

Die Gestaltung des Kontaktraumes  
bei katalytischen exothermen und  
endothermen Reaktionen.

5 20225

Leuna, im April 1942.

Wirth.

Beitrag zur Frage der zweckmäßigsten Gestaltung des Kontaktraumes bei katalytischen exothermen und endothermen Reaktionen; bei denen nur geringe Temperaturunterschiede in der Kontaktschicht zulässig sind.

-----ooOoo-----

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
A <u>Zusammenfassung</u>	1
B <u>Einleitung</u>	2
C <u>Theoretische Unterlagen</u>	3
I. Plattenofen und Röhrenofen mit Kontakt in den Rohren	3
a.) Plattenofen	3
b.) Röhrenofen mit Kontakt in den Rohren (Innenkontaktröhrenofen)	3
II. Ofen mit Kontakt um die von Flüssigkeit durchflossenen Rohre (Außenkontaktröhrenofen)	4
D <u>Diskussion</u>	7
I. Vergleich der verschiedenen Reaktionsräume	7
a.) Gleichwertige Kontaktraumquerschnitte	7
b.) Kühlflächenvergleich	8
II. Vergleich verschiedener Ofentypen	9
a.) Rohrabstand des Ofens mit Außenkontakt	9
b.) Kühlflächenvergleich der verschiedenen Öfen	10
c.) Die Kühlfläche je m <sup>3</sup> Kontaktraum für die verschie- denen Öfen	11
d.) Die Raumausnutzung bei den verschiedenen Ofensy- stemen	12
E <u>Theoretische Überlegung für den Innenkontaktröhrenofen mit     kreisringförmiger Kontaktanordnung.</u>	13

#### A Zusammenfassung.

Die bis jetzt gebauten Öfen für die Synthese von Kohlenwasserstoffen aus CO und  $H_2$ , bei denen der Kontakt in Röhren und zwischen Platten angeordnet ist, haben den Nachteil, daß der Kontakt sehr schwer entleert werden kann. Es wurde deshalb vorgeschlagen einen Ofen zu entwerfen, mit dem Kontakt um die von der Kühlflüssigkeit durchströmten Röhre

für drei Ofenbauarten und zwar:

- a.) Anordnung des Kontaktes in Röhren, die von außen gekühlt sind (Innenkontaktröhrenofen)
  - b.) Anordnung des Kontaktes zwischen ebenen Kühlflächen
  - c.) Anordnung des Kontaktes um Kühlrohre (Außenkontaktröhrenofen)
- wurden Unterlagen für die wärmetechnische Berechnung abgeleitet.

An Hand der gewonnenen Formeln wurden die drei Ofentypen miteinander verglichen und folgendes festgestellt.

- 1.) Der Innenkontaktröhrenofen benötigt am meisten Kühlfläche und weist, bezogen auf den  $m^3$  umbauten Raum, das geringste Kontaktvolumen auf. Er hat jedoch Vorteile, wenn die Forderung nach sehr hohen Kontaktschichten erfüllt werden muß und die anderen Ofenbauarten für diesen Fall ungeeignet sind.
- 2.) Der Außenkontaktröhrenofen benötigt um so weniger Kühlfläche und gestattet um so bessere Raumausnutzung je kleinere Kühlrohre man ausführen kann. Er ist dem Röhrenofen mit Innenkontakt eindeutig überlegen. Wegen der schwierigen konstruktiven Probleme hat er bisher nicht die Anwendung gefunden, die er verdient.
- 3.) Der Plattenofen ist dem Innenkontaktröhrenofen eindeutig überlegen, dem Außenkontaktofen in Bezug auf Raumausnutzung jedoch nicht, wenn man letzteren Ofen mit kleinen Kühlrohren ausrüstet. Das gleiche gilt auch für den Kühlflächenbedarf, doch muß man dabei bedenken, daß der Plattenofen von Fischer beide Seiten der Platte zur Wärmeabfuhr benutzt und deshalb der Materialaufwand des Fischerofens von keiner der anderen Konstruktionen übertroffen werden kann. Je höher die Wärmeleistung pro  $m^3$  Kontaktraum und je temperaturempfindlicher die Reaktion ist, um so höher wird jedoch beim Fischerofen der Temperaturabfall in der Kühlrippe und um so weniger gelten dann die unter vereinfachten Annahmen gefundenen Ergebnisse für diesen Ofentyp.

