

Zurück an

Vorzimmer Dir. Dr. Pflor

Über eine Wärmepumpe mit gutem technischen Nutzeffekt.

Der Wirkungsgrad einer mit Gasen arbeitenden Wärmepumpe wird außerordentlich durch die mit dem Betrieb von Kompressoren und Expandern verbundenen Verluste beeinträchtigt. Der Grund hierin ist in dem Umstand zu erblicken, daß der theoretisch erforderliche Arbeitsaufwand, wenn die zu überwindenden Temperaturdifferenzen im Verhältnis zur absoluten Temperatur klein sind, zwar ebenfalls nur klein ist, daß aber die von den Maschinen zu leistende positive und negative Gesamtarbeit um ein Vielfaches höher ist als die Nutzarbeit¹⁾ und das sich infolgedessen die Unvollkommenheiten der Kompressoren und Expander auf diese ganze sehr große Gesamtarbeit auswirken. Dies tritt ganz besonders dann ungünstig in Erscheinung, wenn die zum Betriebe der Maschinen verwendete Energie aus Kohle stammt und somit schon mit einem schlechten Nutzeffekt behaftet ist.

Die Verhältnisse seien kurz geschildert. Bei der oberen Temperatur T_1 wurde Wärme von der Maschine abgegeben, bei der unteren T_2 aufgenommen, dann ist die theoretisch erforderliche Arbeit

$$A_n = Q \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

wenn Q die bei T_1 abgegebene Wärmemenge bedeutet.

(Beispiel: Ist $T_1 = 435^\circ$

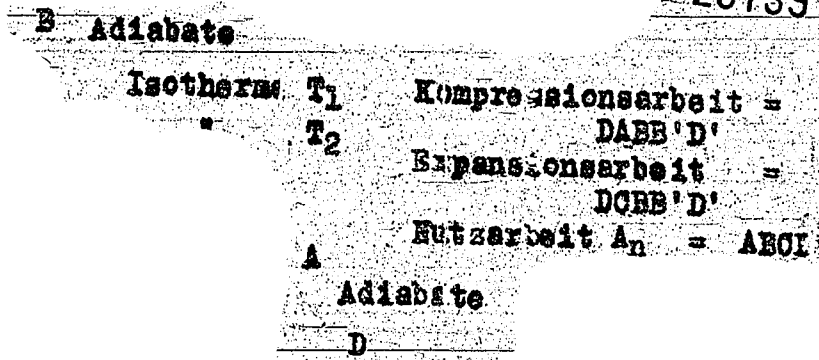
$T_2 = 400^\circ$

so ist $A_n = \frac{1}{20} Q$ oder 5 % von Q .)

Wird der Prozeß ideal ausgeführt, so wird bei T_1 isotherm komprimiert, bei T_2 isotherm expandiert; von T_1 nach T_2 und zurück gelangt man durch adiabatische Expansion bzw. Kompression.

1) Die Nutzarbeit ist die Differenz von zwei sehr großen (und im obigen Falle fast gleichen) Arbeitsbeträgen.

23739



B'C' A'D'

Fig. 1
Kreisprozess mit Gasen

Die Figur veranschaulicht, wie groß die durch die Maschinen zu bewältigenden Arbeiten, positiv und negativ, im Vergleich zur Nutzarbeit sind.

(Im obigen Beispiel sind diese Arbeiten etwa 40-mal größer als A_n). Die Unvollkommenheiten der Maschinen machen sich also an diesen gesamten Arbeitsbeträgen geltend.

Die Verhältnisse ändern sich, wenn man Kreisprozesse mit Verdampfung und Kondensation zu Hilfe nimmt. Man verdampft dabei bei der unteren Temperatur T_2 und kondensiert unter höherem Druck bei der oberen Temperatur T_1 . Hierbei ist zwar auch Kompressions- und Expansionsarbeit zu leisten, aber die bei der Verdampfung bzw. Kondensation aufgenommene bzw. abgegebene Wärme ist ein Vielfaches der dabei gewonnenen bzw. geleisteten Arbeit, während beim Kreisprozess mit Gasen die abgegebene bzw. aufgenommene Wärme gleich groß mit der dabei geleisteten bzw. gewonnenen Arbeit ist.

(Nehmen wir im obigen Beispiel eine Flüssigkeit (etwa Diphenyl) zu Hilfe, mit einer molaren Verdampfungswärme von 10 Cal/Mol¹), so ist, um den gesättigten Dampf bei 435° zu kondensieren, die Arbeit $p_v = R T = 1,41$ Cal zu leisten, d.h. 14 % der angegebenen Kondensationswärme, wovon der bei der Verdampfung bei 400° aufgenommene Arbeitsbetrag gleich 13 % der Verdampfungswärme kommt.

Hierzu wäre noch die Kompressionsarbeit zu rechnen, die notwendig ist, um den gesättigten Dampf von 400° adiabatisch auf den bei 435° herrschenden Druck des gesättigten Dampfes zu bringen. Die entsprechenden Drücke seien 5 at und 10 at. Dann beträgt die adiabatische Kompressionsarbeit 0,7 Cal, wobei im allgemeinen jedoch

1) Es soll davon abgesehen werden, daß die Verdampfungswärmen mit steigender Temperatur abnehmen und bei der kritischen Temperatur zu Null werden.

höhere Kompressions Temperaturen erreicht werden, wenn man nicht beim Erreichen der Temperatur T_1 isotherm bis auf den Kondensationsdruck weiterkomprimieren will. Da beim Zurückgehen von T_1 auf T_2 Flüssigkeit vorliegt, tritt hier praktisch keine Volumenarbeit auf.

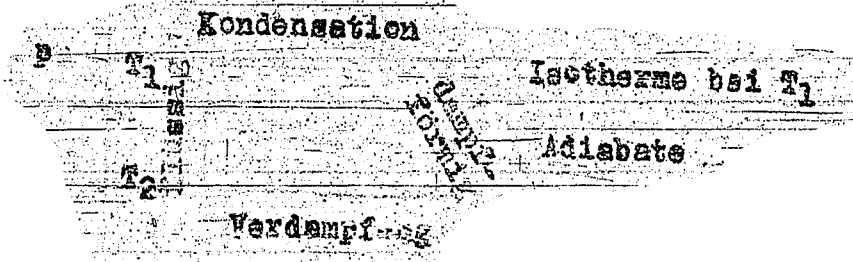


Fig. 2

Kreisprozess mit Kondensation

Die insgesamt positiv und negativ leistenden Arbeiten betragen demnach $1,4 + 1,3 + 0,7 = 3,4$ Cal, also 34 % von 10 Cal, während beim Arbeiten mit Gasen etwa 20 % solcher Arbeiten auftreten !)

Die Verwendung von Kondensationsvorgängen hat noch den weiteren Vorteil, daß die Wärmeübertragung im Wärmeaustauscher durch Flüssigkeiten mit ihrer guten Wärmeübertragungszahl erfolgt, so daß die Austauscher kleiner gehalten werden können.

Ferner ist die erforderliche Maschinenleistung nur ein Bruchteil (im obigen Beispiel 34 % gegen 200 %, also 1/6) der bei einem reinen Gaskreislauf erforderlichen.

Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß sich Flüssigkeiten (Diphenyl) verwenden lassen, deren großes Molekulargewicht bei Verdichten der Dämpfe nur wenige Stufen beim Turbokompressor erfordert. Dieser Umstand ist von großer Bedeutung, wenn man die Verhältnisse beim Wasserstoff mit seinem kleinen Molekulargewicht vergleicht. Die Leistung eines Turbokompressors verhält sich wie die Wurzel aus dem Molekulargewichte. Nun sind aber

Diphenyl

23741

Somit kommt man bei Betrachtung von T_1 und T_2 mit einer 0-2-1
kleineren Maschine aus, als wenn man wiederholt T_1 benutzt.

Bedingt wird noch eine bedeutende Erweiterung in mechanischen
Aufwand dadurch erreicht, das eine entsprechende Maschine benötigt,
so das Rückkehr von T_1 zu T_2 in ähnlichem Zustand erfolgt.

Gen. Michael

- 1) Ke He
 - 2) Dr. Meier
 - 3) Büro Dr. Straube
- Die Wärmepumpe

Zusammenfassung

Nach einem Hinweis auf die Erfahrungen wird gezeigt, mit welchem Wärmeverbrauch (Leistungsziffern) Wärmepumpenanlagen arbeiten müssen, um in Bezug auf Ausnutzung der Kohlewärme die bisher üblichen Arten der Verwertung der Kohlewärme zu übertreffen. Hiernach erscheint die Wärmepumpe noch am ehesten geeignet an Stelle direkter Kohleverfeuerung zur Erzeugung von Heizleistung unmittelbar oder mittelbar über Wasserdampf oder Niederdruckdampf zu stehen. Außerdem behält die Wärmepumpe ohne Modifikation in Wirtschaftskälteanlagen mit Wasserkraft als Hauptenergiequelle

- Verteiler:
- Dr. Dr. Sauer
 - Dr. Dr. Steombeck
 - Referatsbüro
 - Buc. Handbibliothek

414

Die Wärmepumpe

A) Einleitung

Beim Durchlesen und Prüfen von neuen Wegen um den Energieverbrauch eines wirtschaftlichen Betriebes sparsamer zu gestalten, muß man sich auch über die Möglichkeit, die die Wärmepumpe in dieser Richtung hin eröffnen kann, auseinandersetzen. Es wird vielfach die Ansicht vertreten, daß die Wärmepumpe ein bisher zu wenig beachtetes Mittel zur Energieeinsparung sei, das bei entsprechender technischer Entwicklung und Vervollkommen der bisher üblichen Arten der Ausnutzung von Kohlenwärme weit zu übersteifen in der Lage ist. Diese Ansicht zu überprüfen, Grenzen ihrer Gültigkeit festzulegen und zahlenmäßig zu beschreiben ist das Ziel der vorliegenden Untersuchung.

B) Thermodynamische Grundlagen und Ausführungsarten

Zur Erleichterung der Übersicht seien nachstehend die wichtigsten theoretischen Beziehungen kurz zusammengefaßt wiedergegeben. Der Kreisprozess bei einer Wärmepumpenanlage ist aus Bild 1 leicht verständlich: ein Kompressor saugt den gasförmigen Wärmeträger an (1) und verdichtet ihn unter Aufwands von Arbeitsleistung zu (2); im Kondensator wird durch Kühlung die Arbeitswärme abgeführt, wodurch der Wärmeträger verflüssigt werden kann. Durch eine Expansion erfolgt die Entspannung (3-4) auf den Ausgangsdruck des Kompressors, sodann Aufnahme der Wärmeenergie Q_2 als irgend einem Wärmereservoir in Verdampfer, wobei der Wärmeträger wieder in den gasförmigen Zustand (1) übergeht. Bild 2 zeigt den Prozess als isotherme Kreisprozess im $p-v$ -Diagramm. Die von Kompressor und Verdampfer geleistete Arbeit ist demnach

Die wichtigste Kenngröße für den Wirkungsgrad einer Wärmepumpe ist sich eine

definiert: die Anzahl der Joule Wärme, die bei der Erzeugung von Arbeit W in der Wärmepumpe aus dem Wärmereservoir bei der Temperatur T_2 entnommen werden kann. Die Leistungszahl soll also möglichst groß sein, die Leistungszahl η ist also ein Maß für die

Wirkung ist auch erkennbar, mit T_1 und T_2 ist $T_1 > T_2$ vorausgesetzt

- 1) Die Temperatur T_2 soll möglichst hoch sein
- 2) Die Temperaturdifferenz $T_1 - T_2$ soll möglichst klein sein

Insbesondere sind die Temperaturen T_1 und T_2 zu berücksichtigen, die die

Außer dem genannten Einfluss ist noch von Bedeutung, in welcher Weise der wirklich durchgeführte Prozess mit dem idealen Carnot-Prozess übereinstimmt. Bild 3 zeigt den Prozess eines Kreisprozesses mit kaltem Wasser als Wärmeträger. Die im Kondensator verflüssigt

einer Gasverdichteranlage zeigt, wo also der Wärmeträger während des ganzen Kreislaufes gasförmig bleibt. In beiden Diagrammen ist der Idealprozeß gestrichelt eingetragen. Man erkennt, daß beim Kalt-dampf die Abweichung vom Carnotprozeß nur gering ist, während die Gaswärmepumpe erheblich abweicht. Bei dieser wird man also nur ge-ringere Leistungsziffern erwarten dürfen.

Einem ganz rohen Anhalt über die Größenordnung der Leistungsziffer bei ausgeführten Anlagen zeigt die folgende Tabelle, in welcher auch die Heizleistung H pro kWh ($H = \epsilon \times 860$) eingetragen ist.

	ϵ	H
Eindampfanlage mit Wärmepumpe	14	12000
Kaltdampf-Wärmepumpe	4	3500
Luftwärmepumpe	3	2500

Man kann als Vergleich auch die elektrische Heizung anführen mit $\epsilon = 1$ und $H = 860$.

In Bild 5 ist als Beispiel für die starke Abhängigkeit der Leistungs-ziffer von der Temperaturspanne eine Eindampfanlage mit Brüdenver-dichter durchgerechnet. Als Temperaturdifferenz im Verdampfer ist zunächst 10°C angenommen, eine zweite Annahme, deren Werte in Klammern eingetragen sind, gilt für 20°C Temperaturdifferenz. Es ergeben sich für die beiden Fälle Leistungsziffern von 38 bzw. 20. Als praktisch erreichbar werden in der Literatur Werte von 14 - 20 angegeben.

C) Heizungskosten

Um einen Überblick über die Heizungskosten bei Wärmepumpenanlagen zu erhalten, trägt man zweckmäßig diese Heizungskosten in RM/100 cal über dem Strompreis auf und erhält, wie in Bild 5 gezeigt, für jeden ϵ -Wert eine Gerade ¹⁾. Diese Darstellung wird besonders gut für Ver-gleichszwecke geeignet, wenn man noch dazu den für Leuna gültigen Strompreis von etwa 1/2 Pfg./kWh und die Heizungskosten bei Heizung mit Dampf, errechnet auf Grund eines Federdruckdampfnetzpreises von etwa 2,50 RM/t einsetzt (Punkt A in Bild 5). Das Verhältnis von Dampf- zu Strompreis in Leuna würde einer Leistungsziffer von etwa $\epsilon = 5$ ent-sprechen, d.h. erst bei Wärmepumpenanlagen mit $\epsilon = 5$ sind die damit zu erreichenden Heizungskosten billiger als Dampfheizung.

