
 1. Nicht kondensierbare Bestandteile im Einspritzprodukt.
 2. Darstellung des Kondensationsvorganges.
 - a) Bestimmung der Wärmeübergangszahl bei der Kondensation von Alkoholdampf.
 - b) Ermittlung der Kühlfläche.
- III. Praktische Folgerungen aus den theoretischen Untersuchungen.
 1. Einfluß der Verschmutzung.
 2. Maßnahmen zur Verhinderung der Verschmutzung und Erhöhung der Kühlwassertemperatur.
 3. Gasabfuhr aus dem Kondensator.
- IV. Zusammenfassung.

--0000000000000000--

861

Untersuchungen und Betriebserfahrungen an Kondensatoren.I. Einleitung.

Wenn man Reparaturingenieur einer Destillationsanlage wird und man geht die ersten Male durch den neuen Betrieb, so fallen einem unter anderem auch verschiedene Kondensatoren auf. Einer von ihnen wurde fotografiert und ist auf Abbildung 1 zu sehen. Der Apparat, der zur Kondensation von Isobutylalkohol

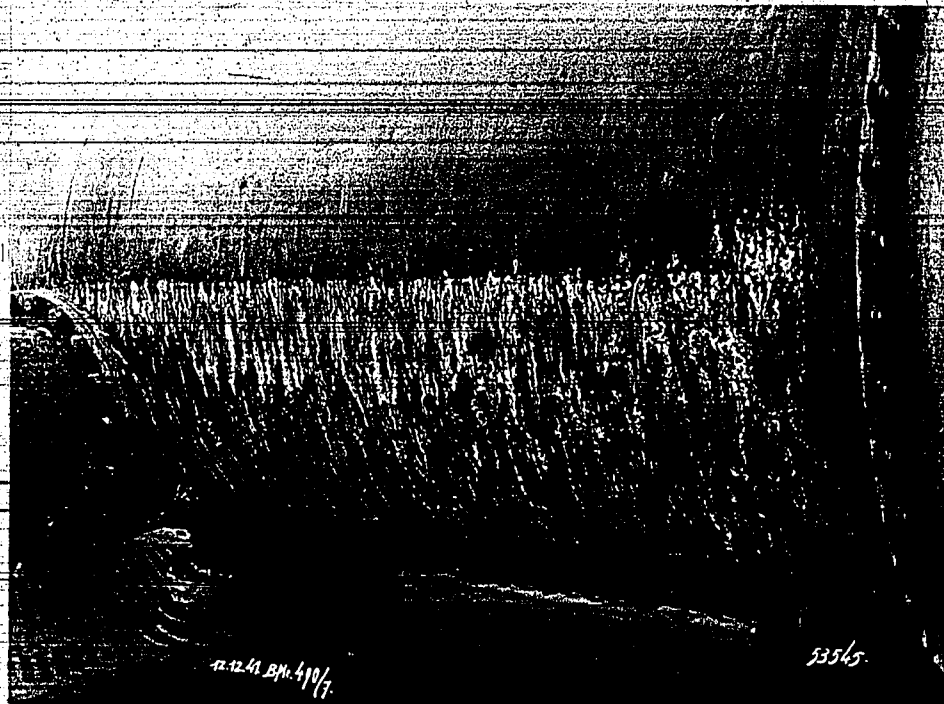


Abbildung 1
Kondensator von Kolonne 7 in der
Isobutyldestillation.

dient und von dem auf der fotografischen Aufnahme der seitliche Eintrittsstutzen des Dampfes, der Kondensatablaufstutzen, der Deckelflansch und ein Teil des Mantels zu erkennen ist, weist in seinem Mantel 2 ganz verschiedene Zonen auf. Die untere Hälfte hat im Laufe der Zeit stark gelitten, die Farbe ist dort zerstört und zum großen Teil abgeblättert. Die obere Hälfte sieht dagegen noch sehr schön aus und die Farbe ist an dieser Stelle vollständig erhalten geblieben. Die Führung des Dampfes erfolgt vom mitt-

leren Eintrittsstützen in der unteren Kondensatorhälfte nach außen. An den beiden Böden tritt der Dampf durch Öffnungen in den oberen Kondensatorteil und strömt dort entgegengesetzt der Dampf-führung im Unterteil nach der Mitte, geht dann nochmals nach außen und wieder nach der Mitte zu, wo oben auf dem Bild nicht sichtbar, der Anschluß an die Tsuchung sitzt. Die gesamte Kondensatorfläche beträgt 180 m^2 . In jenem Bereich im unteren Teil, wo die Farbe stark abgeblättert ist, sind etwa 62 m^2 Kühlfläche untergebracht. Das Wasser strömt durch die Kühlrohre, der Dampf um die Rohre, wie es allgemein bei Kondensatoren üblich ist.

Wenn die Verteilung von gut erhaltener Farbe und korrodierter Fläche umgekehrt wäre, so würde man annehmen, daß die Farbe oben durch atmosphärische Einflüsse wie Regen, Schnee zerstört worden ist, während sich unten im Regenschatten der ursprüngliche Zustand erhalten hat. Da es aber umgekehrt ist, bemüht man sich um eine Erklärung dieses Phänomens.

Wenn man zu diesem Zweck näher an den Kondensator herangeht und ihn berührt, so verbrennt man sich, unten wo die Farbe abgeblättert ist, die Finger, während der obere Teil des Apparates vollständig kalt ist.

II. Thermodynamische Untersuchungen

1. Nicht kondensierbare Bestandteile im Einspritzprodukt.

Nach dem Gesetz der Thermodynamik ist die Kondensation unter der Voraussetzung konstanten Druckes ein Vorgang, der sich bei konstanter Temperatur abspielt. Ein Druckabfall im Kondensator, der einen derartigen Temperatursturz zur Folge haben könnte, ist aber bei den üblichen Strömungsgeschwindigkeiten nicht möglich. Die Erscheinung ist also nur so zu erklären, daß sich oben im Kondensator ein nicht kondensierbares Medium einlagert und der ganze obere Teil, der sich kalt anfühlt, infolgedessen nicht am Wärmeaustausch teilnimmt. Da dieser Verlust an Wärmeaustauschfläche wenig vorteilhaft ist, erscheint es zweckmäßig, den Kondensationsvorgang bei Anwesenheit von Gasen einmal näher zu betrachten. Aus Mangel an entsprechenden Unterlagen ist eine exakte Darstellung nicht möglich. Die folgenden Untersuchungen sollen deshalb nur ein qualitativ richtiges Bild geben. Sie lassen aber wertvoll

Rückschlüsse auf Konstruktion und Betrieb zu, auch wenn sie quantitativ nicht allen Ansprüchen genügen.

In Zehntafel 1 sind für zwei in Leuna in der Isobutyldestillation aufgestellten Kolonnen die stündlich anfallenden

Kondensator	1	2
Gasmenge m ³ /h	760	150
Ganzzusammensetzung		
CO ₂	0,0 %	7,67 %
O ₂	0,6 %	(CH ₃) ₂ O 69,93 %
H ₂	0,4 %	C ₃ H ₈ 0,80 %
CO	0,5 %	C ₃ H ₆ 0,14 %
H ₂	97,5 %	C ₄ H ₁₀ 2,94 %
CH ₄	0,5 %	C ₄ H ₈ 1,92 %
C ₂ H ₆	0,7 %	C ₅ + höher 16,70 %
C ₂ H ₄		
Einspritzung	4,0 m ³ /h	22,0 m ³ /h
Rücklauf + Destillat	9,600 t/h	31,000 t/h
Kühlfläche des Kondensators	150 m ²	2 x 270 + 2 x 150 = 840 m ²
Siedepunkt des Destillats	105° C	66° C
Verdampfungswärme	158,2 kcal/kg	264 kcal/kg
Volumen des Dampf-Gas-Gemisches am Kondensator-Eintrittsstutzen	4055 m ³ /h	27 156 m ³ /h
Volumen des Dampf-Gas-Gemisches am Kondensator-Austrittsstutzen bei 10° C	0,44 m ³ /h	163 m ³ /h

Zehntafel 1

und über die Sicherheitstauchungen an den Kondensatoren abzuführenden Gas Mengen ebenso wie ihre Zusammensetzung eingetragen. Bei der Kolonne 2 beträgt der nicht kondensierbare Bestandteil 150 m³/h und besteht zum größten Teil, etwa 70 % aus Dimethyläther. Weiter sind darin noch 7,67 % CO₂ und 16,7 % C₅ Kohlenwasserstoffe enthalten. Es sind dies durchweg Bestandteile, die in der vorgeschalteten Zerkleinerungsanlage im Ausgangsprodukt gelöst verbleiben

sind. Die Kolonne wird mit 22 t/h Einspritzprodukt belastet und die Rücklauf- und Destillatmenge beträgt 31 t/h. Als Kondensationsfläche sind 2 x 270 und 2 x 150, also insgesamt 840 m² angeordnet. Der Siedepunkt des Destillats, das im wesentlichen aus Methanol besteht, beträgt bei Atmosphärendruck 66° C, die Verdampfungswärme von Methanol ist 264 kcal/kg.