### Einführung

In dem Bericht über die Kohlenwasserstoffsynthesversuche in Leuna vom Februar 1939 war die Berechnung des Kontaktquerschnittes bei exothermen oder endothermen Reaktionen mit Wärmeabfuhr an eine Kühlwand unter Voraussetzung eines zulässigen Temperaturabfalles in der Kontaktschicht gezeigt worden. Die Berechnung wurde seinerzeit durchgeführt für kreisförmigen Kontaktquerschnitt d.h. für Amscheidung des Kontaktes in einem Rohr mit Außekühlung und für rechteckigen Kontaktquerschnitt, also für Unterbringung des Kontaktes zwischen ebenen Kühlwänden.

Die für diese beiden Fälle abgeleiteten Formeln, die gleichzeitig auch gestatten den Temperaturverlauf in der Kontaktschicht zu ermitteln, haben sich in der Zwischenzeit zur Berechnung und Beurteilung von Synthesöfen gut bewährt.

Infolge des geringen zugelassenen Temperaturgefälles in der Kontaktschicht weisen die nach diesen Formeln für die Synthese von Kohlenwasserstoffen aus CO und H<sub>2</sub> konstruierten Öfen sehr geringe Rohrdurchmesser bzw. bei Plattenöfen kleine Kühlwandabstände auf. Die Forderung nach einer befriedigenden Wärmeabfuhr hat wegen der engen, gegeneinander abgeschlossenen Räume zu einer sehr schwierigen Entleerbarkeit des Kontaktes aus den Öfen geführt.

Um diesen Mangel, der so ziemlich allen für diese Synthese bisher gebauten Öfen anhaftet, zu beseitigen, hat der Betrieb vorgeschlagen, einen Apparat zu entwerfen, bei dem der Kontakt um die von Kühlflüssigkeit durchströmten Rohre angeordnet wird. In einem derartigen Ofen bietet sich dem Kontakt infolge der größeren zusammenhängenden Räume weit weniger die Möglichkeit zum Brücken und das Füllen und Entleeren ist, wie Versuche an einem kleinen Modell gezeigt haben, wesentlich leichter durchzuführen.

Die Ausführung eines Ofens dieser Bauart mit senkrecht angeordneten Kühlrohren war schon in einem Bericht der Kellogg vom 8. Sept. 1938 vorgeschlagen worden. Da die Konstruktion aber keineswegs befriedigte und auch bei anderen Ausführungen dieser Art große bauliche Schwierigkeiten zu erwarten waren, wurde der Gedanke eines Ofens mit Kontaktanordnung um die Kühlrohre seinerzeit nicht weiter verfolgt, umso mehr als die Plattenöfen und die Röhrenöfen mit dem Kontakt in den Rohren in wärmetechnischer Hinsicht befriedigten und das Problem des Entleerens noch nicht so in den Vordergrund des Interesses gerückt war.

Da das Entleeren des Ofens s.zt. eine der wichtigsten noch zu lösenden Aufgaben darstellt, soll die wärmetechnische Eignung eines Apparates mit um die Kühlrohre angeordnetem Kontakt in folgendem untersucht und mit den bisher üblichen Ausführungsformen verglichen werden. Dabei soll noch einmal kurz auf die früher abgeleiteten Berechnungsunterlagen eingegangen werden.

### C Theoretische Unterlagen

#### I. Plattenofen und Röhrenofen mit Kontakt in den Röhren

##### a.) Plattenofen

Mit den im Bericht vom Februar 1959 gewählten Bezeichnungen

$2 s_0$  = Kühlfächenabstand in m

$\lambda$  = Temperatur in °C

$\lambda$  = Wärmeleitzahl in kcal/m h °C (Mittlere Wärmeleitzahl von Gas und Kontakt)

$q$  = Bei der Reaktion erzeugte Wärme in kcal/m<sup>2</sup> Kontaktraum und h

$\Delta t$  = Zulässige Temperaturdifferenz in °C zwischen Mitte Kontaktschicht und Kühlwand

war der halbe Plattenabstand  $s_0$  gefunden worden zu

$$s_0 = 1,414 \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{q} \cdot \Delta t} \quad (1)$$

oder die auftretende Temperaturdifferenz in d. Kontaktschicht

$$\Delta t = \frac{s_0^2}{2} \cdot \frac{q}{\lambda} \quad (2)$$

##### b.) Röhrenofen mit Kontakt in den Röhren, Kühlflüssigkeit um die Röhre (Innenkontaktröhrenofen)

Bezeichnet man mit

$r_0$  den lichten Radius des Rohres in m, so erhält man mit den oben angegebenen Bezeichnungen

$$r_0 = 2 \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{q} \cdot \Delta t} \quad (3)$$