Leistungsziffern, die wesentlich über $\epsilon = 5$ liegen werden mit Sicherheit nur bei Eindampfanlagen erreicht und auch hier ist die Wärmepumpe kaum überlegen. Da Eindampfanlagen meist zwei- und mehrstufig arbeiten, was mindestens einer Mäßigung des Dampfverbrauches bzw. des Dampfpreises entspricht, kann die Hälfte niedri-ger nach ¹⁾ wo kaum mehr ein Unterschied in den Heizungskosten gegen-über einer Wärmepumpenanlage mit $\epsilon = 14$ besteht.

¹⁾ Entnommen aus "Die Wärmepumpe" theoretische Grundlagen und An-wendungsgebiete H. Bühler Archiv für Wärmewirtschaft 1941 Heft 5

1) Vergleich mit Gegendruckkraftwerken in Bezug auf Ausnutzung der Kohlevorräte

Noch mehr als eine Untersuchung über Energiekosten bei Wärmepumpenanlagen interessiert für eine Energieplanung auf weite Sicht die Frage der bestmöglichen Ausnutzung des in der Kohle gegebenen Energievorrates.

Es wird im folgenden untersucht, welche Heizleistung aus 1000 Kohle-kg unter Zuhilfenahme einer Wärmepumpenanlage gewonnen werden kann und welche Heizleistung mit einem üblichen Gegendruckkraftwerk erreichbar ist. Die Untersuchung gilt für Wirtschaftsklämme, deren Stromversorgung hauptsächlich auf thermischer Grundlage steht (Kohle, Erdöl, Torf, Holz usw.) wo also jeder zusätzliche Strombedarf letzten Endes durch Kondensationsstrom gedeckt werden muß; die Schaltkennlinie sind in Bild 7 nebeneinander gezeichnet. Dabei sind insbesondere die Kraftwerke stark vereinfacht, die eingetragenen Wärmepumpen und Stromausbeuten stellen wichtige Punkte dar, die gegebenenfalls an vorliegende Verhältnisse anzupassen sind.

Bei der Wärmepumpenanlage wird im Kondensationskraftwerk aus 1000 Kohle-kg bei 0,27 kWh Strom eine Heizleistung von 250 z z z z erzeugt.

In Gegendruckkraftwerken unter den im Schema angegebenen Verhältnissen aus 1000 Kohle-kg bei 12 kWh Gegendruckstrom erzeugt aus der Gegendruckstromerzeugung eine Heizleistung von 100 z z z z. Durch die Gegendruckstromerzeugung von 12 kWh wird zusätzlich ein gleiches elektrische Leistung in einer Kohle-Kondensationskraftwerk eingeworfen wird und damit wird eine Heizleistung von 200 z z z z erzielt.

Bei 1000 Kohle-kg Heizleistung ergibt sich ein Reststrom von 30 kWh.

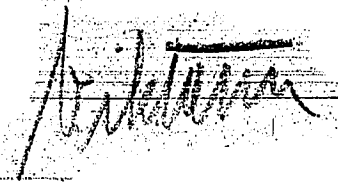
Die Heizleistung aus Kohle ohne Gewinnung elektrischer Energie ist im Vergleich mit der Heizleistung aus Kohle mit Gewinnung elektrischer Energie zu vergleichen. Dieser Vergleich kann nur im Bereich der Gebrauchsleistung in der Industrie gemacht werden, da im Bereich der Gebrauchsleistung die Heizleistung aus Kohle mit Gewinnung elektrischer Energie im Vergleich mit der Heizleistung aus Kohle ohne Gewinnung elektrischer Energie zu vergleichen ist. Infolge der hohen Heizleistung aus Kohle mit Gewinnung elektrischer Energie ist im Bereich der Gebrauchsleistung die Heizleistung aus Kohle mit Gewinnung elektrischer Energie im Vergleich mit der Heizleistung aus Kohle ohne Gewinnung elektrischer Energie zu vergleichen.

Vergleichen mit einer Heizleistung durch Kohleverfeuerung (unmittelbar oder mittelbar über ein Wasserdampf- oder Öl-Kraftwerk).

Es ist in diesem Zusammenhang noch von Interesse, den Reststrom aus der Gewinnung von Heizleistung aus Kohle ohne Gewinnung elektrischer Energie zu vergleichen. Dieser Reststrom kann im Bereich der Gebrauchsleistung in der Industrie genutzt werden, z.B. für die Heizung von Wohnhäusern, Schulen, Fabriken, verschiedenen Zweigen der Textilindustrie. Es kann hier angenommen werden, daß von dem Reststrom eine gewisse Menge für die Heizung von Wohnhäusern genutzt werden kann. Die Heizleistung aus Kohle ohne Gewinnung elektrischer Energie ist im Vergleich mit der Heizleistung aus Kohle mit Gewinnung elektrischer Energie zu vergleichen. Infolge der hohen Heizleistung aus Kohle mit Gewinnung elektrischer Energie ist im Bereich der Gebrauchsleistung die Heizleistung aus Kohle mit Gewinnung elektrischer Energie im Vergleich mit der Heizleistung aus Kohle ohne Gewinnung elektrischer Energie zu vergleichen.

B) Aufwand für Wartung und Reparatur von Wasserpumpen
zu den unter A) genannten Pumpen, die nur die Energie auf-
nehmen, treten noch zusätzlich die Kosten für Kapitaldienst,
Reparatur und Bedienung der Pumpen ein. Für den ein-
zelnen Wärmeverbraucher der in der Tabelle seines Strombedarf von
außen beruht, liegen hierbei die Dinge so, daß er sich entweder
für die Anschaffung einer Wasserpumpe oder für die Wasserpumpen-
anlage entscheiden muß. Für ihn ist die zusätzliche Leistung der
Wasserpumpenanlage mit der Differenz der Anschaffungs- bzw. Fertigung-
kosten zwischen Kessel und Wasserpumpe verbunden. Die dem ganzen
Wärmeabnehmer gehen, mit jedoch bei der Berechnung des Aufwandes
an Geld und Material für eine Wasserpumpenanlage nach der Anzahl
dieser Pumpen zu berücksichtigen sind.

a) Folgerungen
Die Wasserpumpe verbleibt im kleinen Teile im Besitz der Verbraucher
während die Wasserpumpenanlage im Besitz der Wärmeabnehmer verbleibt.
Der Wärmeabnehmer sucht jedoch nach Möglichkeit die Anschaffung von
Wasserpumpen zu vermeiden, da die Wasserpumpen im Besitz der Wärmeabnehmer
in der Regel die Anschaffungskosten der Wasserpumpen in Betracht kommen
sowie die Kosten für die Bedienung der Pumpen.



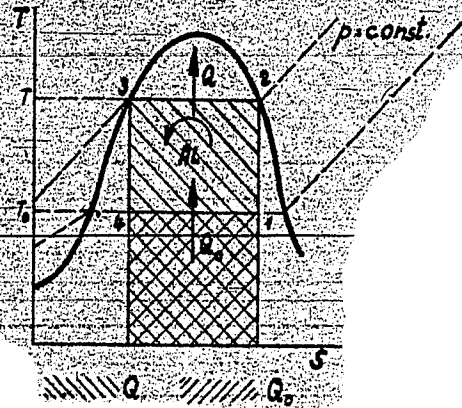
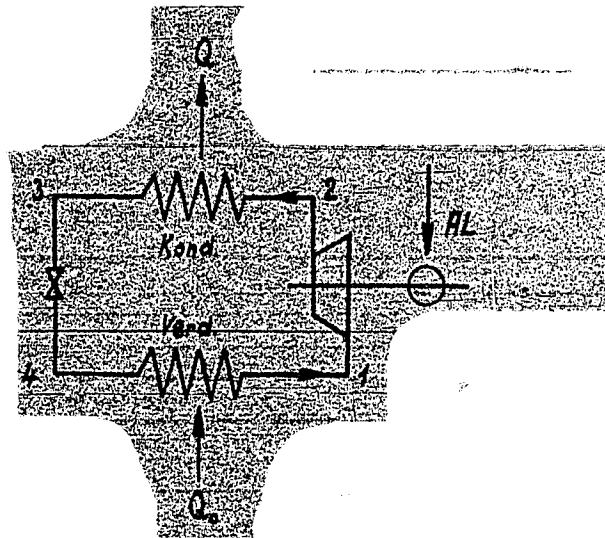