In dem auf Abbildung 1 gezeigten Kondensator von Kolonne 7 fällt eine wesentlich geringere Gasmenge an, und zwar nur 0,42 t/h. Sie besteht fast vollständig aus Stickstoff mit Spuren von Sauerstoff, Wasserstoff und Kohlenoxyd. Zweifellos ist dieses Gas identisch mit dem als Schutzgas verwendeten Stickstoff für die Speichertanks. Das Einspritzprodukt löst dieses Gas während des Aufenthalts in Tank und auf diesem Weg gelangt es in die Kolonne und in den Kondensator von 180 m² Kühlfläche. In die Kolonne werden stündlich 4,0 m³ Produkt eingespritzt und die Rücklauf- und Destillatmenge beläuft sich auf 9,6 t/h Isobutylalkohol mit einem Siedepunkt von 108° C und einer Verdampfungswärme von 138 kcal/kg.

2. Darstellung des Kondensationsvorganges.

Die im Kondensator abgeführte Wärmemenge Q in kcal/h ergibt sich aus der Gleichung

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t$$

wobei F die Fläche in m²

t die Temperaturdifferenz Dampf-Kühlwasser

k die Wärmedurchgangszahl in kcal/m²h und °C

bedeuten.

Während die Bestimmung von Δt mit den vorhandenen Unterlagen verhältnismäßig einfach und genau möglich ist, stellt die Ermittlung der Wärmedurchgangszahl k den unsichersten Faktor der Rechnung dar. Die Wärmedurchgangszahl k ergibt sich aus der Beziehung

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$$

Es bedeuten

α₁ die Wärmeübergangszahl Dampf-Wand in kcal/m²h und °C

d die Wandstärke des Rohres in m

λ die Wärmeleitfähigkeit der Rohrwand in kcal/m h und °C

α₂ die Wärmeübergangszahl, Wand-Kühlwasser in kcal/m²h und °C.

Von diesen Größen sind d , λ und α_2 mit großer Genauigkeit zu ermitteln, jedoch macht die Bestimmung der Wärmeübergangszahl α_1 Schwierigkeiten, da nur wenig über den Wärmeübergang beim Kondensieren von Dampf-Gas-Gemischen bekannt ist. Es soll deswegen kurz der Weg beschrieben werden, der bei dieser Untersuchung zur näherungsweise Ermittlung von α_1 benutzt wurde.

2. Bestimmung der Wärmeübergangszahl bei der Kondensation von Alkoholdampf

Die Wärmeübergangszahl der reinen Dampfphase läßt sich nach der Wasserhauttheorie von Nusselt¹⁾ berechnen, und zwar ist

$$\alpha = 0,8024 \frac{2 \cdot r \cdot \rho \cdot \lambda}{3 \cdot \eta \cdot d \cdot (t_1 - t_2)^{0,25}} \text{ kcal/m}^2 \text{ sec. } ^\circ\text{C}$$

Dabei bedeuten:

r die Verdampfungswärme in kcal/kg

ρ das spezifische Gewicht der Flüssigkeit in kg/m³

λ die Wärmeleitfähigkeit der Flüssigkeit in kcal/m sec. °C

η die Zähigkeit der Flüssigkeit in kg/sec. m²

t_1 die Dampftemperatur in °C

t_2 die Wandtemperatur in °C

d der Durchmesser des Rohrs in m.

Da die erforderlichen Stoffwerte der niederen Alkohole fast alle bekannt sind ist es möglich, die Wärmeübergangszahl beim Kondensieren von reinen Alkoholdämpfen zu berechnen. Abbildung 2 zeigt den Verlauf der so berechneten Wärmeübergangszahl für Methylalkohol in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz Dampf Wand und gleichzeitig eine durch Versuche aufgenommene Kurve, welche gute Übereinstimmung mit den berechneten Werten zeigt. Die Werte nach der Nusseltschen Theorie gelten allerdings für ruhenden Dampf.

Der Einfluß der Strömung kann nach einer erweiterten Formel von ihm bei senkrecht angeordneten Rohren ermittelt werden. Da bei den Kondensatoren in Destillationsanlagen aber fast durchweg horizontale Rohre verwendet werden, stößt die Berücksichtigung des Geschwindigkeitseinflusses auf Schwierigkeiten. In die gleiche Abbildung wird nach der gleichen Theorie berechneten Wärmeübergangszahlen beim Kondensieren von Wasserdampf eingetragen.

1) H. Nusselt. Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes ZVDI Band 60 1916, Seite 541 und 569.

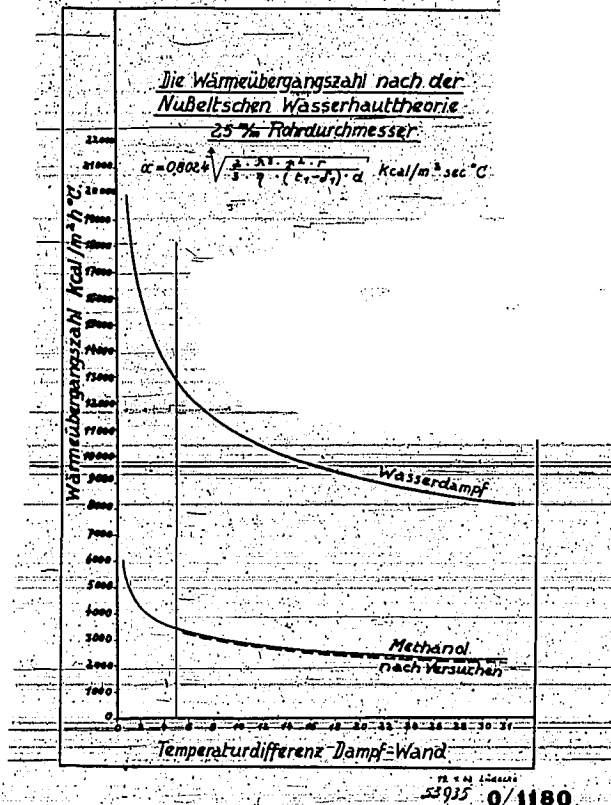


Abbildung 2
Die Wärmeübergangszahl beim Kondensieren von Dämpfen nach der Nußeltschen Wasserhauttheorie für 25 mm Rohrdurchmesser.

Wärmeübergangszahlen beim Kondensieren von organischen Flüssigkeiten und gleichzeitiger Anwesenheit von Inertgas, sind meines Wissens bisher nicht bestimmt worden. Nur für Wasserdampf-Gas-Gemisch existiert eine ausführliche Arbeit von Luder²⁾, die bei den vorliegenden Untersuchungen zur angenäherten Ermittlung der Wärmeübergangszahlen für Gemische von Gasen mit organischen Dämpfen herangezogen wurde.

Trägt man die von Luder für Sauerstoff und verschiedene Gase gewonnenen Werte über den Partialdruckverhältnis $P_{\text{Gas}} / P_{\text{Dampf}}$ auf (Abbildung 3) und wählt man sowohl für die Abs-

2) Luder. Wärmeübergang bei Kondensation von Dämpfen aus Gas-Dampf-Gemischen. Vortrag für die Fachsitzung "Wärme-Forschung" auf der VDI-Hauptversammlung 1938.