oder die zwischen Rohrmitte und Rohrwand auftretende Temperaturdifferenz

$$\Delta t = \frac{r_0^2}{4} \cdot \frac{q}{\lambda} \quad (4)$$

II. Ofen mit Kontakt um die von Kühlflüssigkeit durchflossenen Rohre  
 (Außenkontaktröhrenofen)

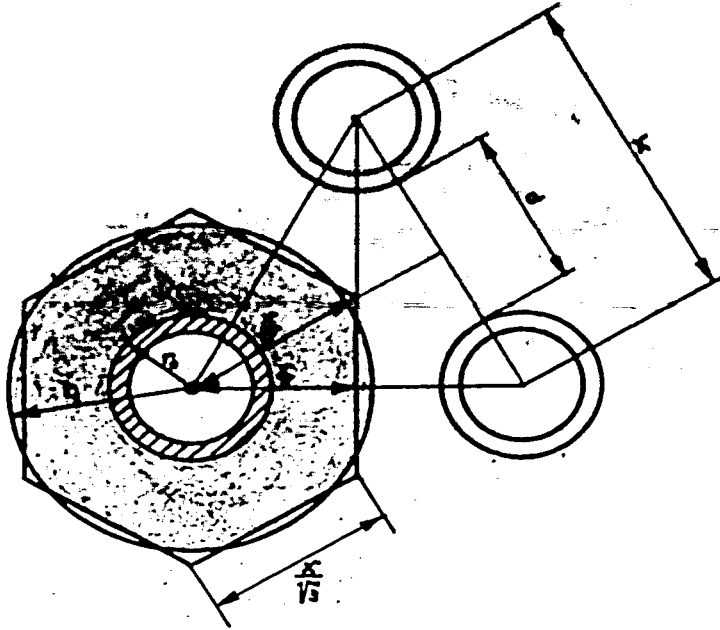


Abb. 1 Röhrenofen mit dem Kontakt um die von der Kühlflüssigkeit durchströmten Rohre

Ordnet man die Rohre in der allgemein üblichen Teilung an, wie auf Abb. 1 gezeigt ist, so strömt die Wärme dem Kühlrohr aus einem Kontaktquerschnitt zu, der ein reguläres Sechseck mit einem kreisförmigen Ausschnitt bildet. Die Seitenlänge des Sechsecks beträgt  $\frac{x}{\sqrt{3}}$  wenn die Rohrteilung mit  $x$  bezeichnet wird.

Um das Problem der Rechnung zugänglich zu machen ersetzt man das Sechseck näherungsweise durch einen Kreis, dessen Radius  $r_1$  man zu

$$r_1 = \frac{\frac{x}{2} + \frac{x}{\sqrt{3}}}{2} = 0,5386 \cdot x \text{ annimmt.}$$

Der Kontaktraum je Rohr erhält damit kreisringförmigen Querschnitt und für diesen vereinfachten Fall gilt die nachfolgende Rechnung.

Außer den bereits oben angegebenen Bezeichnungen sollen bedeuten

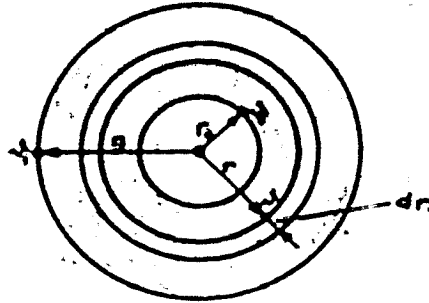


Abb. 2 Kühlrohr mit kreisringförmiger Kontaktschicht.

$r_0$  = den äußeren Radius des Kühlrohres in m

$r_1$  = den äußeren Radius der Kontaktschicht

$\Delta t = \tau_1 - \tau_0$  Temperaturdifferenz in der Kontaktschicht

Es wird ferner angenommen, daß die Oberflächentemperatur des Kühlrohres konstant ist.

Die in einem Volumenelement erzeugte Wärme ist dann

$$dQ = 2 r \pi \cdot dr \cdot q \quad (5)$$

Die Wärme, die aus der Kontaktschicht dem Volumenelement zugeführt wird, ist

$$dQ' = -\lambda \cdot 2 r \pi \cdot \frac{d\tau}{dr} \quad (6)$$

und die Wärme, die aus dem Volumenelement abströmt

$$dQ'' = -\lambda \cdot 2 r \pi \cdot \frac{d\tau}{dr} - \lambda \cdot 2 \pi \cdot \frac{d\left(r \cdot \frac{d\tau}{dr}\right)}{dr} \cdot dr \quad (7)$$

die im Volumenelement erzeugte Wärme ist

$$dQ = dQ'' - dQ' \quad (8)$$

$$= -\lambda \cdot 2 \pi \cdot \frac{d\left(r \cdot \frac{d\tau}{dr}\right)}{dr} \cdot dr \quad (9)$$