Bild 1

Schemata einer Wärmepumpen-Anlage

Bild 2

Idealer Carnot-Prozess

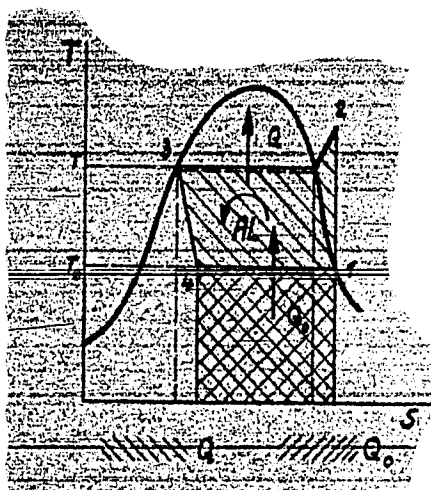


Bild 3

Kalldampf-Anlage

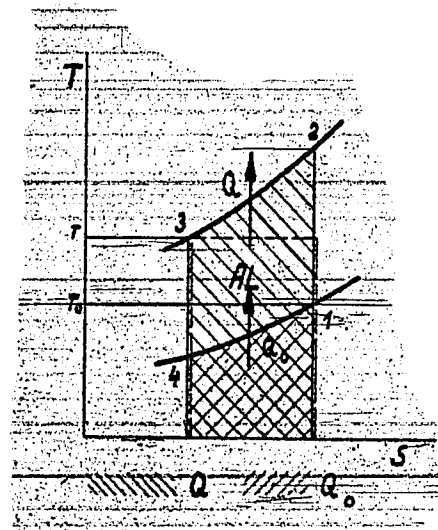


Bild 4

Kreisprozess bei einer Gasverdichter-Anlage

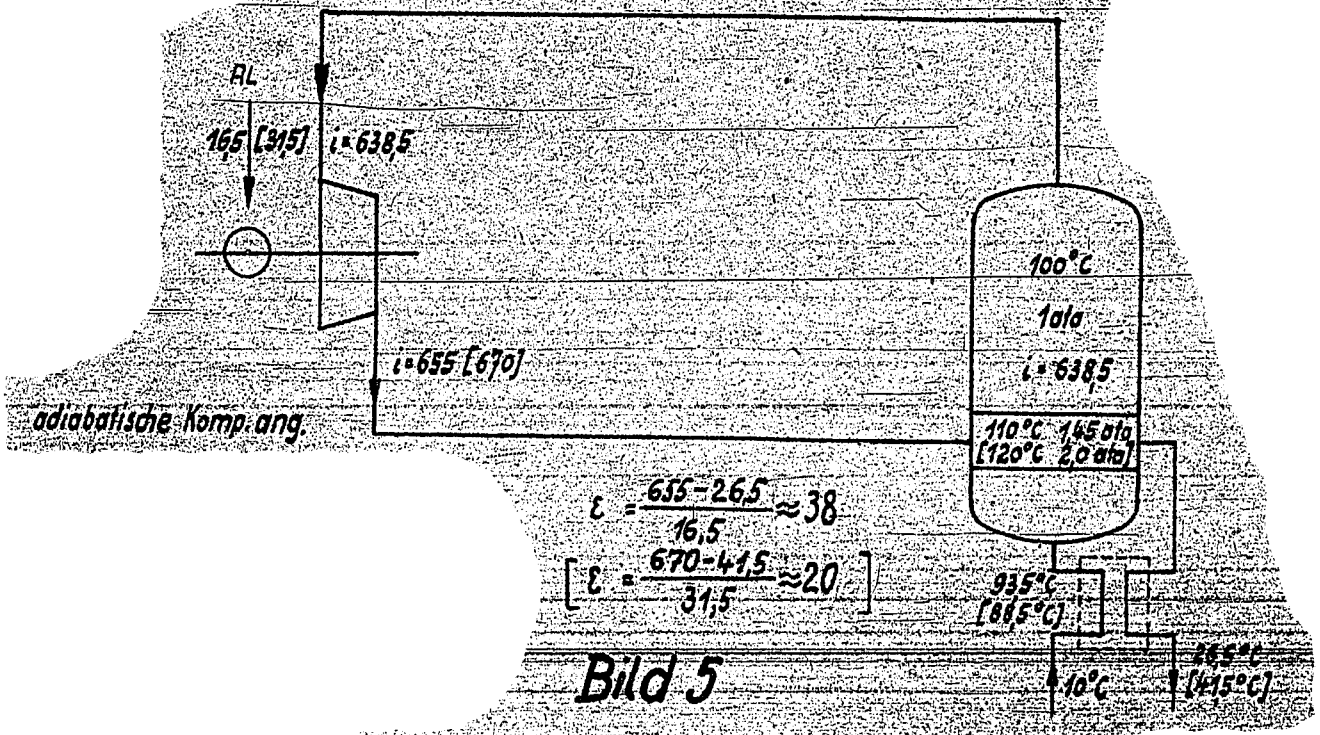


Bild 5

Eindampfanlage mit Wärmepumpe

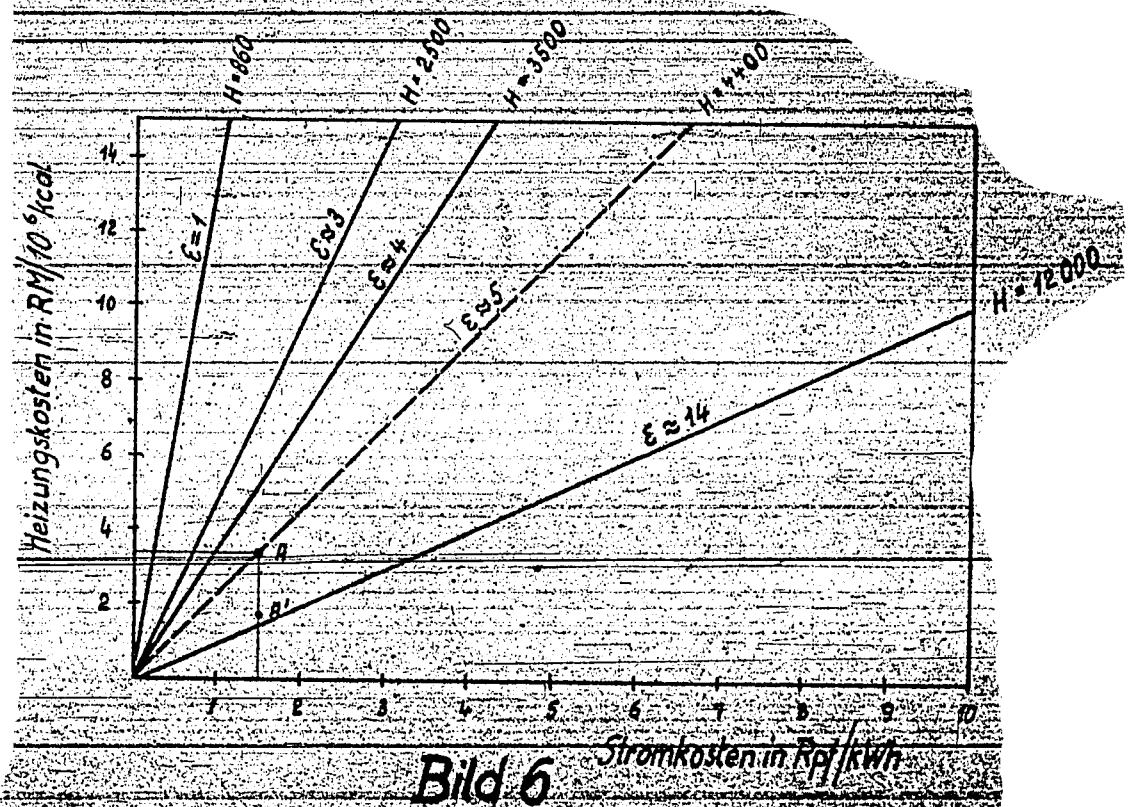


Bild 6

Heizungskosten bei Wärmepumpen in Abhängigkeit vom Strompreis

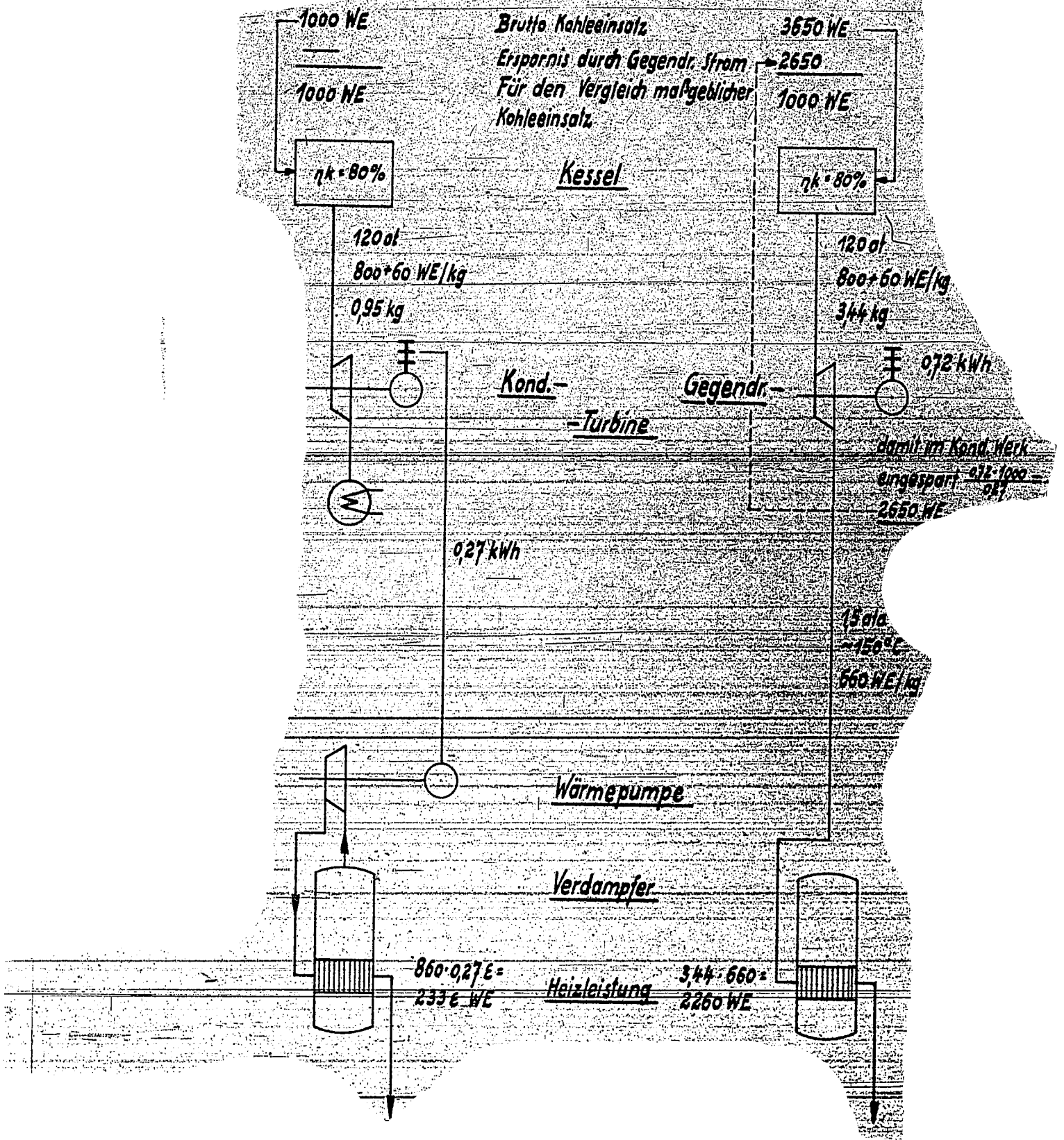


Bild 7

Vergleich von Wärmepumpenanlage u. Gegendruckkraftwerk

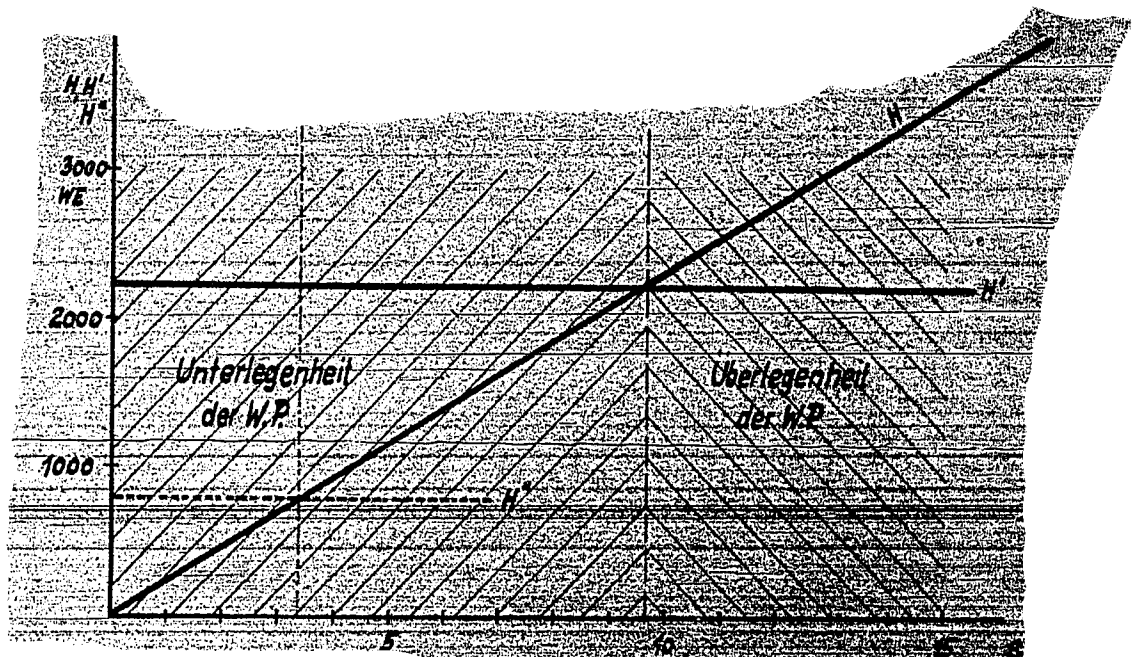


Bild 8

Heizleistung H'' gewonnen aus 1000 Kohle-WE über die Normspannung in Funktion von ϵ .

Heizleistung H' gewonnen aus 1000 Kohle-WE im Gegendruckbetrieb unter Berücksichtigung der Kohleinsparung durch Vorwärmstromerzeugung (infolge ersparter Kond. Strom- Erzeugung).

Heizleistung H gewonnen aus 1000 Kohle-WE bei direkter Verfeuerung oder mittelbar über Warmwasser- oder Niederdruckdampfheizung.

Dr. Orlicek
Ng 24 b

Leuna-Werke, den 15.3.1943

Über die Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpe
bei der Rektifikation.

inhaltsverzeichnis

- 1.) Allgemeine und theoretische Betrachtungen
- 2.) Trennung eines Gemisches von Propan-Propylen durch Rektifikation
- 3.) Zusammenfassung

Über die Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpe bei der Rektifikation

1. Allgemeine und theoretische Betrachtungen

Es ist bekannt, daß die Schwierigkeit der Stofftrennung durch Destillation bzw. Rektifikation und damit auch der Aufwand in apparativer Hinsicht und der Wärmebedarf um so größer wird, je näher die Siedepunkte der zu trennenden Stoffe beieinander liegen. Diese Erscheinung geht darauf zurück, daß wir gezwungen sind, mit abnehmender Siededifferenz der Komponenten (also dann wenn der Quotient aus den Dampfdrücken der Komponenten gegen 1 konvergiert) einen steigenden Bruchteil des Überkopfproduktes als Rücklauf in die Kolonne zurückzuführen. Je öfter aber die zu trennenden Stoffe den Kreislauf zwischen Verdampfer und Kondensator vollführen müssen, um so höher wird die für 1 kg des zu trennenden Gemisches in Verdampfer aufzuwendende Wärme; diese Verhältnisse veranschaulicht das anliegende Blatt Sk 250144. Es ist in diesem Diagramm der für die Gewinnung eines 99,1igen Kondensatorproduktes aus einem 50,1igen Gemisch erforderliche Mindestrücklauf in Abhängigkeit von dem mit α bezeichneten Quotienten aus den Dampfdrücken der reinen Komponenten aufgetragen. Betreibt man, um den apparativen Aufwand jeweils der Schwierigkeit der Trennung anzupassen, die Kolonne stets mit dem doppelten Mindestrücklauf und setzt man ¹⁾ für die zu trennenden Stoffe eine Verdampfungswärme von 80 kcal/kg ein, so sind je kg Gemisch die auf der rechten Ordinate aufgetragenen Wärmebeträge für die Trennung aufzuwenden. (In diesen Wärmebeträgen ist weder die Anwärmung des Gemisches auf die Kolonnentemperatur noch die Verlustwärme beinhaltet.)

Andererseits hat schon Gibbs gezeigt, daß die theoretische Mindestarbeit für die Trennung zweier Gase oder Dämpfe sich als die Arbeit ergibt, die notwendig ist, jede der Komponenten von ihrem Partialdruck im Gemisch isotherm und verlustfrei auf den Gesamtdruck des Systems zu komprimieren. ²⁾ Benennt man L_{min} die theoretische Mindestarbeit für die Trennung, P den Gesamtdruck, p_1 und p_2 die Partialdrücke und V das Volumen, so erhält man

$$L_{min} = \int_{p_1}^P V dp + \int_{p_2}^P V dp$$

und wenn das ideale Gasgesetz gilt nach der Integration

$$pV = RT; \quad L_{min} = V \left[p_1 \ln \frac{P}{p_1} + p_2 \ln \frac{P}{p_2} \right]$$

Man ersieht daraus ohne weiteres, daß die ideale Mindestarbeit für die Trennung von 1 Mol eines Gemisches bei gegebener Zustandsgleichung nur von der Konzentration der Komponenten der Mischung abhängt, nicht aber von der Differenz ihrer Kondensationspunkte oder anderen Eigenschaften. Zunächst scheint es also, daß ein prinzipieller Unterschied zwischen den Idealprozessen nach Gibbs und der technischen Trennung durch Rektifikation besteht, und in der Natur des Rektifikationsprozesses an sich begründet ist. ³⁾ Wie sich nun durch eine einfache thermodynamische Überlegung beweisen läßt, ist der erhebliche Anstieg des Wärmebedarfes aber nicht mit einer annähernd so großen Änderung des Energiebedarfes verknüpft. Diese scheinbare Diskrepanz ist dadurch bedingt, daß wir einmal den Wärme-

+) bei der Rektifikation

- 1.) wie es etwa leichten Kohlenwasserstoffen entsprechen würde,
- 2.) Gibbs hat diesen Idealprozess durch das bekannte und sehr anschauliche Gedankensexperiment erläutert, bei dem die Kompression unter Verwendung von Kolben ausgeführt sind, die jeweils nur für den einen der Stoffe durchlässig (semipermeabel) sind.
- 3.) Außer Betracht bleiben soll hier eine gewisse Abweichung im Energiebedarf, die von vornherein erwartet werden muß, da jeder tatsächlich verlaufende Prozess mehr oder weniger irreversibel ist.

bedarf und einmal den Energiebedarf betrachtet haben.