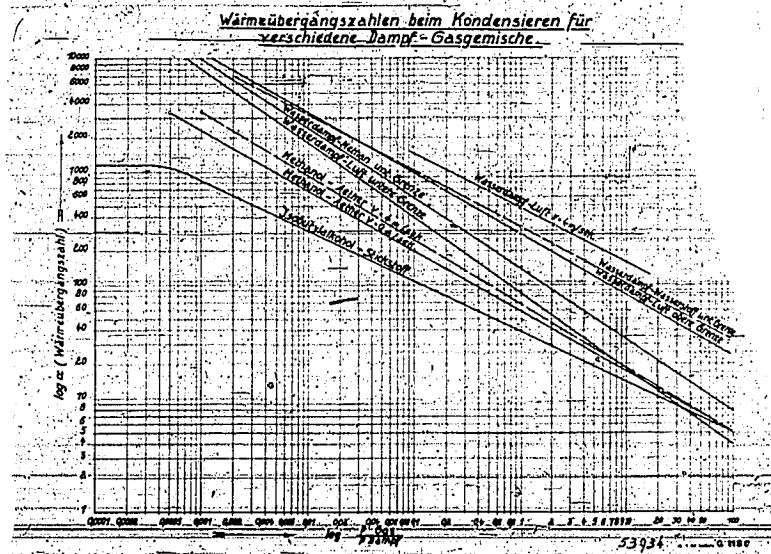


Abbildung 3
 Wärmeübergangszahlen beim Kondensieren von
 verschiedenen Dampf-Gasgemischen in Abhän-
 gigkeit vom Partialdruckverhältnis $P_{\text{Gas}} / P_{\text{Dampf}}$

Wissensweise und auch für die Ordinatenachse logarithmischen Maßstab, so erhält man in dem von Lüdler untersuchten Bereich gerade Linien, welche die Abhängigkeit zwischen Wärmeübergangszahl und Partialdruckverhältnis darstellen. Nimmt man an, daß die gleiche Gesetzmäßigkeit auch in dem nicht durch Versuchspunkte belegten Bereich niedriger Partialdruckverhältnisse und auch für andere Dampf-Gasgemische gilt, so hat man dadurch einen Hinweis, wie man bei der Kondensation organischer Stoffe die Wärmeübergangszahl näherungsweise ermitteln kann.

Für sehr große Partialdruckverhältnisse, also dort wo die Gasphase die Dampfphase überwiegt, ist die Wärmeübergangszahl in erster Linie durch das Gas bestimmt und man erhält voraussichtlich die gleichen Werte, wenn man dem Gas geringe Mengen Wasserdampf oder Methanoldampf zusetzt. Es wurden also die Wärmeübergangszahlen im Bereich hoher Partialdruckverhältnisse $P_{\text{Gas}} / P_{\text{Dampf}}$ als identisch mit den Werten nach Lüdler angenommen. Zu Grunde gelegt wurde der Wert für ein Luft-Wasserdampf-Gemisch

bei $P_{\text{Gas}} / P_{\text{Dampf}} = 100$.

Für sehr kleine Partialdruckverhältnisse, also dort wo die Dampfphase weit überwiegt, wurde angenommen, daß sich die Kondensation nach den in der Nusseltschen Wasserhauttheorie festgelegten Gesetzmäßigkeiten vollzieht und daß in diesem Bereich die Wärmeübergangszahlen nach dieser Theorie ermittelt werden können. Ferner wurde angenommen, daß die nach der Wasserhauttheorie von Nusselt für eine bestimmte Temperaturdifferenz berechneten Wärmeübergangszahlen sich sowohl für Wasserdampf als auch für Methanoldampf bei dem gleichen Partialdruckverhältnis einstellen. Verlängert man also die Wärmeübergangszahl nach Lüdér für Wasserdampf-Luft in Abbildung 3 geradlinig bis zu dem nach der Wasserhauttheorie für 5° Temperaturdifferenz berechneten Wert für Wasserdampf, der aus Abbildung 2 entnommen werden kann, so ist das Partialdruckverhältnis 0,0005 festgelegt, bei dem auch für Methanol - Äther die Wärmeübergangszahl den Wert nach der Nusseltschen Theorie erreicht. Die geradlinige Verbindung dieses Punktes in Abbildung 3 mit dem oben angegebenen Wert für Wasserdampf und Luft nach Lüdér bei dem Partialdruckverhältnis 100, ergibt die Abhängigkeit der Wärmeübergangszahl vom Gasanteil in dem kondensierenden Gemisch Methanol und Gas. Der Einfluß der Geschwindigkeit wurde noch berücksichtigt, indem die von Lüdér für die Geschwindigkeit 4 m/sec. für Wasserdampf-Luft festgestellten Werte zur Ermittlung der Wärmeübergangszahl des Methanol-Äthergemisches im Kondensator nach der oben geschilderten Methode herangezogen wurden.

In der gleichen Weise wurden auch die Wärmeübergangszahlen für den Kondensator der Kolonne 7 mit dem Gemisch Isopentylalkohol und Stickstoff ermittelt. Hier ergab sich nur die Feststellung, daß die Verlängerung der Kurve für Wasserdampf-Luft bis zu dem Partialdruckverhältnis 0,000129, das der Zusammensetzung am Kondensatoreintritt entspricht, viel höhere Werte der Wärmeübergangszahl ergeben hätte, als man sie für 5° Temperaturdifferenz nach der Wasserhauttheorie erhält. Es wurde deshalb die gleiche Konstruktion wie vorher schon beschrieben angewandt, d.h. die Kurve für Wasserdampf-Luft nach Lüdér bis zu dem Punkt geradlinig verlängert, wo der nach der Wasserhauttheorie ermittelte Wert für Wasserdampf erreicht wird. Durch diesen Punkt

ist dann das Partialdruckverhältnis 0,0005 bestimmt, bei dem auch die Wärmeübergangszahl, die nach der gleichen Theorie für Isobutylalkohol errechnet wurde, sich einstellt. In dem Bereich kleinerer Partialdruckverhältnisse, also von 0,0005 bis 0,000129 am Kondensatoreintritt, wurde die Wärmeübergangszahl als konstant angenommen.

Ferner wurde das Endergebnis mit den an den ausgeführten Kondensatoren gefundenen Werten verglichen und befriedigende Übereinstimmung festgestellt, sodaß man annehmen kann, daß die unter verschiedenen Annahmen aufgestellten Gesetzmäßigkeiten, die tatsächlichen Verhältnisse einigermaßen richtig wiedergeben.

b. Ermittlung der Kühlfläche.

Mit den so bestimmten Wärmeübergangszahlen auf der Dampfseite, den aus dem Wärmeleitwert entnommenen Wärmeübergangszahlen auf der Wasserseite und unter der Annahme einer schlecht wärmeleitenden Schmutzschicht in den Kühlrohren von 0,5 mm Stärke und einer Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,7 \text{ kcal/m} \cdot \text{K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-1}$ wurde der Kondensationsvorgang verfolgt und die erforderliche Kühlfläche für die in Zahlentafel 1 festgelegten Mengen berechnet. Auf die Wahl der Werte 0,5 mm für die Stärke der Schmutzschicht und $\lambda = 0,7$ für deren Wärmeleitfähigkeit, wird später noch eingegangen werden.