Es kann aber nicht etwa nach dem 1. Hauptsatz die der Wärme äquivalente Energie berechnet werden, denn bei der Rektifikation wird die aufgewendete Wärme (die sich beispielsweise im verbrauchten Heißdampf ausdrückt) ja nicht "verbraucht" sondern nur in ihrem Niveau von der Temperatur des Verdampfers auf die des Kondensators abgesenkt. Unter Energiebedarf ist vielmehr die (mechanische) Energie zu verstehen, die nach dem 2. Hauptsatz dazu notwendig ist, die Degradation der Wärme aufzuheben, d.h. die im Kondensator verfügbare Wärme etwa unter Benutzung einer Wärmepumpe wieder auf das Niveau des Verdampfers zu heben.

Es ist nun eine eigentümliche und für den vorliegenden Fall besonders wichtige Eigenschaft der Wärmepumpe, daß ihr Wirkungsgrad mit fallender Temperaturdifferenz (hier also mit kleiner werdender Differenz der Siedepunkte der zu trennenden Komponenten) erheblich ansteigt. Der Wirkungsgrad ist dabei definiert als der Quotient aus der geförderten Wärme geteilt durch die aufgewandte mechanische Arbeit. Dieser Quotient kann bei hinreichend kleiner Temperaturdifferenz wesentlich über 1 anwachsen und muß, wie ohne einfache Überlegung ergibt, für die Temperaturdifferenz Null sogar den Wert Unendlich annehmen. (Vergleiche Kurvenblatt 250145) Bei der Rektifikation ist nun gerade dann, wenn das Rücklaufverhältnis sehr groß gewählt werden muß, also auch der Wärmebedarf sehr groß ist, die Temperaturdifferenz zwischen Verdampfer und Kondensator relativ klein, daher bleibt in diesem Bereich des großen Wirkungsgrades der Wärmepumpe aber die für den Transport der Wärme notwendige Energie annähernd konstant.

Wir gelangen also zu dem etwas unerwarteten Ergebnis, daß die für die Rektifikation aufzuwendende Wärmemenge, die mit fallender Differenz im Siedepunkt der Komponenten beträchtlich anwächst, durch einen annähernd konstant bleibenden (mechanischen) Energiebetrag ersetzt werden kann.

Bevor auf die technische Seite dieser Tatsache eingegangen wird, soll ihre Richtigkeit durch quantitative Betrachtungen anhand einiger Beispiele bewiesen werden. 4) Für die Beispiele wurden als Stoffe bzw. Stoffpaare aliphatische Kohlenwasserstoffe gewählt, weil diese Stoffe technisch interessant und weil auch ihre physikalischen Eigenschaften literaturbekannt sind. Innerhalb einer homologen Reihe konnten ferner am leichtesten Stoffpaare gefunden werden, die sich im wesentlichen nur in Bezug auf die Differenz des Siedepunktes ihrer Komponenten unterscheiden.

Zunächst wurde für einige binäre Gemische der Zusammenhang zwischen Siededifferenz und Quotienten aus der Dampfspannung der reinen Komponenten aufgesucht. Diese Werte sind auf Blatt Sk 250143 graphisch und tabellarisch dargestellt.

Aus diesen Angaben konnte, zusammen mit den auf Blatt Sk 250144 dargestellten Werten der gesuchte Zusammenhang zwischen der für die Trennung eines binären Gemisches durch Rektifikation notwendigen Wärme und der Differenz aus den Siedepunkten der Komponenten ermittelt werden. Diesen Zusammenhang Siededifferenz-Wärmebedarf zeigt Kurve I des Blattes Sk 250146. Setzt man nun voraus, daß der adiabatische Wirkungsgrad des Kompressors, der als Wärmepumpe verwendet wird,

4.) Es wird darauf verzichtet, diesen Gedankengang allgemein thermodynamisch und formelmäßig zu beweisen, da einem solchen Beweis, selbst bei weitgehender Vereinfachung der Annahmen, wobei deren Zulässigkeit selbst erst wieder zu beweisen wäre, die Anschaulichkeit mangelt und sich der Sachverhalt klarer darstellen läßt, wenn er anhand von Beispielen erläutert wird.

0,7 ist und daß ferner die Temperaturdifferenz über die die Wärmepumpe zu fördern hat um 5°C größer ist als die Differenz zwischen Kondensator- und Verdampfer-temperatur, dann kann man aus den Angaben des Blattes Sk 250145 und der Kurve I (Sk 250146) den Bedarf an mechanischer Energie für die unter Benützung einer Wärmepumpe ausgeführte Rektifikation berechnen. Diese Berechnung wurde für den Einsatz eines 50%igen Gemisches und die Gewinnung 99%iger Produkte im Sumpf bzw. Kopf der Kolonne und für eine Siededifferenz der Komponenten von $5-100^{\circ}\text{C}$ ausgeführt. Das Ergebnis stellt Kurve II auf Blatt Sk 250146 dar. Wie man sieht, nimmt der Energiebedarf mit fallender Siededifferenz nur wenig zu, 5) entspricht also durchaus der aus dem Gibbschen Idealprozess abgeleiteten Forderung.

Aus dem Verlauf der Kurven kann man ersehen, daß im Gebiet kleiner Siededifferenzen die Wärmepumpe wegen ihres kleinen Energiebedarfes der Heizung mit Dampf sehr stark überlegen ist. Wie weiter unten gezeigt wird, besteht diese Überlegenheit auch noch bei extrem niedrigen Preisen für die kalorische Energie also für den Dampf; unter Verhältnissen also bei denen sonst die Anwendbarkeit von Wärmepumpen nicht mehr zweckmäßig ist.

Würde man die Maßstäbe der Energie- und Anlagekosten auf der Ordinate des Blattes Sk 250146 so wählen, daß sie sich zueinander wie die Preise für Strom und Heizdampf verhalten, dann könnte man aus der Lage des Schnittpunktes der Kurven I und II die Siededifferenz ermitteln, unter der die Rektifikation mit Verwendung der Wärmepumpe günstiger ist. Bei dieser Schätzung blieben allerdings die Anlagekosten unberücksichtigt, die bei einer Anlage mit Wärmepumpe naturgemäß höher liegen. Der Energiebedarf hängt auch noch, allerdings in geringerem Maße, von den thermodynamischen Eigenschaften der zu trennenden Stoffe ab, (Abweichung der effektiven Kompressionsarbeit von der idealen) und schließlich wäre noch zugunsten der Wärmepumpe zu berücksichtigen, daß kein Kühlwasser verbraucht wird, sodaß man hinsichtlich der Kondensatortemperatur an keine untere Grenze gebunden ist und den Kolonnendruck frei wählen kann.

Um zu zeigen, wie sich diese teilweise gegenläufigen Einflüsse auf die Kosten für die Stofftrennung auswirken, wird im anschließenden 2. Teil des Berichtes eine mit Wärmepumpe arbeitende Rektifikationsanlage, energie- und anlagekostenmäßig geschätzt und mit einer Anlage verglichen, bei der die Trennarbeit durch kalorische Energie (Dampfheizung) gedeckt wird. Um die Überlegenheit der Wärmepumpe eindringlich vor Augen zu führen, wurde die Rechnung für die Trennung von Propan-Propylen durchgeführt, den Fall einer relativ schwierigen Trennung also, die bereits der Grenze nahe kommt, die der technischen Rektifikation von apparativer Seite gezogen ist.

II. Trennung eines Gemisches von Propan-Propylen durch Rektifikation

Die Anlage wurde für die Gewinnung von 3 atuto 99,5%iges Propylen aus einem 35%igen Propylen-Propan-Gemisch ausgelegt. Die Reinheit des Propans wurde ebenfalls mit 99,5% vorgesehen. Bei einem Rücklaufverhältnis von 1:30 war für die Trennung eine theoretische Bodenzahl von 43 in der Abtriebskule und 50 in der Verstärkersäule notwendig. (Siehe Berechnung im Thiele Mc Cabe-Diagramm Sk 250147) Vorgesehen wurden Kolonnen mit 130 Doppelsieb Böden (entsprechend einem Bodenwirkungsgrad von 71,5 %); der Bodenabstand wurde mit 200 mm festgelegt.

5.) Die noch vorhandene relativ kleine Abhängigkeit geht zum Teil darauf zurück, daß die effektive Temperaturdifferenz zwischen Verdampfer und Kondensator um 5°C größer angenommen wurde als die Siededifferenz ist (dieser Einfluß fällt mit kleiner werdender Siededifferenz mehr ins Gewicht), zum Teil ist die Abhängigkeit durch den von der Kettenlänge verursachten Gang der physikalischen Eigenschaften der Kohlenwasserstoffe bedingt.

Bei der Bestimmung des Kolonnenquerschnittes wurde die zulässige Dampfgeschwindigkeit nach der üblichen Formel

$$v_{\text{zul.}} = k \sqrt{\frac{T \cdot d}{M \cdot p}} \text{ cm/sec}$$

berechnet, wobei für die Konstante der Wert 30 eingesetzt wurde. Die maximale Flüssigkeitsbelastung der Kolonnen wurde mit $30 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ festgelegt.

Der Preis der Destillationskolonnen, Verdampfer und Wärmetauscher wurde über das Gewicht errechnet, die Kompressoren und Motoren über die Leistung, wobei feste Zuschläge für Rohrleitungen, Meß- und Regleinrichtungen, Isolierung, Podeste, Fundament, Gebäude, Montage und Unvorhergesehenes hinzugerechnet wurden.

Bei der zahlenmäßigen Berechnung der Kosten wurde angenommen, daß elektrische Energie 1,2 Rpfg., Kühlwasser 1 Rpfg./cbm und Niederdruckdampf 2,80 RM/t kosten. Die Nutzwärme des Dampfes wurde einheitlich mit 500 WE/kg in Rechnung gesetzt. Es wurde ferner angenommen, daß die Anlage mit 10% amortisiert wird, während für Reparaturkosten 3% des Anlagekapitals eingesetzt wurden.

Die bei der Rechnung benutzten physikalischen Daten von Propan-Propylen sind in der nachstehenden Tabelle I zusammengefaßt.

Betr. Druck ata	Temperaturen °C					Verdampf- wärme		Kondensat.- wärme WE/kg			Spez. Gewicht d. Flüssigkeit am Siedepunkt		Spez. Volumen d. Flüssigkeit am Siedepunkt	
	in Kolonne		im Verdampfer bei $\Delta t =$			Kopf	Sumpf	2°	5°	10°	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈
	Kopf	Sumpf	2°	5°	10°									
3	-19	-14	-12	-9	-4	96	95	94	93	91,5	0,57	0,54	1,75	1,84
7,5	+12	+16	+18	+21	+26	86	85	84	83	81	0,53	0,51	1,81	1,97
20	48,5	56	58	61	66	70	66	65	62,5	59	0,465	0,44	2,15	2,28
30	68	76	78	81	86	57	50	48	45	39	0,42	0,39	2,37	2,54

Molvolumen von C₃H₆ = 21,96 Nm³

" " " C₃H₈ = 21,82 Nm³

Für die Konstruktion der Gleichgewichtskurve im Thiele-Mo-Cabe-Diagramm wurden experimentelle und rechnerische Werte benutzt. 6)

Beschreibung der Trennanlage mit Wärmepumpe

Der schematische Aufbau der Anlage geht aus dem Schema Sk 250148 hervor.

Die Arbeitsweise ist folgende: Die den Kopf der Kolonne verlassenden Dämpfe werden durch einen Kompressor angesaugt und etwa im Verhältnis 1:1,30 komprimiert. Dadurch

6.) Die Lage der Gleichgewichtskurve ist dabei durch Angabe des Zahlenwertes des Quotienten aus den Fugazitäten α definiert, für den folgende Werte gefunden wurden:

Nach dem Dampfdruck-Diagramm, Zeichnung M 4580-1, (ohne Berücksichtigung des Unterschiedes zwischen Partialdruck und Fugazität) $\alpha = 1,177$

aus den Fugazitäten nach amerikanischen Unterlagen $\alpha = 1,15$

nach Laborversuchen von Herrn Dr. Wetzel I (analytisches Labor) $\alpha = 1,2$

nach Laborversuchen von Herrn Dr. Novotny (Hauptlabor) $\alpha = 1,16$.

Die Versuche wurden bei einer Konzentration von etwa 50 Mol.% und bei einem Druck von etwa 10 Atmosphären durchgeführt. Für die Berechnung wurde der Quotient α mit 1,15 eingesetzt.

wird der Kondensationspunkt des Kopfproduktes soweit heraufgesetzt, daß er über dem Siedepunkt des Sumpfproduktes liegt, so daß die Kondensationswärme des Kopfproduktes im Wärmeaustauscher auf das Sumpfprodukt übertragen werden kann, das dadurch verdampft. Das verflüssigte, aus dem Austauscher abgezogene Kopfprodukt wird zum Teil entspannt und als Rücklauf auf die Kolonne gegeben. Bei der Entspannung kühlt sich die Flüssigkeit auf die Kopftemperatur der Kolonne ab und ein der fühlbaren Wärme entsprechender Teil der Flüssigkeit verdampft und wird neuerlich vom Kompressor angesaugt. Die Wärmeverluste werden von einer zusätzlichen Heizung gedeckt. Der Wärmeverbrauch ist hierfür verschwindend klein.

Um den wirtschaftlichsten Betriebspunkt der Rektifikation mit Wärmepumpe festzustellen, wurde die Anlage für folgende Betriebsbedingungen berechnet:

- 1.) Temperaturdifferenz im Austauscher 2, 5 und 10°C,
- 2.) Kolonnendruck 3, 7,5, 20 und 30 ata.

Die Heizflächen des Wärmeaustauschers wurden unter Zugrundelegung einer Wärmedurchgangszahl von 600 $\text{W/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ berechnet und 20 % Sicherheit zugeschlagen. Für die einzelnen Betriebsverhältnisse ergeben sich die in Tabelle II zusammengefaßten Werte.

Tabelle II

Temperaturdifferenz im Austauscher	$\Delta t = 2^\circ\text{C}$			
Betriebsdruck in ata		7,5	20	30
Aufzuwendende Verdampferwärme	8920000	8000000	6500000	5300000
Zusatzwärme für Abstrahlung			100000	120000
Heizflächen für				
Austauscher	7440	6670	5420	4410
Zusatz			2	2
eff. Ansaugvolumen des Gebläses	15600	7000	2960	2090
Kompress. Verhältnis	1,3	1,265	1,225	1,21
Leistungsaufnahme in kW	647	665	825	1019

Temperaturdifferenz im Austauscher	$\Delta t = 5^\circ\text{C}$			
Betriebsdruck in ata	3	7,5	20	30
Aufzuwendende Verdampferwärme	8920000	8000000	6500000	5300000
Zusatzwärme für Abstrahlung			100000	120000
Heizflächen für				
Austauscher	2970	2670	2165	1765
Zusatz			2	2
eff. Ansaugvolumen des Gebläses	15600	7000	2960	2090
Kompress. Verhältnis	1,43	1,36	1,30	1,27
Leistungsaufnahme in kW	733	875	1078	1315

Temperaturdifferenz im Austauscher	$\Delta t = 10^\circ \text{C}$			
Betriebsdruck in ata	3	7,5	20	30
Aufzuwendende Verdampferwärme	8920000	8000000	6500000	5300000
Zusatzwärme für Abstrahlung			100000	120000
Heizflächen für Austauscher	1485	1333	1080	885
Zusatz			2	2
eff. Ansaugvolumen des Gebläses	15600	7000	2960	2090
Kompress. Verhältnis	1,69	1,55	1,44	1,39
Leistungsaufnahme in kW	1370	1610	1875	2260

Bei der Berechnung der Leistungsaufnahme der Wärmepumpe wurde davon ausgegangen, daß normale listenmäßige Turbo-Kompressoren mit 3000 U/min. verwendet werden. Dadurch ergab sich zum Teil eine hohe Stufenzahl und damit ein etwas niedrigerer Wirkungsgrad. Würde man die Gebläse für die geforderte Leistung gesondert auslegen, dann wäre es möglich, in allen Fällen mit 2 Stufen auszukommen. Für den Antrieb der Gebläse wurden Hochspannungsmotoren vorgesehen. Wäre es bei der Erstellung der Anlage möglich, Gegendruckdampfturbinen zu verwenden, so könnte dadurch eine beträchtliche Verbesserung erzielt werden, da einerseits beliebige Drehzahlen ohne Zwischenschaltung eines Getriebes erreichbar wären und andererseits die Energiekosten gesenkt würden. Für die bei den verschiedenen Drehzahlen notwendigen Kolonnenquerschnitte ergeben sich die in Tabelle III zusammengefaßten Werte.

Tabelle III

Betriebsdruck in ata		3	7,5	20	30
Dampfgeschwindigkeit in m/sek.	am Kopf	0,32	0,21	0,13	0,10
	am Sumpf	0,31	0,20	0,12	0,095
Flüssigkeitsmenge in m ³ /h	am Kopf	158	170	193,5	214
	am Einlauf	178	190	219	244
	am Sumpf	185	197	237	287
Kolonnenquerschnitt aus der Dampfbelastung in m ²	am Kopf	13,52	9,25	6,34	5,01
	am Sumpf	14,00	9,72	6,85	6,12
Kolonnenquerschnitt aus der Flüssigkeitsbelastung in m ²	am Kopf	5,27	5,66	6,45	7,13
	am Einlauf	5,93	6,33	7,30	8,13
	am Sumpf	6,17	6,57	7,90	9,58
Durchmesser der Verstärkersäule in mm		3x2400	2x2400	2x2000	2x2200
Durchmesser der Abtriebsäule in mm		3x2500	2x2500	2x2200	2x2500

Die Leistung für die Einspritz- und Rücklaufpumpen wurde mit folgenden Werten eingesetzt:

3	ata Betriebsdruck	22 kW,
7,5	"	24 kW,
22	"	30 kW,
30	"	35 kW.

Die Anlage- und Betriebskosten können der anliegenden Zusammenstellung Tabelle V entnommen werden. Auf Kurvenblatt Sk 250149 werden ferner die Rektifikationskosten für die Gewinnung 1 t Propylen in Abhängigkeit vom Betriebsdruck und der Temperaturdifferenz im Austauscher aufgetragen. Man ersieht aus den Kurven, daß der gün-

stigste Betriebsdruck etwa 9 ata beträgt. Für diesen Druck sind auf dem gleichen Blatt die Rektifikationskosten in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz im Austauscher aufgetragen. Der wirtschaftlichste Betriebsdruck bei 9 ata Kolonnendruck liegt bei 5° Temperaturdifferenz im Austauscher. Unter diesen Verhältnissen betragen die Kosten für die Gewinnung von 1 t Propylen RM 8,20.

Vergleich mit einer Anlage für die Rektifikation unter Verwendung von Dampf als Heizmittel.

Die Unterlagen der Kostenberechnung waren die gleichen wie bei der Berechnung der Anlage mit Wärmepumpe. Die Heizflächen wurden mit einer Wärmedurchgangszahl von $1000 \text{ WE/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$, die Kühlflächen mit einer solchen von $400 \text{ WE/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ errechnet. Auf die Flächen wurde ein Sicherheitszuschlag von 20 % gemacht. Für die Rektifikation wurden die Verhältnisse bei 20 und 30 Atmosphären Kolonnendruck betrachtet. (Vergleiche Tabelle IV.)

Tabelle IV

Betr. Druck ata	Verd.wärme WE/h	Heizfläche m ²	Kondenswärme WE/h	Kühlfläche m ²	Strom kW
20	6500000	110	5800000	750	30
30	5300000	130	4180000	290	35

Auf niedrigere Drücke konnte der Vergleich nicht errechnet werden, weil entsprechend tiefere Kondensatortemperaturen nicht mit Kühlwasser erreichbar sind. Auch das Ergebnis dieser Berechnung ist auf Tabelle V zusammengestellt.

Die Kosten für die Abtrennung 1 t Propylen betragen bei 20 ata RM 16,27, 7)
bei 30 ata RM 15,82, 7)

Zusammenfassung

Es wird die Anwendbarkeit der Wärmepumpe für die Durchführung der Stofftrennung durch Rektifikation eingehend diskutiert und auf Grund thermodynamischer Erwägungen deren wirtschaftliche Grenze ermittelt. Es zeigt sich, daß die Trennung von Stoffen mit kleiner Differenz im Siedepunkt unter Verwendung einer Wärmepumpe besonders wirtschaftlich durchgeführt werden kann. Neben dem kleinen Energieverbrauch ist es ein besonderer Vorteil, daß dabei kein Bedarf an Kühlwasser auftritt.

Anhand eines Beispiels, nämlich der Abtrennung von Propylen aus einem Propan-Propylen-Gemisch werden die Anlage- und Energiekosten einer Trennanlage mit Wärmepumpe mit den Kosten verglichen, die für die Rektifikation bei Beheizung mit Dampf aufzuwenden sind. In einer Trennanlage mit Wärmepumpe stellen sich die Kosten zur Gewinnung von einer t Propylen auf RM 8,20, während bei der Beheizung der Rektifikationskolonne mit Dampf die Abtrennung von 1 t Propylen RM 16,-- bis RM 18,-- kostet.

M. Unterwiesing

7) Wie Betriebsergebnisse aus jüngster Zeit zeigen, sinkt die Belastbarkeit von Rektifikationskolonnen bei derartig hohen Drücken vielfach unter die formalmäßig zu erwartende Belastbarkeit. Durch diese Erscheinung würden die Kosten bei den hohen Betriebsdrücken erheblich höher sein, als oben angegeben. Das Gesagte gilt naturgemäß auch für die Rektifikation unter Verwendung einer Wärmepumpe.

23759

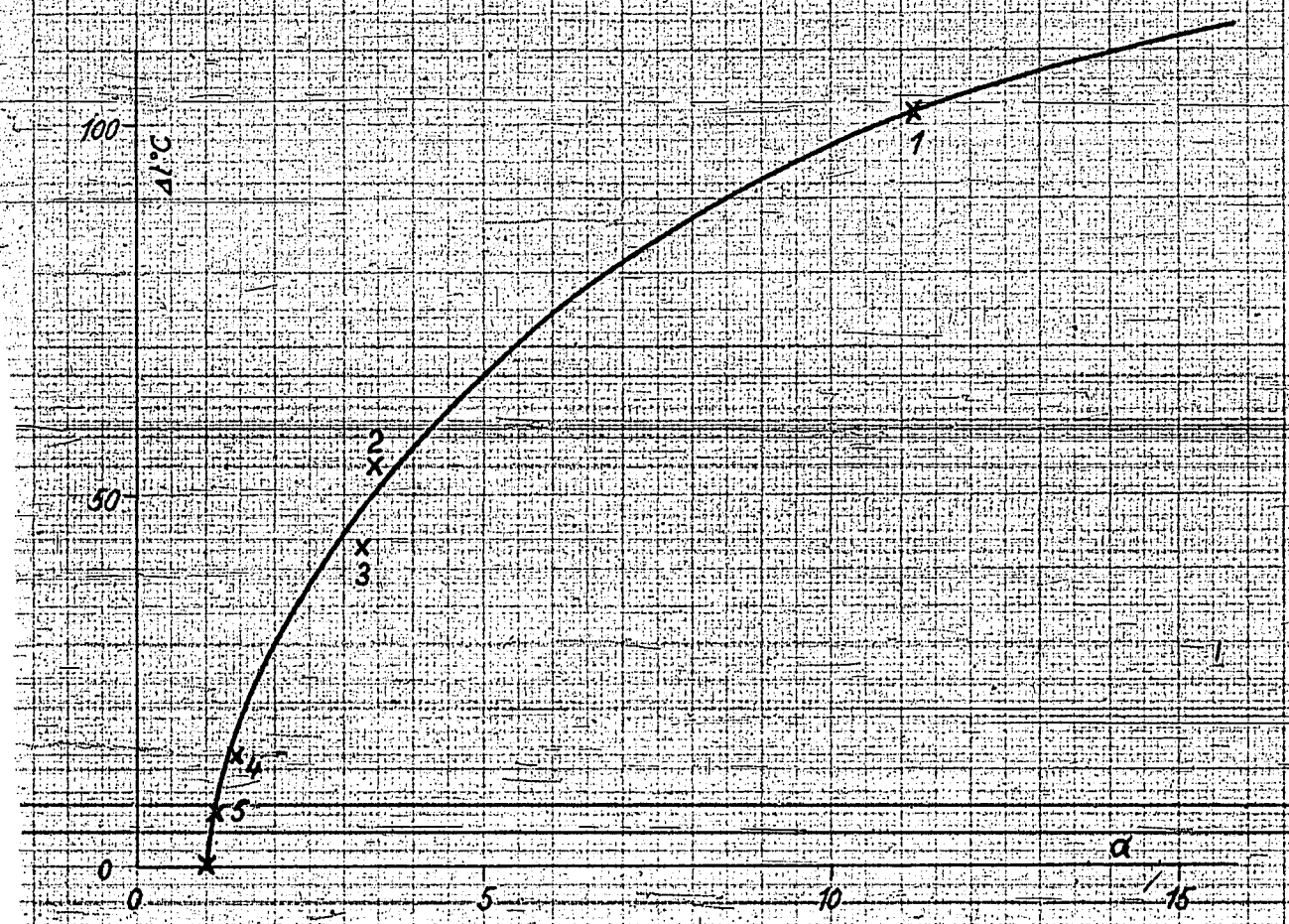
Zusammenstellung der Kosten für etd. 3000 kg Destillat

Tabelle 7

		Anlagekosten RM					Jährliche Betriebskosten RM					Destillationskosten je t C7H8 RM	
Art im Ausst.	Detr. Pr. ata	1 Kolonnen	2 Ausst. + Zins. Heiz.	3 Wärmepumpe	1-3 Gesamt	4 Amort. + Rep.	5 Strom	6 Dampf	4-6 Gesamt	Destillationskosten je t	7	4-7 Gesamt	Destillationskosten je t C7H8 R
Destillation	3	990 000	310 000	61 000	1361 000	176 930	64 224	-	241 154	10,05			
	7,5	700 000	285 000	53 000	1038 000	134 940	66 144	-	201 084	8,38			
	20	700 000	270 000	58 800	988 800	128 544	82 080	20 600	231 224	9,64			
	30	780 000	174 000	67 000	1021 000	132 730	101 184	37 632	271 546	11,31			
Wärmepumpe	3	990 000	140 000	64 000	1174 000	155 220	72 480	-	227 700	9,49			
	7,5	700 000	130 000	64 000	894 000	116 220	86 304	-	202 524	8,44			
	20	700 000	97 500	68 000	865 500	112 515	106 368	31 360	250 243	10,43			
	30	780 000	77 500	77 000	934 500	121 485	129 600	50 176	301 261	12,55			
	3	990 000	78 000	89 000	1157 000	150 410	133 632	-	284 042	11,84			
	7,5	700 000	75 000	91 000	866 000	112 580	156 864	-	269 444	11,22			
	20	700 000	52 000	97 000	849 000	110 370	182 880	45 696	338 946	14,11			
	30	780 000	37 000	105 400	922 400	119 912	220 320	52 864	393 096	16,38			
		Anlagekosten RM					Jährliche Betriebskosten					Destillationskosten je t C7H8 R	
Art im Ausst.	Detr. Pr. ata	1 Kolonnen	2 Verdampfer	3 Kondensator	1-3 Gesamt	4 Amort. + Rep.	5 Dampf	6 Strom	4-7 Gesamt	Destillationskosten je t C7H8 R	7	4-7 Gesamt	Destillationskosten je t C7H8 R
	20	700 000	11 000	41 500	752 500	97 825	291 230	2 860	491 915	18,27		498 305	18,27
	30	780 000	12 500	19 000	811 500	105 495	237 440	3 353	379 735	15,82		379 735	15,82

Übliche Destillation (Boizität) (Ndr. Dampf)

Temperaturdifferenz zwisch Kondensator und Verdampfer bei der Reklifikation von KW bei 45°C Kondensatortemperatur.