In Abbildung 4 ist als Abszisse die für den Kondensator 3, also für Methylalkohol, die bei dem Kondensationsvorgang abgeführte Wärme in Millionen kcal/h eingetragen, und zwar beträgt die bei vollständiger Abkühlung des Dampf-Gasgemisches auf 10°C , aber ohne Abfuhr der Flüssigkeitswärme, $0-192-700 \text{ kcal/h}$. Als Ordinatenmaßstab wurde die Temperatur gewählt und der Temperaturverlauf während der Kondensation in Abhängigkeit von der abgeführten Wärmemenge eingetragen. Man sieht, daß die Temperatur über einen sehr großen Bereich nahezu konstant bleibt und erst für die letzten 10% der abzuführenden Wärme einen sehr steilen abfall aufweist. Bei Berechnung wurden ferner die beiden Kühlwassereintrittstemperaturen von 25° und 6°C zugrunde gelegt und zu jeder Eintrittstemperatur die Austrittstemperatur von 40 und 55°C gewählt. Die unter diesen Voraussetzungen notwendigen Kühl-

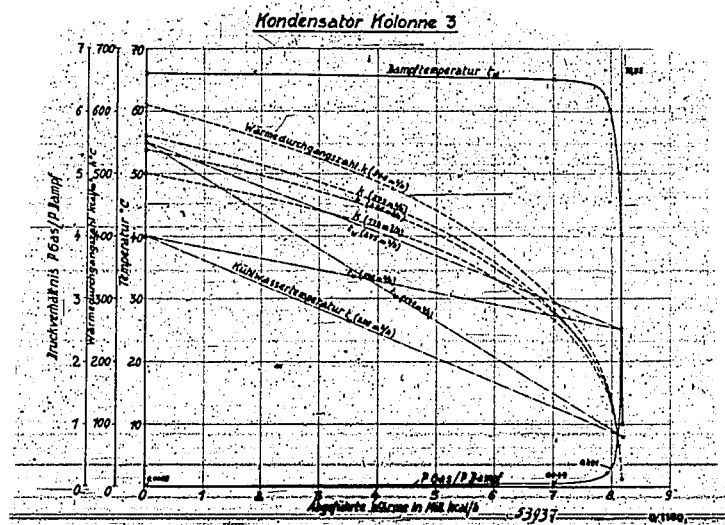


Abbildung 4

Kondensator Kolonne 3. Der Verlauf der Dampf-
temperatur, der Kühlwassertemperatur, des Druckverhältnis-
ses P_{Gas}/P_{Dampf} und der Wärmedurchgangszahl in Ab-
hängigkeit von der abgeführten Wärmemenge.

wassermengen sind in Zahlentafel 2 eingetragen.

Kühlwassertempe- ratur	Kühlwassertempe- ratur	Zühlwassermenge
8° C	40° C	256 m³/h
8° C	55° C	174 m³/h
25° C	40° C	546 m³/h
25° C	55° C	273 m³/h

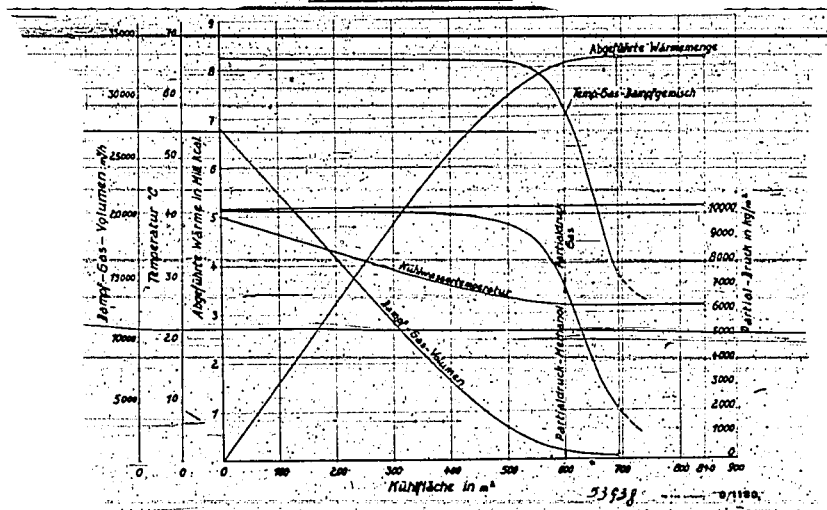
Zahlentafel 2

Da die Zunahme der Kühlwassertemperatur proportional
der abgeführten Wärmemenge ist, sind die Temperaturkurven des
Kühlwassers in Abbildung 4 gerade Linien. Die Wassergeschwindig-
keit, die sich aus diesen Kühlwassermengen berechnet, wurde zur
Bestimmung der weiter oben angegebenen Wärmeübergangszahl auf der
Wassersseite benutzt.

Berner ist in der Abbildung A noch das Partialdruckverhältnis $P_{\text{Gas}} / P_{\text{Dampf}}$ eingetragen. Dieses Verhältnis hat am Kondensatoraustritt den Wert 0,0069; nach etwa 6 Millionen abgeföhrtet kcal ist es auf 0,291 angestiegen und erreicht am Kondensatoraustritt bei 10°C den Wert 10,85. Dort sind in den 150 m Dimethyläther bei 10°C Temperatur nur mehr 11 kg Methanol enthalten, gegenüber 11.000 kg am Kondensatoreingang. Für die verschiedenen Partialdruckverhältnisse konnten die Abbildung 3 die Wärmeübergangszahlen α_1 entnommen und mit den bereits bekannten Werten von α_2 und λ die Wärmedurchgangszahlen k berechnet und in Abbildung A über der abgeführten Wärmemenge eingetragen werden. Man sieht aus der Abbildung, daß die Anwesenheit der Gasmenge sich erst bei dem letzten 10% der abgeführten Wärmemenge auf die Kondensationstemperatur auswirkt, während der Einfluß auf die Wärmedurchgangszahl α_1 schon aus der Wärmemenge abgeleitet werden kann.

Die in der Abbildung A eingezeichneten Werte der Wärmeübergangszahlen α_1 sind nach der Formel $\alpha_1 = \frac{Q}{F \cdot \Delta T}$ berechnet. Das Ergebnis ist in der Abbildung A eingezeichnete Werte von 500 bis 1000.

Kondensator Kolonne 3



Die in der Abbildung 5 eingezeichneten Werte der Wärmeübergangszahlen α_1 sind nach der Formel $\alpha_1 = \frac{Q}{F \cdot \Delta T}$ berechnet. Das Ergebnis ist in der Abbildung 5 eingezeichnete Werte von 500 bis 1000.

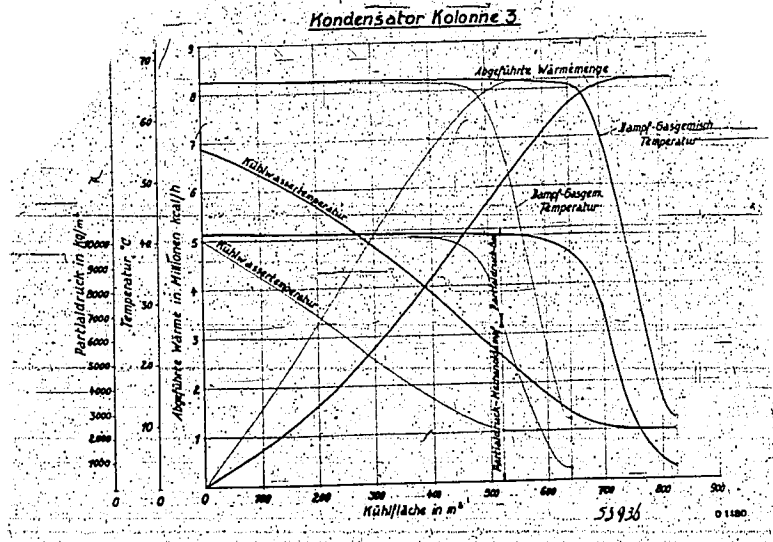


Abbildung 6

Kondensator Kolonne 3. Die abgeführte Wärmemenge, die Dampf-Gasgemisch Temperatur, die Kühlwassertemperatur und der Partialdruck von Dampf und Gas als Funktion der Kühlfläche für 8°C Eintrittstemperatur und 40°C bzw. 55°C Austrittstemperatur des Kühlwassers.

Die gleichen Betrachtungen wurden auch für den Kondensator der Kolonne 7 mit der wesentlich kleineren Inertgasmenge durchgeführt. In Abbildung 7 wurden wieder über der abgeführten

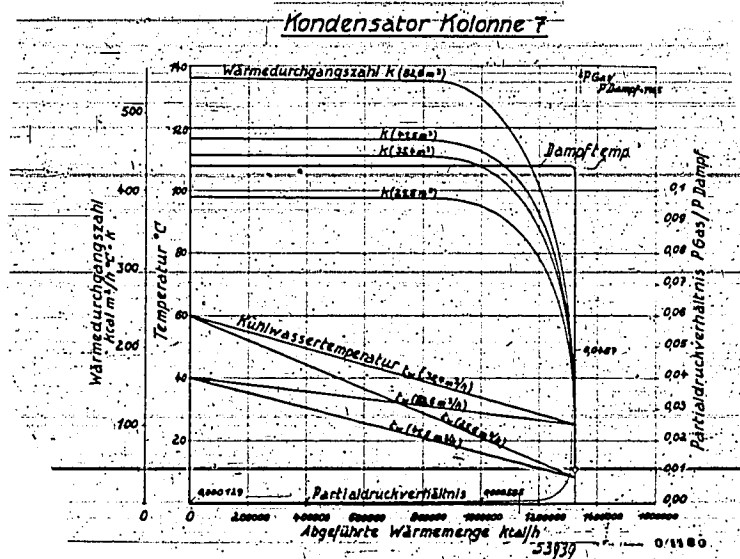


Abbildung 7

Kondensator Kolonne 7. Der Verlauf von Dampf-Temperatur, der Kühlwassertemperatur, des Druckverhältnisses $\frac{P_{\text{Gas}}}{P_{\text{Dampf}}}$ und der Wärmedurchgangszahl in Abhängigkeit von der abgeführten Wärmemenge.

Wärmemenge die Dampftemperatur und die Kühlwassertemperatur für 4 Fälle eingetragen. Ebenso enthält die Abbildung 4 die Wärmedurchgangszahlen für 4 Fälle, und zwar berechnet aus der Wärmeübergangszahl auf der Flüssigkeitsseite unter Berücksichtigung der Wassermengen aus Zahlentafel 3, der Wärmeübergangszahl des

Kühlwassereintrittstemperatur	Kühlwasseraustrittstemperatur	Kühlwassermenge
8° C	40° C	41,5 l/h
8° C	60° C	25,6 l/h
25° C	40° C	82,6 l/h
25° C	60° C	39,4 l/h

Zahlentafel 3

Dampf-Gasgemisches σ , nach der früher beschriebenen Methode mit Hilfe des Partialdruckverhältnisses $P_{\text{Gas}} / P_{\text{Dampf}}$ und unter Annahme einer Schmutzschicht von 0,5 mm Stärke und einer Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,7 \text{ kcal/m h } ^\circ\text{C}$. Das Partialdruckverhältnis $P_{\text{Dampf}} / P_{\text{Gesamt}}$ steigt von 0,000129 am Kondensatoreingang auf den Wert 140,5 am Kondensatorausgang an, unter Annahme einer Temperatur von 10° C an dieser Stelle.

An der Abbildung 7 fällt auf, daß sich der Kondensationsvorgang bei fast vollständig konstanter Temperatur abspielt. Die geringe Gasmenge hat auf die Temperatur keinen merklichen Einfluß und dadurch ist auch die scharfe Trennungslinie zwischen heißer und kalter Zone, die auf Abbildung 1 sichtbar war, zu erklären. Dagegen ist die Bedeutung des Gasen auf die Wärmedurchgangszahl für die letzten 20° des Kühlwasserflusses deutlich zu merken.

Mit den Wärmedurchgangszahlen und den Temperaturdifferenzen aus Abbildung 7 wurde stufenweise die für den Kondensationsvorgang erforderliche Kühlfläche berechnet. In Abbildung 8 wurde über der Kühlfläche die abgeführte Wärme, das Dampfgasvolumen, die Dampftemperatur und die Kühlwassertemperatur bei 8° Kühlwassereintritt und 40° bzw. 60° C Kühlwasseraustrittstemperatur eingetragen. Durch Erhöhung der Kühlwassereintrittstemperatur von

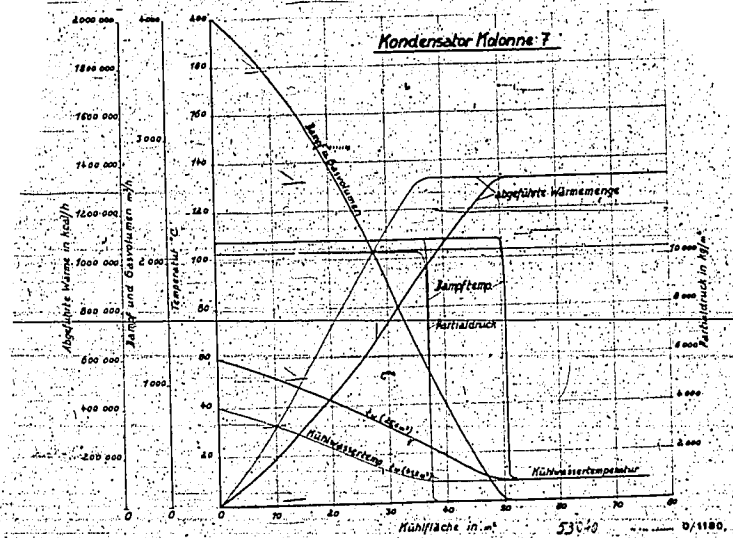


Abbildung 8
Kondensator Kolonne 7. Die abgeführte Wärmemenge, die Dampftemperatur, die Kühlwassertemperatur, das Dampf-Gasvolumen und der Partialdruck von Dampf und Gas als Funktion der Kühlfläche für 8°C Eintrittstemperatur und 40°C bzw. 60°C Abgangstemperatur des Kühlwassers.

40 auf 60°C bzw. Verminderung der Kühlwassermenge von 41,5 auf 25,6 m³/h, wird die Kondensationsfläche von 37 auf etwa 51 m² vergrößert. Da der Kondensator 100 m² Fläche besitzt, also sehr groß ist, könnte diese Wassereinsparung, falls nicht andere Gründe entgegen sprechen würden, ohne weiteres vorgenommen werden. Man sieht nun auch, daß die scharfe Trennungslinie zwischen abgesprungener Farbe und gut erhaltener Oberfläche am Kondensator theoretisch begründet ist.

In Abbildung 9 wurden die gleichen Werte wie in Abbildung 8 nochmals über den künstlichen Übergangsbereich für 25°C Kühlwassereintrittstemperatur und die beiden Austrittstemperaturen von 40 bzw. 60°C. Die Erhöhung der Kühlwassertemperatur im Sommer auf 25°C bedeutet praktisch keine Vergrößerung der Kühlfläche, da durch die Erhöhung der Wassermenge auf 82,6 bzw. 35,4 m³/h die Wärmedurchgangszahl auf der Wasserseite und damit die Wärmedurchgangszahl (etwa im gleichen Maße steigt als die Temperaturdifferenz zwischen Dampf und Kühlwasser abnimmt. Man benötigt also bei 8°C Wassereintritts- und 40°C Wasseraustritts-Tempera-

Kondensator Kolonne 7

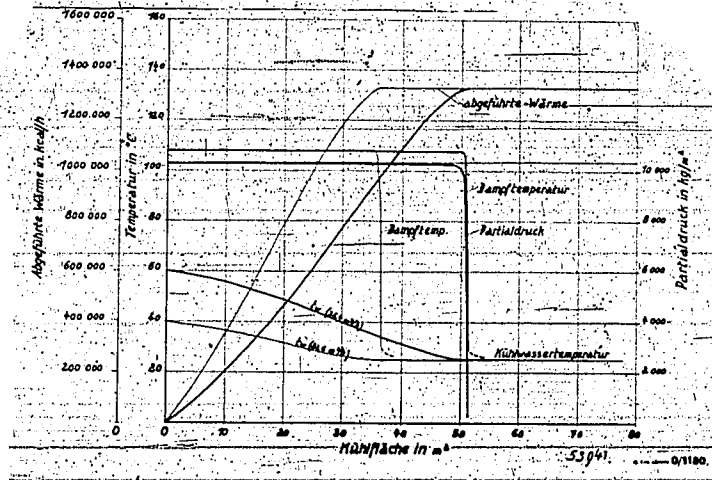


Abbildung 9

Kondensator Kolonne 7. Die abgeführte Wärmemenge, die Dampf-temperatur, die Kühlwassertemperatur und der Partialdruck von Dampf und Gas als Funktion der Kühlfläche für 25°C Eintrittstemperatur und 40 bzw. 60°C Ausgangstemperatur des Kühlwassers.

tur die gleiche Kühlfläche 51 m², als wenn man bei 25°C am Eintritt eine Temperaturerhöhung auf 40°C zulässt. Dieses Ergebnis ist allerdings nur durch die hohe Kondensationstemperatur von 108°C begründet und nicht ohne weiteres auf Kondensatoren, die Dämpfe mit niedrigeren Verflüssigungstemperaturen niederschlagen, zu übertragen.