Nr.	Stoff	t_u °C	t_o °C	Δt °C	p_1	p_2	$\alpha = \frac{p_1}{p_2}$
1	C_3/C_5	45	147,0	102,0	15,7	1,4	11,20
2	C_3/C_4	45	99,0	54,0	15,7	4,6	3,42
3	C_4/C_5	45	88,0	43,0	4,6	1,4	3,28
4	C_4/nC_4	45	60,0	15,0	6,8	4,6	1,48
5	$C_3=C_3$	45	52,5	7,5	18,5	15,7	1,18

1117

23.43 2

4. März 1948

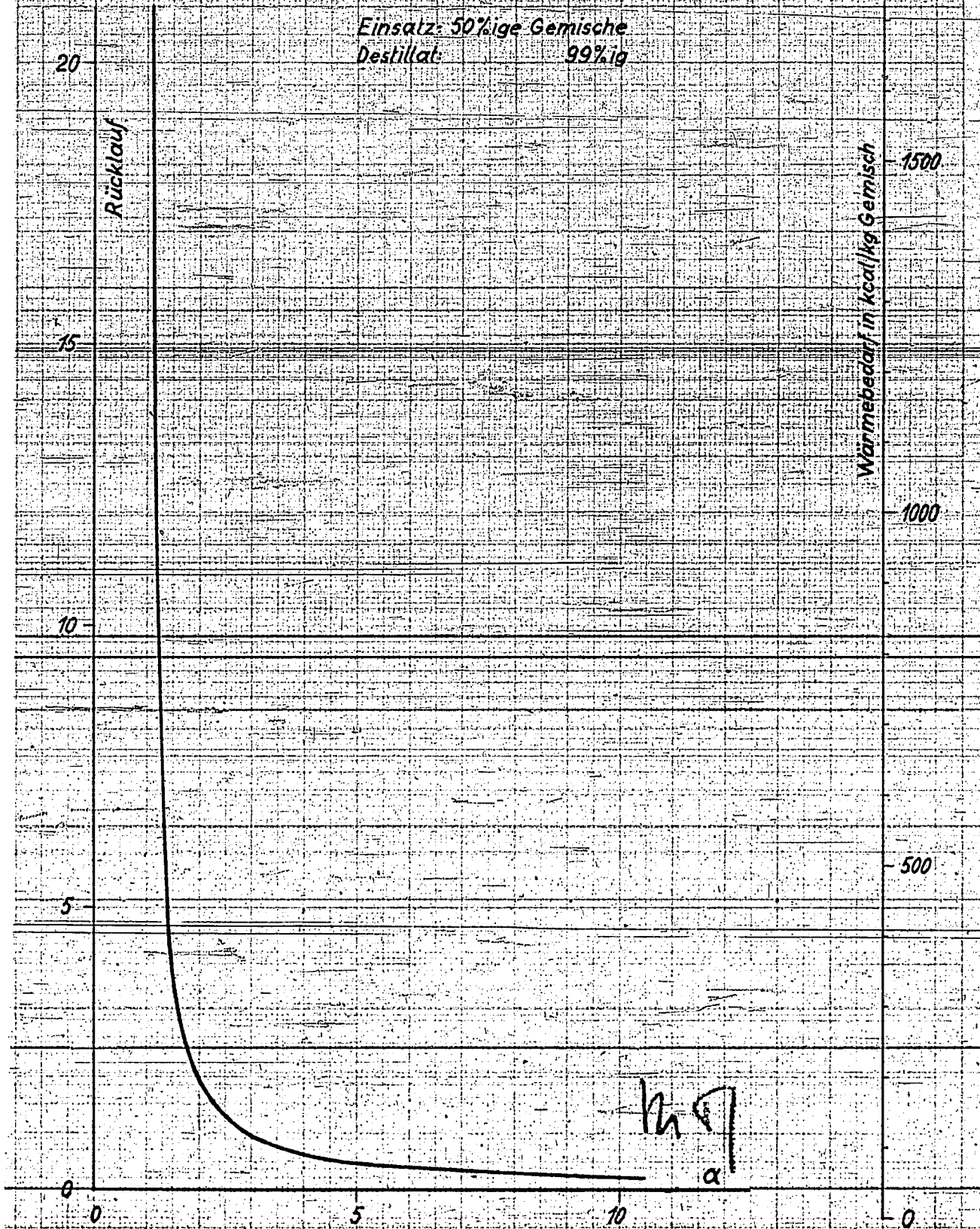
Ammoniakwerk Mersching
Gesellschaft für chem. Industrie
Leuna-Werke (Karl-Ludwig-Str.)
390 44 (2114227)

SK.250143

Mindestrücklauf und Wärmebedarf für die Trennung binärer Gemische

abhängig vom Quotienten der Dampfdrücke $\alpha = \frac{P_1}{P_2}$

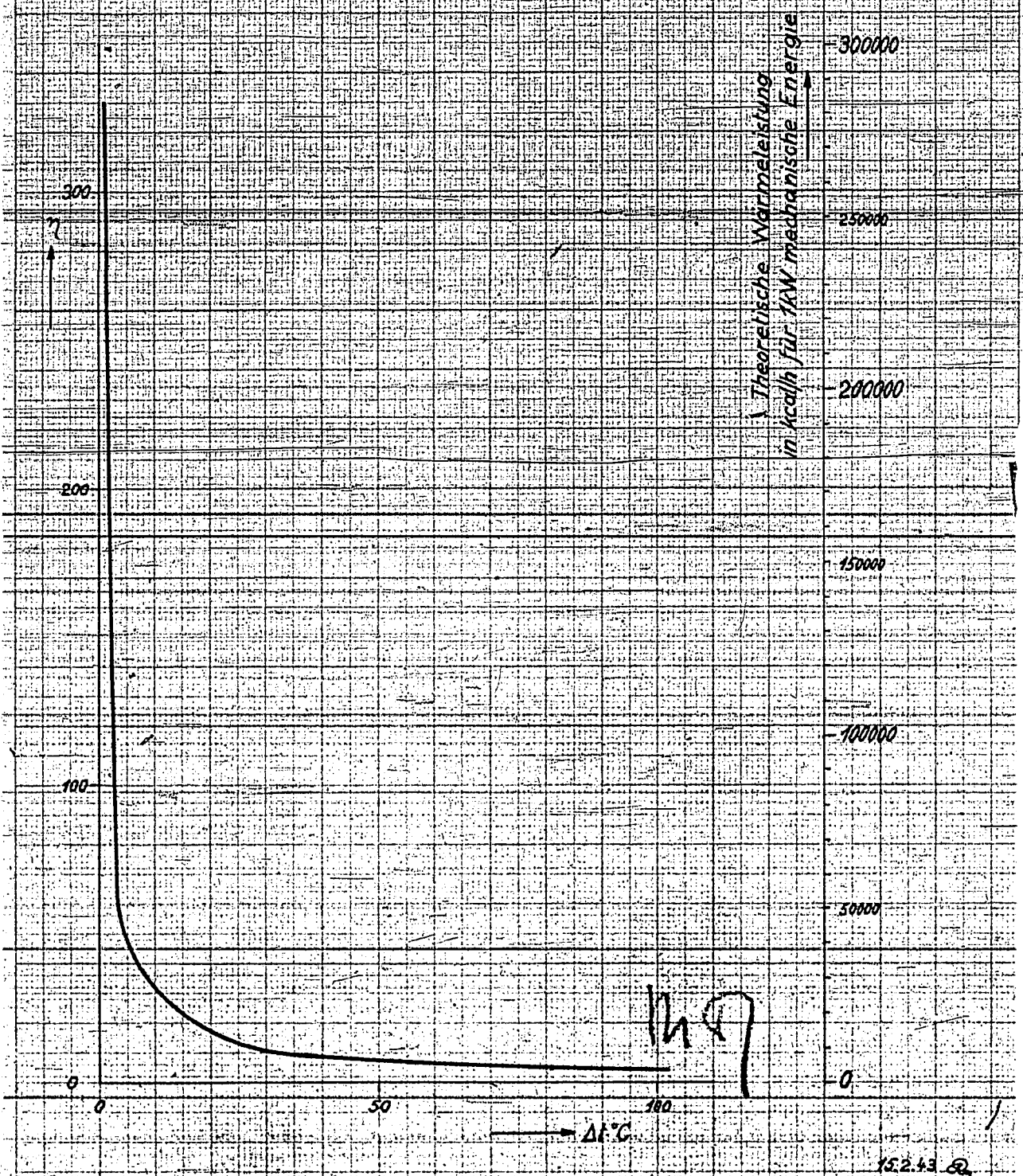
Einsatz: 50%ige Gemische
Destillat: 99%ig



Handwritten signature and the Greek letter α .

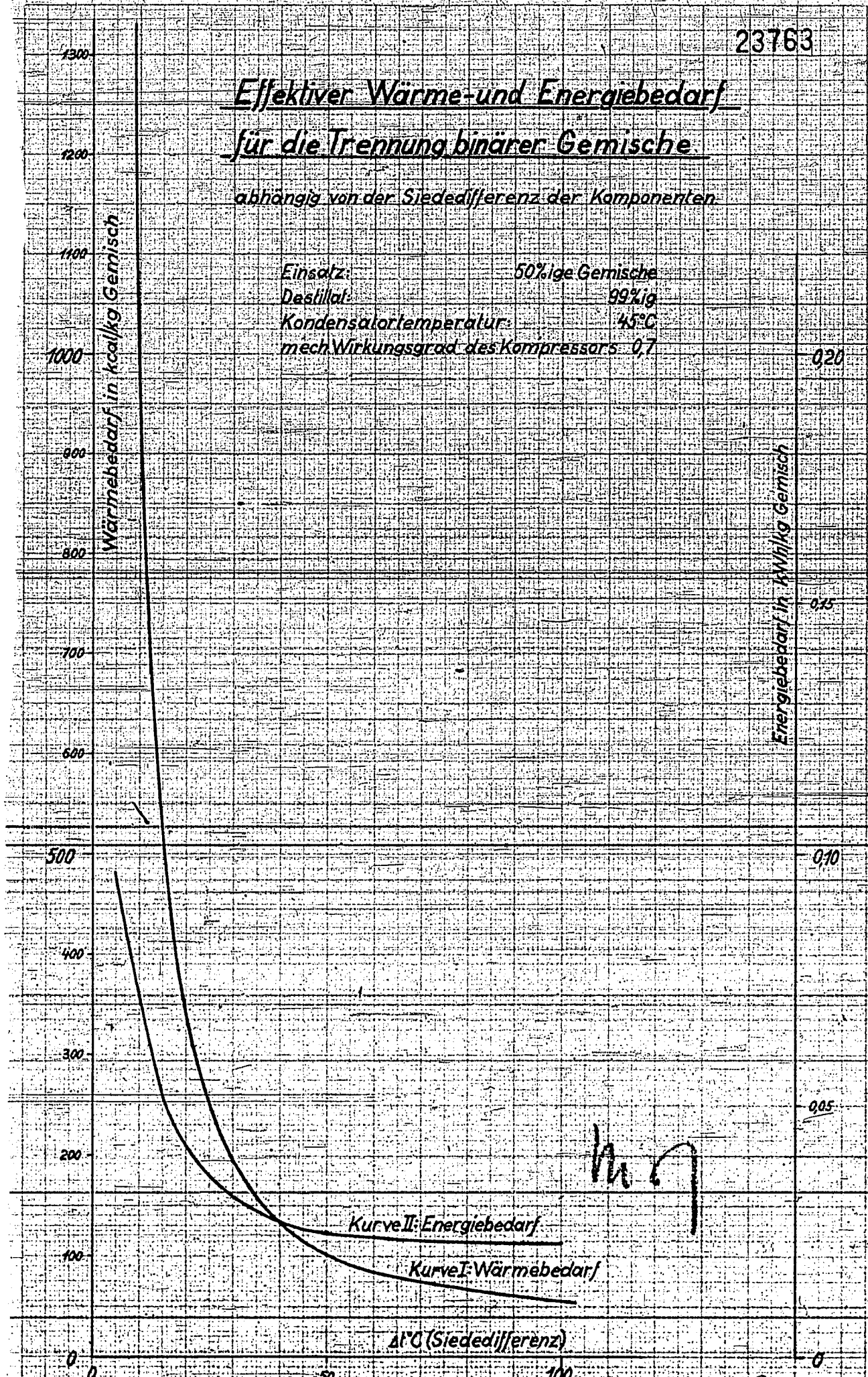
2.3.43.8

Abhängigkeit des theoretischen Wirkungsgrades einer Wärmepumpe von der Temperaturdifferenz für ein unteres Temperaturniveau von 45°C



Effektiver Wärme- und Energiebedarf für die Trennung binärer Gemische

abhängig von der Siededifferenz der Komponenten



Einsatz: 50%ige Gemische
 Destillat: 99%ig
 Kondensatortemperatur: 45°C
 mech. Wirkungsgrad des Kompressors: 0,7