III. Praktische Folgerungen aus den theoretischen Untersuchungen.

Die bei den theoretischen Betrachtungen vorgenommene Erhöhung der Kühlwasserabtrittstemperatur von 40 auf 55 bzw. 60°C zur besseren Ausnutzung der Kühlfläche von zu groß dimensionierten Kondensatoren und die gleichzeitige Einsparung von Gas konnten bisher nicht durchgeführt werden, da man mit der Wasserabtrittstemperatur an 40°C gebunden war. Bei 40°C ist die Korrosion noch erträglich und die Erneuerung der Kondensatorrohre muß etwa alle 2 1/2 Jahre vorgenommen werden. Würde man die Wassertemperaturen ohne weiteres auf 50 oder 60°C oder noch höher steigern, so würde diese Zeit auf einen wirtschaftlich nicht mehr tragbaren Wert herabgesetzt werden und der Vorteil der Gas-

Sparung wäre durch erhöhten Materialverbrauch stark aufge-
wogen.

f. Einfluß der Verschmutzung.

Man sieht aus obigen Betrachtungen, daß die Kondensa-
toren zum großen Teil überdimensioniert sind. Das kommt daher,
weil man bei der Verwendung von Sauerwasser mit sehr starker Ver-
schmutzung rechnen muß und die Stärke der Schmutzschicht von
0,5 mm, wie sie der Rechnung zugrunde gelegt wurde, noch wesent-
lich übertroffen wird. Um ein Reinigen in zu kurzen Abständen zu
vermeiden, baut man den Kondensator möglichst groß und kann auf
diese Weise etwa 1/4 bis 1/2 Jahr Betriebszeit überbrücken.

Wie die Kondensatoren nach längerer Laufzeit aussehen,
zeigen die beiden Abbildungen 10 und 11. Auf ihnen sind die Stirn-

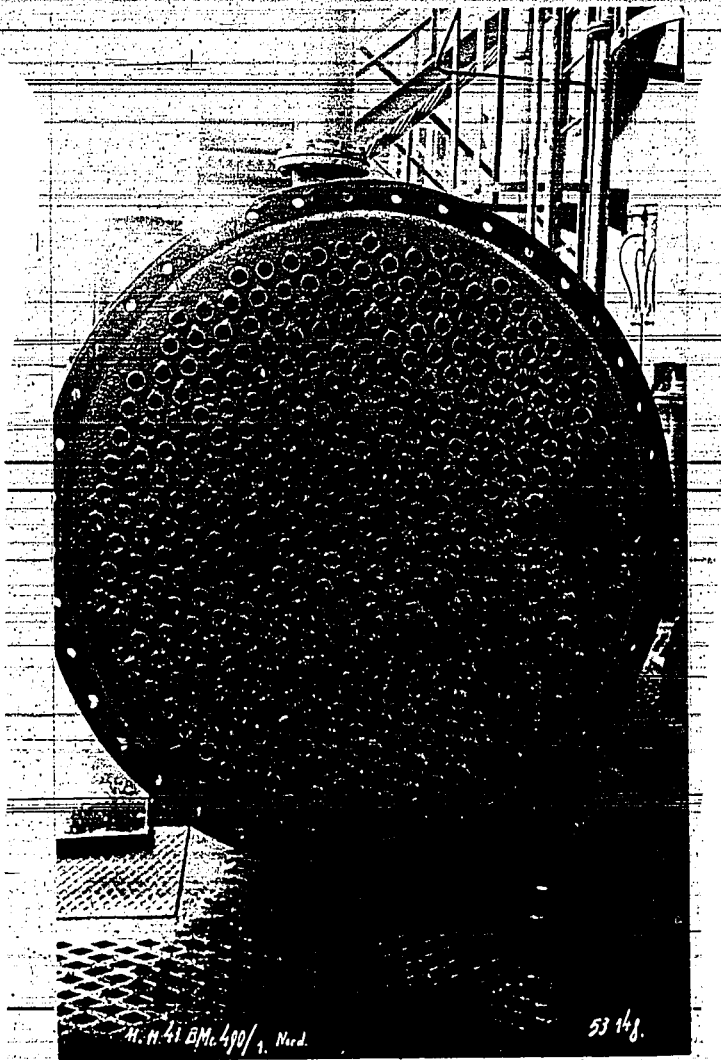


Abbildung 10
Verschmutzter Kondensator vor der Reinigung.

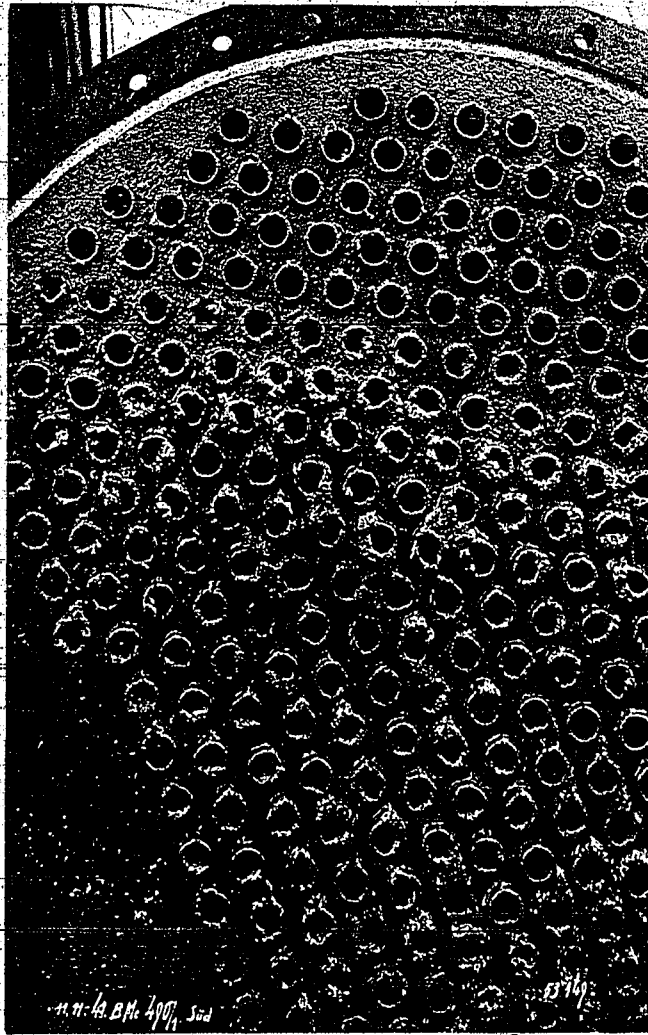


Abbildung 11
Verschmutzter Kondensator vor der Reinigung

flächen eines 2 1/2 Jahre in Betrieb befindlichen Kondensators zu sehen, der in Abständen von 1/2 Jahr regelmäßig gereinigt worden ist. Ein Teil der Rohre ist nach einer Laufzeit von 1/2 Jahr vollständig zugegangen. An allen Rohren ist durchweg starker örtlicher Korrosionsangriff festzustellen, und zwar besonders im Gebiet höherer Temperaturen im Unterteil des Apparates, denn das Kühlwasser fließt von oben nach unten durch den Apparat hindurch. Die Reinigung dauert unter Anstrengung aller Kräfte und bei Anwendung von maschinellen Reinigungsmethoden etwa 8 Stunden. Nach der Säuberung stellt sich meistens heraus, daß einige Rohre diesen Vorgang nicht mehr überstanden haben und an den stark korrodierten Stellen gerissen sind. Sie müssen dann zugeklopft werden.

Der andere Grund, warum die Kondensatoren so groß ausfallen, ist der, daß die Wärmeübergangszahlen von Dampf-Gasgemischen nur sehr wenig bekannt sind und man deshalb mit sehr großen Sicherungszuschlägen rechnen muß. Genauere Berechnungsunterlagen würden hier außerordentlich segensreich wirken und zu einer bedeutenden Materialersparnis führen.