Wärmebedarf in kcal/kg Gemisch

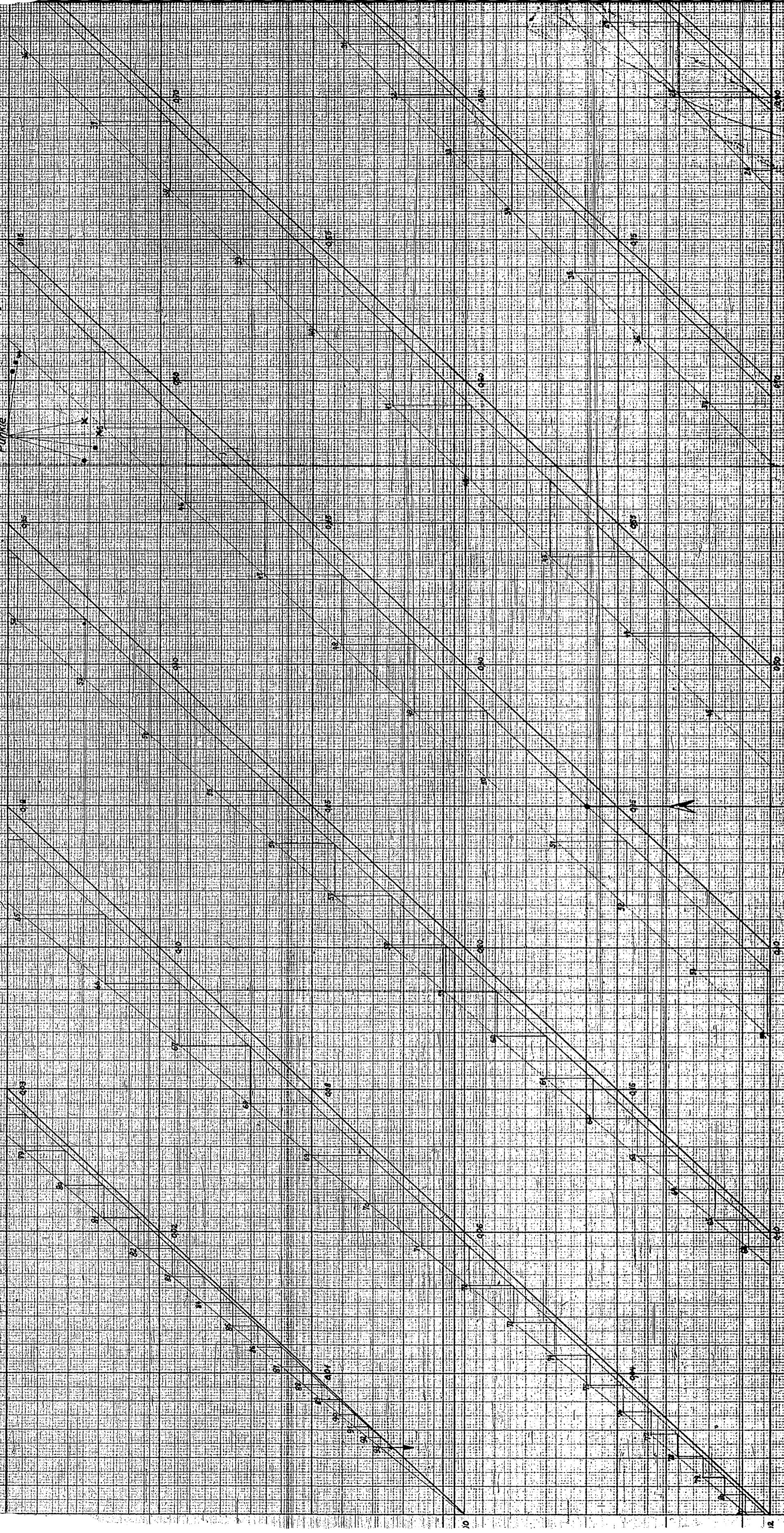
Energiebedarf in kWh/kg Gemisch

ΔT (°C) (Siededifferenz)

4. März 1945

Experimentelle Gefundene Punkte

DAVIDHEIT
de Nothly

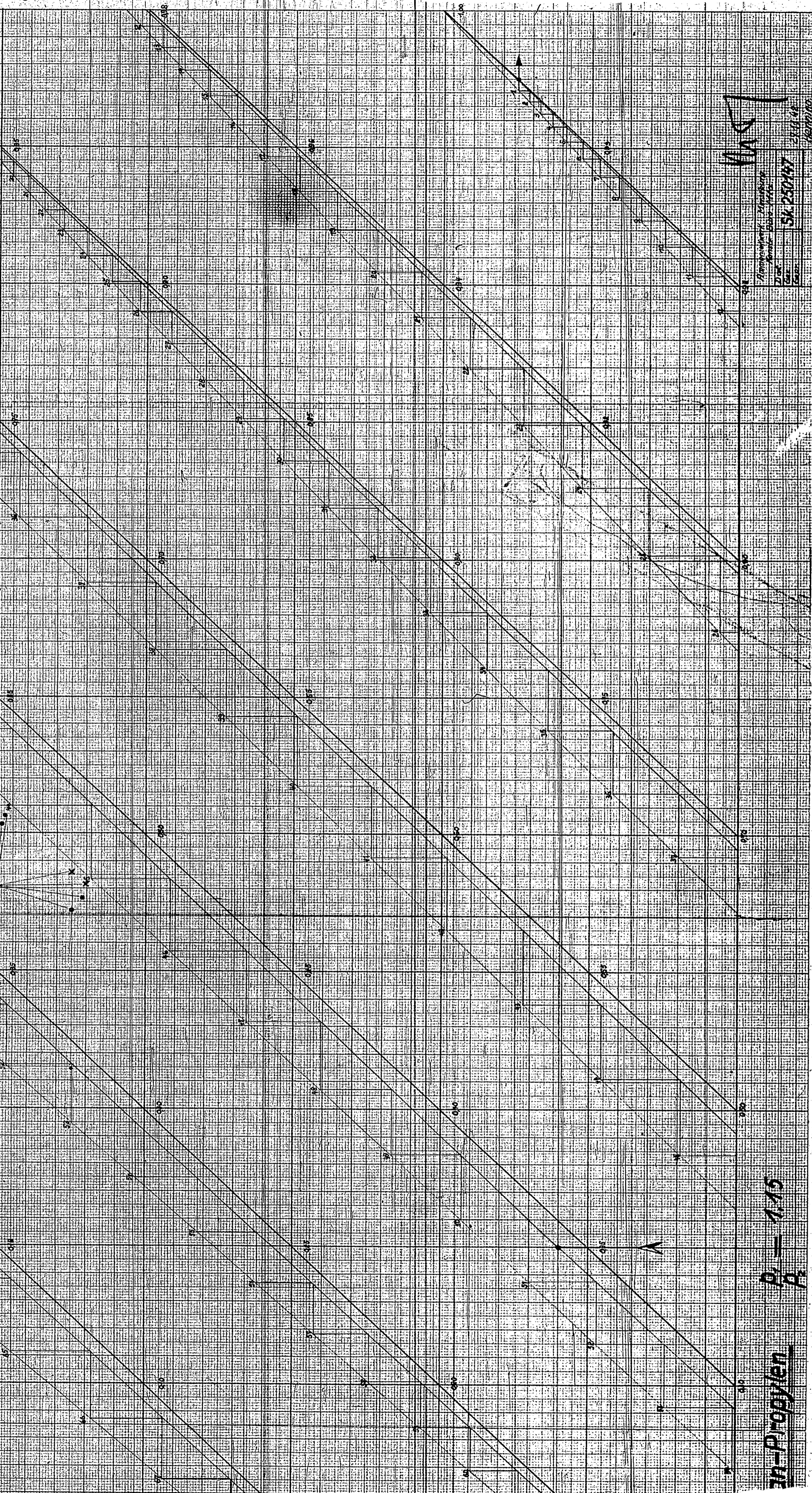


Stufendiagramm zur Trennung von Propan-Propylen

$$\frac{P_1}{P_2} = 1.15$$

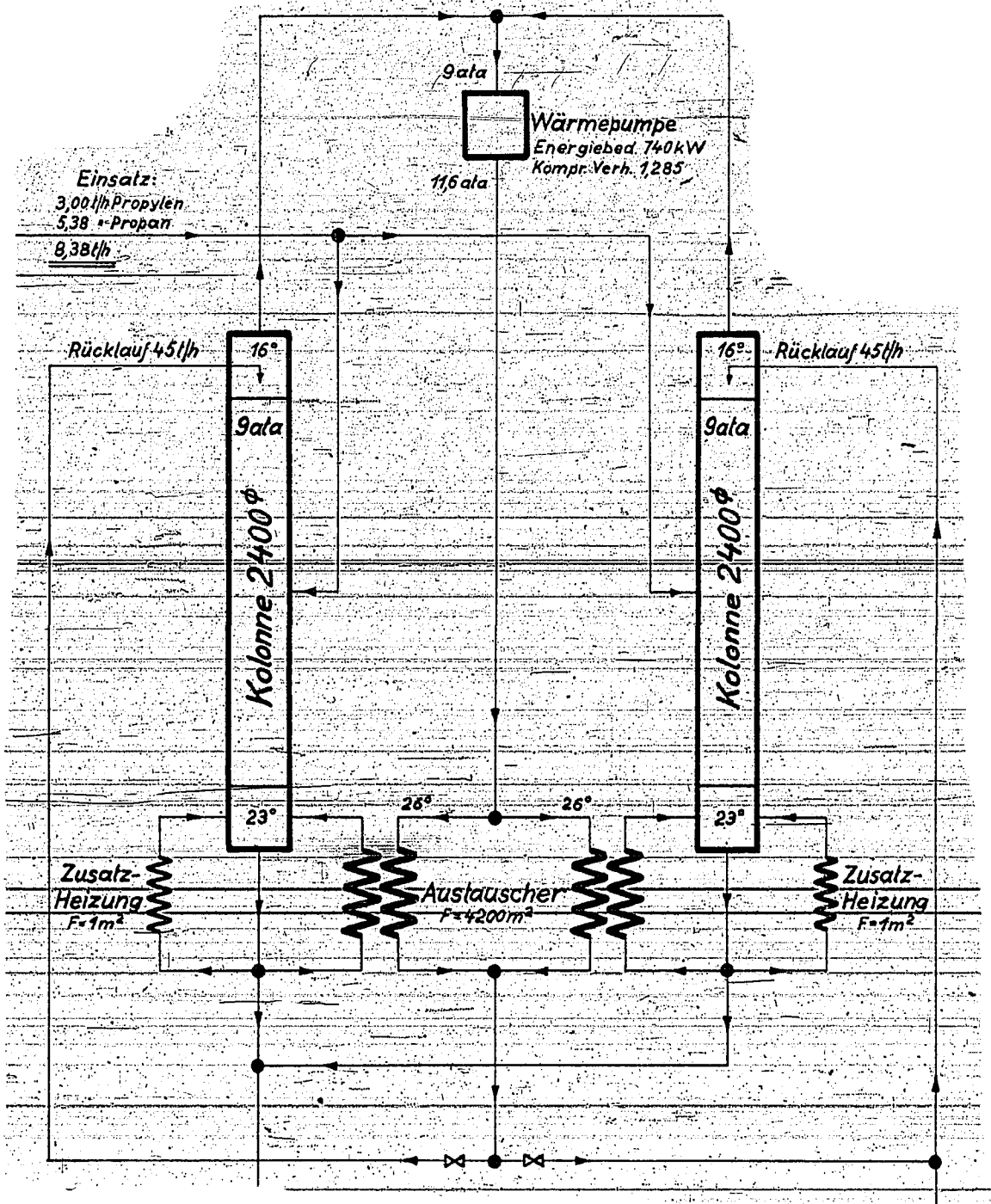
23764

Experimentelle gesfundene
Punkte



in-Propylen
 $\frac{P_1}{P_2} = 1.15$


 27. April 1957
 Dr. Ing. h. c. F. ...
 15. 250/117
 2411/57
 15. 250/117



5,38 t/h Propan 3 t/h Propylen

Handwritten signature

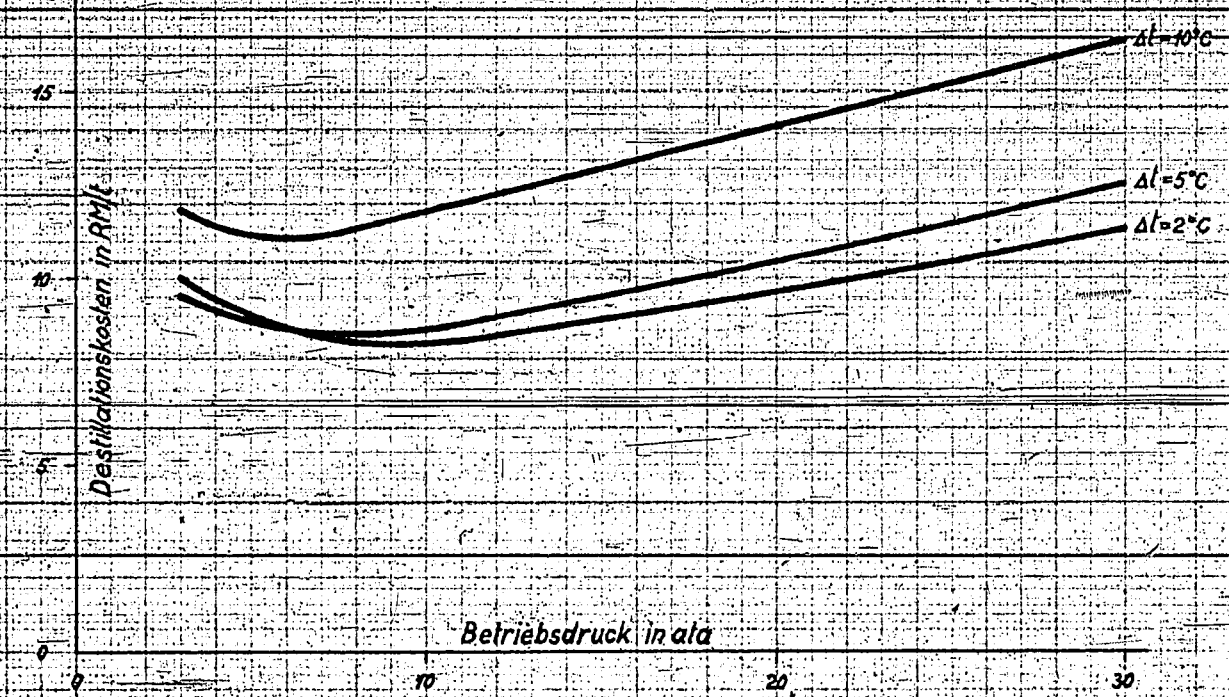
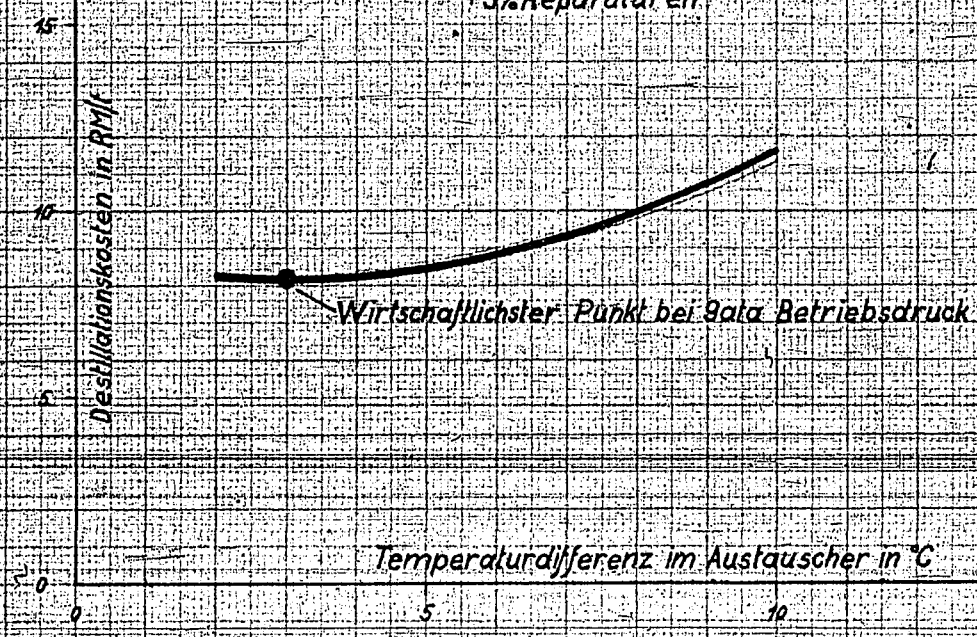
Schema einer Rektifikationsanlage mit Wärmepumpe zur Trennung von Propan-Propylen.