2. Maßnahmen zur Verhinderung der Verschmutzung und Erhöhung der Kühlwassertemperatur.

Man hat nun in Leyna Maßnahmen ergriffen, die gestatten, die Kühlfläche von zu groß bemessenen Kondensatoren besser auszunutzen, die Verschmutzung und Korrosion verhindern und gleichzeitig an Kühlwasser zu sparen. Dies wurde erreicht durch Anwendung von Einbrennlacken auf der Kühlwasserseite der Apparate. Seit etwa 3/4 Jahren werden sämtliche in der organischen Abteilung eingebauten Kondensatoren und Kühler ebenso wie diejenigen Apparate die neu beschafft werden und kurzzeitig aus dem Betrieb genommen werden können, mit einem Reoresitüberzug versehen.

Die bisherigen Ergebnisse mit diesem Verfahren sind sehr günstig. Abbildung 12 und 13 zeigten einen Kondensator der nur 7 Monate in Betrieb war, ohne daß er gereinigt worden ist. Die Rohre sind innen noch vollständig glatt und zeigen keinerlei Anrostungen. Nur außen, wo beim Abtropfen des Lackes der Apparat wird bei der Behandlung ganz mit Farbe vollgestellt - und dem nachfolgenden Einbrennvorgang Blasen entstanden sind, sind einige punktförmige Roststellen zu bemerken, die aber keine Gefahr für ein Durchrosten der Rohre darstellen. Bei den später behandelten Kondensatoren hatte die Werkstattarbeit bereits solche Fortschritte gemacht, daß diese Mängel nicht mehr aufgetreten sind. Allerdings müssen die Schlosser beim Montieren der Deckel große Sorgfalt verwenden, damit nicht durch Werkzeuge und sonstige harte Gegenstände die Lackschicht an besonders exponierten Stellen beschädigt wird.

Das Reinigen eines Kondensators geschieht dann so, daß man etwa die doppelte bis dreifache normale Wassermenge anstellt, und dadurch den Schmutz, der sich auf der glatten Rohrfläche abgesetzt hat, herauswäscht, oder daß man bei geöffnetem Kondensator die einzelnen Rohre mit einem Schlauch durchspült. Die Verwendung

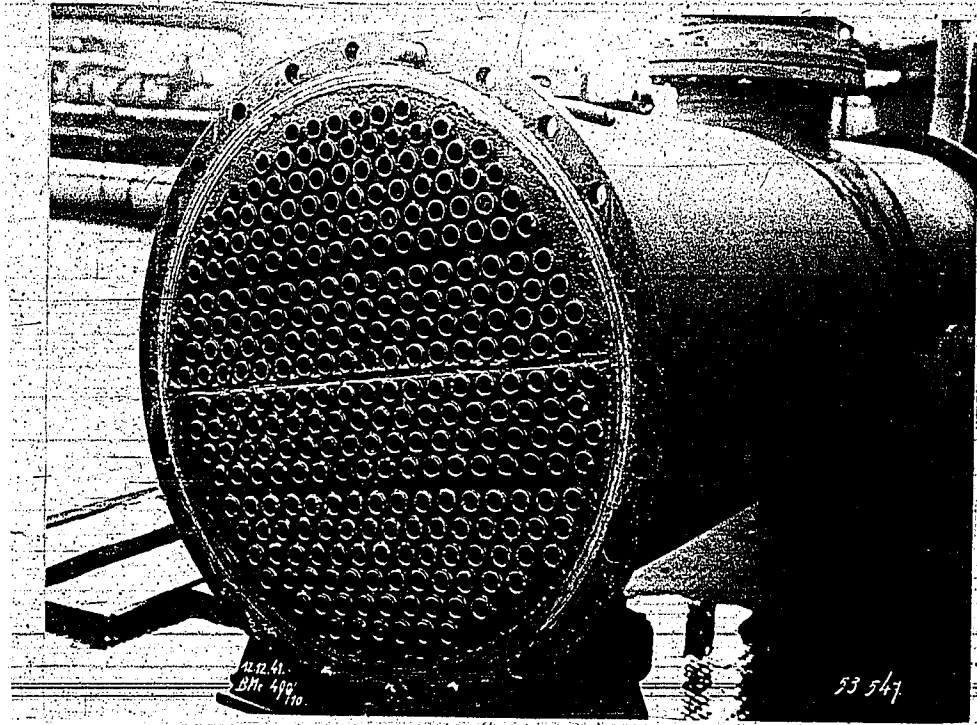


Abbildung 12
Mit Neoresit behandelter Kondensator nach
einer Laufzeit von 7 Monaten.

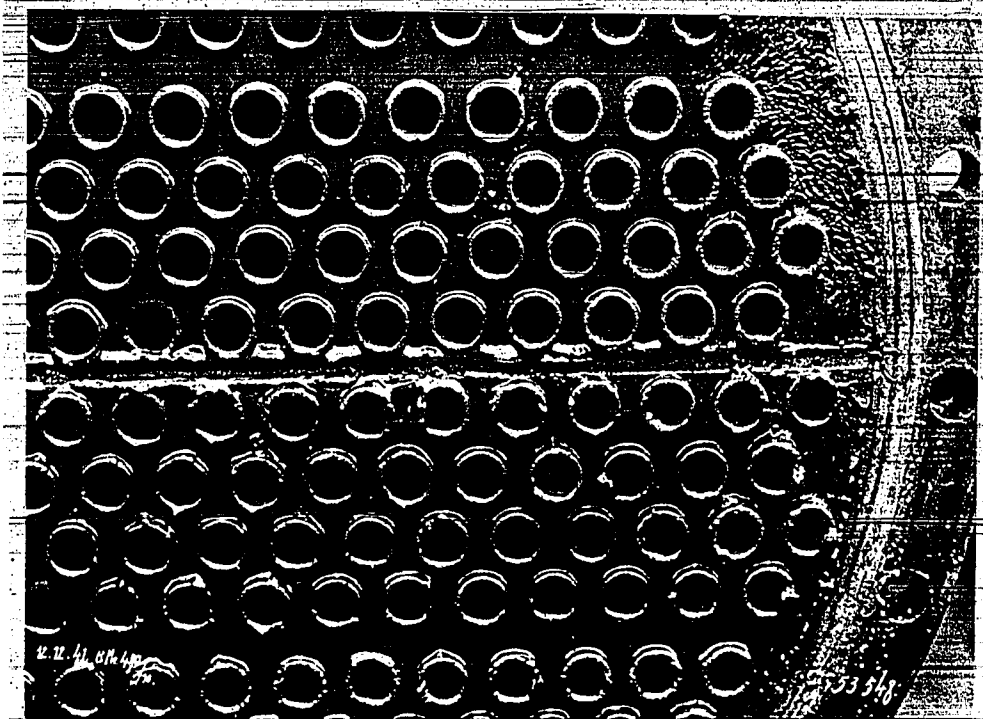


Abbildung 13
Mit Neoresit behandelter Kondensator nach
einer Laufzeit von 7 Monaten.

~~von harten Gegenständen bzw. maschinellen Vorrichtungen für die~~

Reinigung, würde die Lackschicht verletzen und ist auch überflüssig. Die Lackschicht verhindert also, wie man auf den Abbildungen deutlich sehen kann, die Verschmutzung und ergibt demnach im Dauerbetrieb auf der Wasserseite wesentlich bessere Wärmeübergangsverhältnisse. Sie kann aber auch einer viel höheren Temperatur ausgesetzt werden als die ungeschützten Kühlrohre und die Steigerung der Wassertemperatur auf 60°C ist nun ohne weiteres möglich. Die Lackschicht bedeutet demnach nur in den ersten Betriebstagen eine geringe Verschlechterung des Wärmedurchganges gegenüber dem ungeschützten Kondensator. Sobald aber die nicht lackierte Fläche Korrosionsangriffe aufweist, ist der mit Lack behandelte Kühler bedeutend überlegen.

Die Wärmeleitfähigkeit der Neorisitschicht wurde aus Versuchen der Materialprüfung Leuna zu $\lambda = 0,7 \text{ kcal/m h } ^{\circ}\text{C}$ errechnet. Die Dicke der Lackschicht wird mit 0,2 und 0,3 mm angegeben. Diese Werte wurden den vorausgegangenen theoretischen Berechnungen zugrunde gelegt, sodaß diese ohne weiteres auf den mit Einbrennlack behandelten Kondensator angewendet werden können.

Am Kondensatoraustritt bedeutet die Neorisitschicht in einer Stärke von 0,3 mm eine Verschlechterung der Wärmedurchgangszahl um etwa 20 bis 25 %, bezogen auf den nicht verschmutzten Apparat. Am Kondensatoraustritt, d.h. im Gebiet der niederen Wärmeübergangszahlen auf der Dampfseite ist der Einfluß der Lackschicht auf die Wärmedurchgangszahl praktisch auf Null zurückgegangen.

Man hat durch diese Maßnahme zum Beispiel erreicht, daß ein Kondensator von 200 m^2 Kühlfläche, der nicht lackiert mit etwa $400 \text{ m}^3/\text{h}$ Wasser beaufschlagt wurde, jetzt nach dem neuen Verfahren und Lackieren in der gleichen Jahreszeit und bei der gleichen Belastung der Kolonne nur mehr mit $180\text{-}200 \text{ m}^3/\text{h}$ Wasser gefahren wird. Die Kühlwasseraustrittstemperatur konnte bei 64°C Kondensationstemperatur bis auf 53°C gesteigert werden. Nachdem sich während einer Betriebszeit von $3/4$ Jahren keine Schäden an der Lackierung gezeigt haben, rechnen wir mindestens mit der doppelten, wahrscheinlich sogar mit der dreifachen Lebensdauer der Kondensatorbohrung, was in der heutigen Zeit der Materialknappheit besonders zu begrüßen ist. Als Beispiel sei nur genannt, daß wir bisher in Leuna in der Isobutyl- und Methanol-Destillation

jährlich etwa 15-20 t Kondensatorrohre verbraucht haben.

Die wirtschaftliche Rechnung einer derartigen Lackierung, und zwar für einen Kondensator von 200 m² Kühlfläche ist in Zahlentafel 4 zusammengestellt.

	<u>lackiert</u>	<u>nicht lackiert</u>
Lebensdauer	5 1/2 Jahre	2 3/4 Jahre
Kosten der Lackierung einschließlich abstrahlen und attramentieren	2 500.-- RM	-
Berühren des Kondensators Arbeitslohn	-	1 000.-- RM
Rohrmaterial für den Kondensator (2150 m Rohr 27/32)	-	2 000.-- RM
Reinigungsarbeiten jedes halbes Jahr (10 Reinigungen in 5 1/2 Jahren)	1 000.-- RM	2 000.-- RM
Wasserverbrauch (100 m ³ /h) in 5 1/2 Jahren	-	44 000.-- RM
	<u>3 500.-- RM</u>	<u>49 000.-- RM</u>

Zahlentafel 4
Virtichreitsrechnung für die Lackierung
eines 200 m² Kondensators.

Leider sind die bisher zur Verfügung stehenden Kühltürme nur bis zu Kühlwassertemperaturen von etwa 60° C zulässig, da sie bei wesentlich höheren Temperaturen durch das Saalewasser angegriffen werden. Es sind aber schon Bestrebungen im Gange, Überzüge für wesentlich höhere Temperaturen zu entwickeln. Dann wird es möglich sein, übermäßig groß dimensionierte Kondensatoren durch kleinere, dafür Wassermengen auszunutzen. Es wird dann nicht mehr vorkommen, daß Apparate so wie der auf Abbildung 1 gezeigte Kondensator, aussehen. Sicherheitszuschläge des berechnenden Ingenieurs werden sich dann nicht mehr in einer Anhäufung toten und unbenutzten Materials äußern.

Wir haben auch schon den Versuch gemacht an Kondensatoren, die wir zum Berühren nicht auswechseln konnten, die einzelnen Rohre zu lackieren und dann einzuwalzen. An der Walzstell

wird dann die Lackschicht weggequetscht und kann praktisch nicht mehr ausgebessert werden. Es läßt sich nämlich nicht vermeiden, daß Schmutz und Öl bei diesem Vorgang an die Rohrwand gelangt und die Lackierung hält nur auf vollständig ölfreien Flächen. Außerdem wäre es auch schwierig, die für das Härten der Lackschicht erforderliche Temperatur von 150°C auf die Rohre zu bringen. Bei Kondensatoren, die einen Druck von etwa 16 Atm. im Mantel aushalten, konnte man dies evtl. durch Anschließen an eine Hochdruckdampfleitung erreichen. Wir hoffen aber, daß wenigstens die gut erhaltene Lackschicht außerhalb der Walzzone in dem übrigen Rohr der Korrosion verhindert und daß, wenn wir in $2\frac{1}{2}$ Jahren die Rohre auswechseln müssen, wenigstens der lackierte Teil erhalten geblieben ist und durch Vorschuh eines kurzen Rohrstückes oder durch Minwalzen in andere kürzere Kondensatoren der größte Teil des Materials erhalten bleibt. Das Lackieren eines Apparates an Ort und Stelle dürfte nur sehr schwer möglich sein, man wird also fast immer den Kühler oder Kondensator ausbauen und in die Werkstatt schaffen müssen. Besonders bei liegenden Apparaten wäre es unmöglich, die Rohre gleichmäßig mit Lack zu bestreichen.

3. Gasabfuhr aus dem Kondensator.

Die theoretischen Untersuchungen haben ferner gezeigt, daß schon die geringe im Einspritzprodukt gelöste Gasmenge eine starke Verschlechterung der Übergangszahl im letzten Teil des Kondensators und dadurch eine relativ hohe Kühlfläche zur Folge hat. Es ist deshalb nicht ratsam, durch Einleiten von zusätzlichen Gasen, z.B. für die Standmessung, die Druckdifferenzmessung usw. diese Gasmenge noch zu erhöhen. Bei einem normal dimensionierten Kondensator würde eine solche Maßnahme eine Vergrößerung der Kühlwassermenge bedeuten.

Außerdem ist es unbedingt zu empfehlen das Gas dort abzuführen, wohin es entsprechend seiner Dichte von selbst strömt, d.h. wenn das Inertgas leichter ist als der Dampf, muß der Gasaustritt oben sein, umgekehrt wenn es schwerer ist als der Dampf, ist der Gasaustritt unten anzulegen. Befolgt man diese Regel nicht, so wird das Gas entgegen der Strömungsrichtung in den Dampf hineindiffundieren und den Anteil an Inertgas im Dampf erhöhen. Dies

bedeutet aber wieder eine zusätzliche Herabsetzung der Wärmeübergangszahl und eine größere Kondensationsfläche, oder wenn diese nicht zur Verfügung steht, eine höhere Kühlwassermenge. Bei dem Kondensator der Kolonne 3, wo in erster Linie Dimethyläther als Gesamtteil mit dem Molekulargewicht 46 vorhanden ist und Methanol-
dampf mit dem Molekulargewicht 32 kondensiert wird, müßte die Strömungsrichtung des kondensierenden Gemisches von oben nach unten sein. Beim Kondensator der Kolonne 7, wo das spezifische Gewicht des Stickstoffes wesentlich kleiner als dasjenige von Isobutylalkohol ist, muß das Dampfgasgemisch von unten nach oben durch den Kondensator geführt werden.

IV. Zusammenfassung.

Es wurde festgestellt, daß ein großer Teil der Kondensatoren wegen Unsicherheit in der Berechnung und wegen in Betrieb eintrötender Verschmutzung überdimensioniert ist. An Hand von theoretischen Berechnungen wurde gezeigt, daß durch Erhöhen der Kühlwassertemperatur eine bessere Ausnutzung bei gleichzeitiger Einsparung an Kühlwasser möglich ist. Die in Leuna in den Destillationsanlagen der organischen Abteilung eingeführte Auskleidung der Kühlerrohre mit Lacken, ermöglicht eine Erhöhung der Kühlwassertemperatur, ohne daß ein Korrosionsangriff zu befürchten ist. Diese Maßnahme hat sich infolge einer bedeutenden Einsparung an Rohrmaterial als großer wirtschaftlicher Fortschritt erwiesen.