Ammoniakwerk Merseburg Konstr. Büro Nr. 112	
Dat. 3.3.43	SK.250148
Gez. R. M. G. A. 7	
Gepr. 11.2.	

Propylen-Propan-Trennung für stdl. 3000kg Destillat 99,5%ig

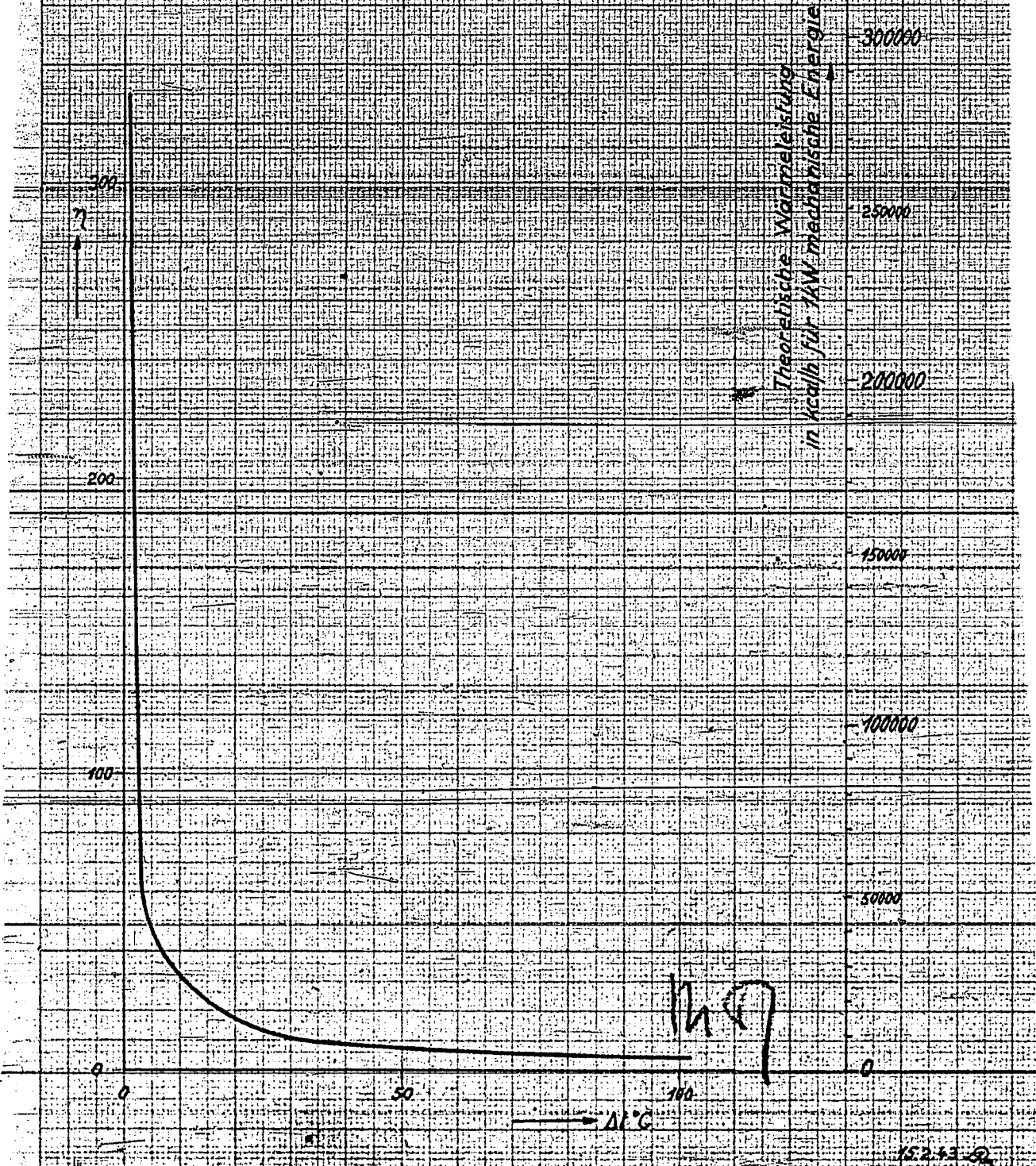
Destillationskosten je t Propylen

errechnet mit Energiekosten
 +10% Amortisation
 +3% Reparaturen



mg

Abhängigkeit des theoretischen Wirkungsgrades einer Wärmepumpe von der Temperaturdifferenz für ein unteres Temperaturniveau von 45°C



Ammoniakwerk Merseburg
Gesellschaft mit beschränkter Haftung
Leuna-Werke (Kreis Merseburg)

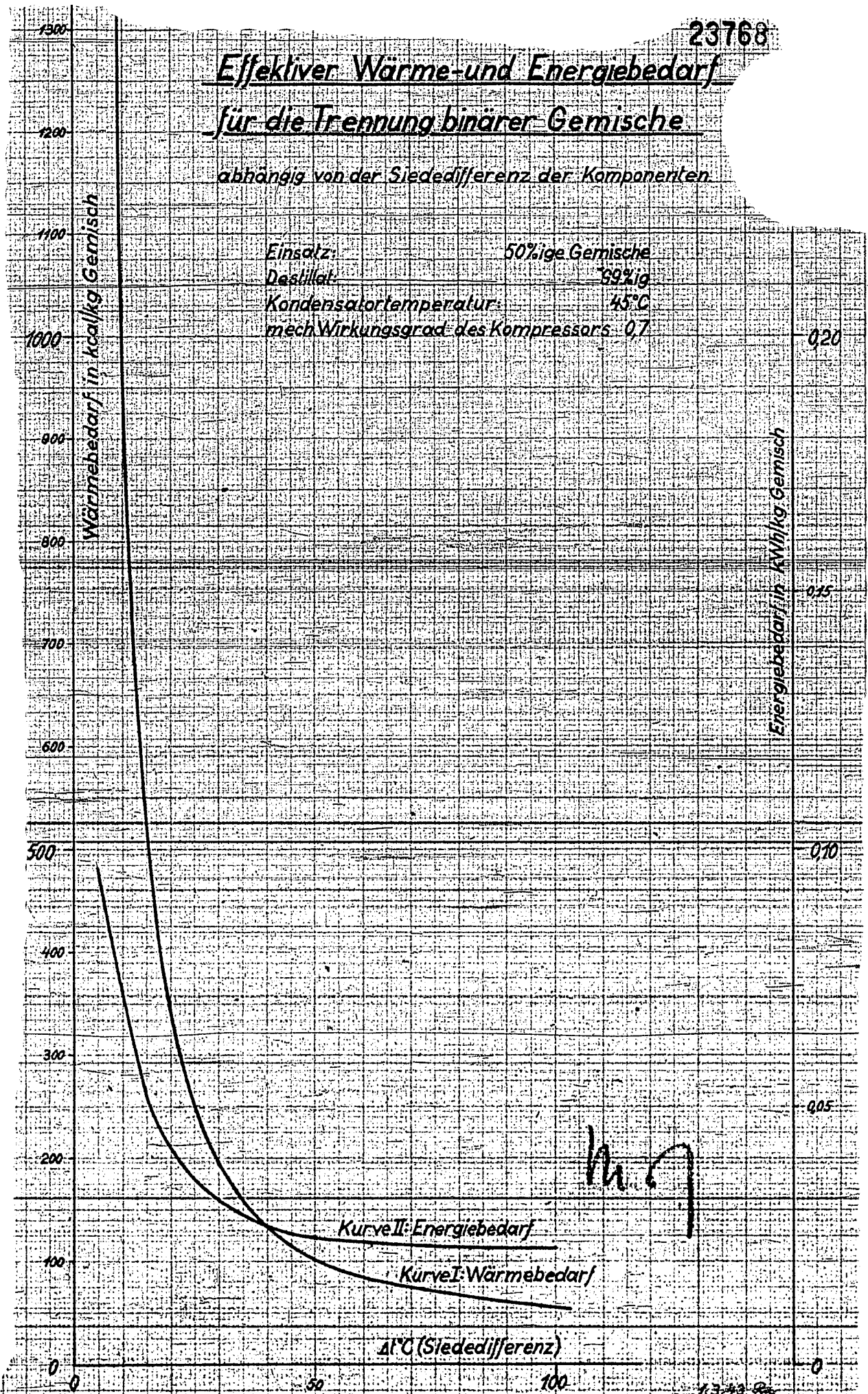
Sk.250145

4. März 1945

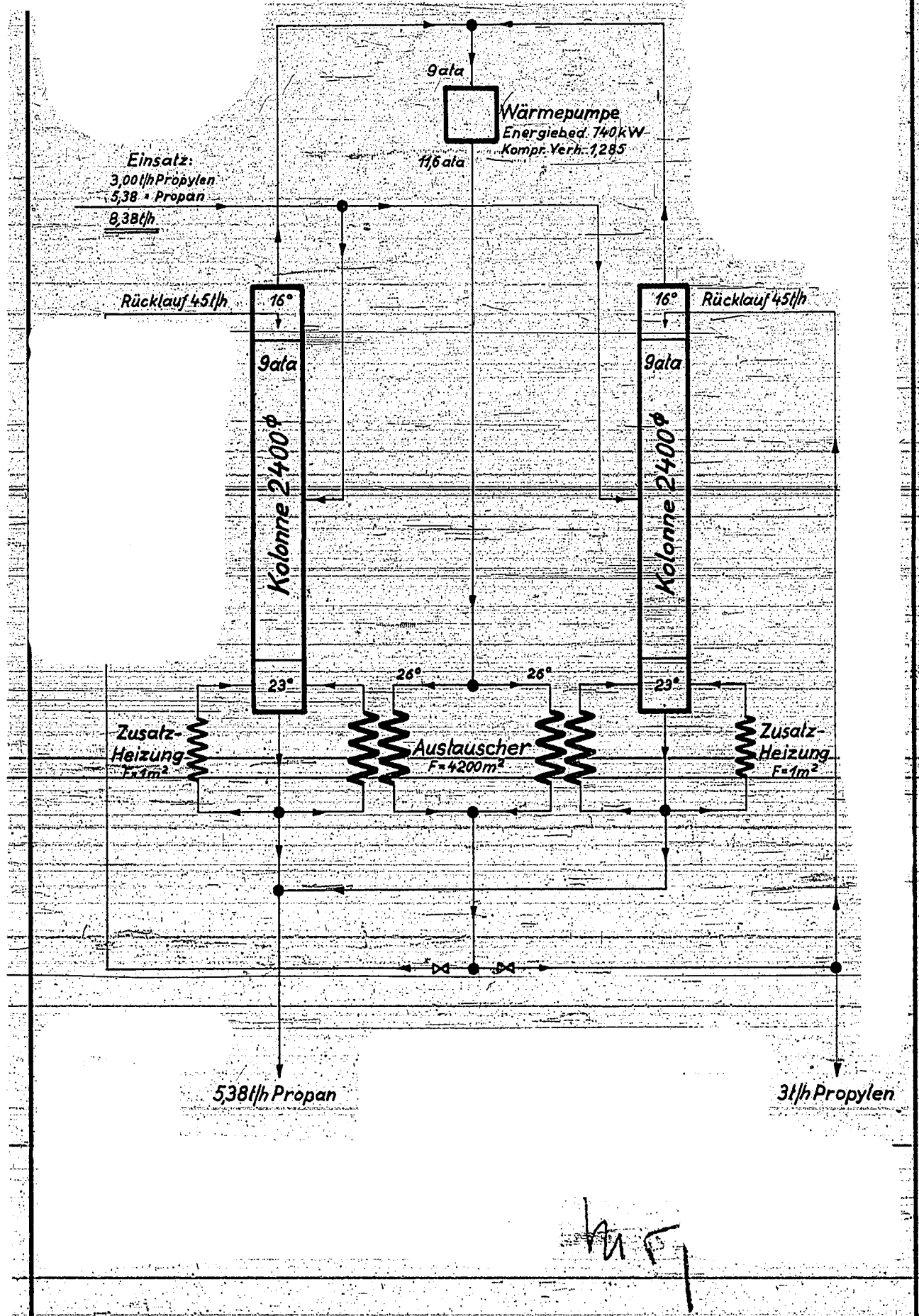
382.A4 (210x297 mm)

Effektiver Wärme- und Energiebedarf für die Trennung binärer Gemische

abhängig von der Siededifferenz der Komponenten



M.G.



Schema einer Rektifikationsanlage mit Wärmepumpe zur Trennung von Propan-Propylen.

Ammoniakwerk Merseburg
 Konstr. Büro NIM
 Dat. 3.3.43
 Gez. B. 106/43
 GdPr. 11/2
SK.250148