oder in Gleichung 5 eingesetzt

$$2 r \pi \cdot dr \cdot q = -\lambda \cdot 2 \pi \cdot \frac{d\left(r \cdot \frac{d\tau}{dr}\right)}{dr} \cdot dr \quad (10)$$

$$\int q \cdot r \cdot dr = -\int \lambda \cdot r \cdot \frac{d\psi}{dr} \cdot dr \quad (11)$$

$$q \cdot \frac{r^2}{2} = -\lambda \cdot r \cdot \frac{d\psi}{dr} + C_1 \quad (12)$$

für  $r = r_1$  wird  $\frac{d\psi}{dr} = 0$

damit ergibt sich die Integrationskonstante  $C_1$  zu

$$C_1 = q \cdot \frac{r_1^2}{2} \quad (13)$$

In Gleichung 12 eingesetzt erhält man

$$q \cdot \frac{r^2}{2} = -\lambda \cdot r \cdot \frac{d\psi}{dr} + q \cdot \frac{r_1^2}{2} \quad (14)$$

$$\lambda \cdot r \cdot \frac{d\psi}{dr} = \frac{q}{2} \cdot (r_1^2 - r^2) \quad (15)$$

$$\lambda \cdot \int d\psi = \frac{q}{2} \cdot \left( \frac{r_1^2}{r} - r \right) \cdot dr \quad (16)$$

$$\lambda \cdot \psi = \frac{q}{2} \cdot \left( r_1^2 \cdot \ln r - \frac{r^2}{2} \right) + C_2 \quad (17)$$

Als Grenzbedingung ergibt sich für  $r = r_0$   $\psi = \psi_0$

$$\lambda \cdot \psi_0 = \frac{q}{2} \cdot \left( r_1^2 \cdot \ln r_0 - \frac{r_0^2}{2} \right) + C_2 \quad (18)$$

oder die Integrationskonstante  $C_2$  ist.

$$C_2 = \lambda \cdot \psi_0 - \frac{q}{2} \cdot \left( r_1^2 \ln r_0 - \frac{r_0^2}{2} \right) \quad (19)$$

in Gleichung 17 eingesetzt erhält man

$$\lambda \cdot (\psi - \psi_0) = \frac{q}{2} \cdot \left( \frac{r_0^2}{2} - \frac{r^2}{2} + r_1^2 \cdot \ln \frac{r}{r_0} \right) \quad (20)$$

für  $\psi = \psi_1$  wird  $r = r_1$  (21)



Abb. 1

Gleichwertige Kontaktzustände bei Kontaktanordnung in Rohr, zwischen einem Ringen und in einer Dreiecksform an der Kugeloberfläche.

Gleichwertiger Plattenabstand bzw. doppelte Ringraumbreite mit Außenkontakt.

45  
40  
35  
30  
25  
20  
15  
10  
5  
0

Rohr- $\phi$  in mm (Innendurchmesser)

Rohrdurchmesser des Innenkontaktröhrenofens.

Plattenabstand  
Doppelte Ringraumbreite  $2(r_1 - r_2)$



0 10 20 30 40 50 60 70 80

$$\lambda \cdot \Delta t = \frac{q}{2} \cdot \left( \frac{r_0^2}{2} - \frac{r_1^2}{2} + r_1^2 \cdot \ln \frac{r_1}{r_0} \right) \quad (22)$$

$$\frac{4 \lambda \cdot \Delta t}{q} = r_1^2 \cdot \left( 2 \ln \frac{r_1}{r_0} - 1 \right) + r_0^2 \quad (23)$$

Die in der Kontaktzingsone auftretende Temperaturdifferenz beträgt demnach

$$\Delta t = \frac{q}{4 \lambda} \cdot \left[ r_1^2 \cdot \left( 2 \cdot \ln \frac{r_1}{r_0} - 1 \right) + r_0^2 \right] \quad (24)$$

Aus Gleichung 23 kann, wenn die Wärmeleitahl, die pro m<sup>2</sup> Kontaktraum erzeugte Wärme und der Radius des Kühlrohres bekannt ist für eine vorgeschriebene Temperaturdifferenz  $\Delta t$  der äußere Radius des Kontaktzingsraumes und damit die Breite der Kontaktschicht ( $r_1 - r_0$ ) durch Probieren gefunden werden. Die Gleichung 23 muß also im Gegensatz zu Gleichung 1 für den Plattenofen und Gleichung 3 für den Röhrenofen mit dem Kontakt in den Röhren durch Probieren gelöst werden.

D Diskussion

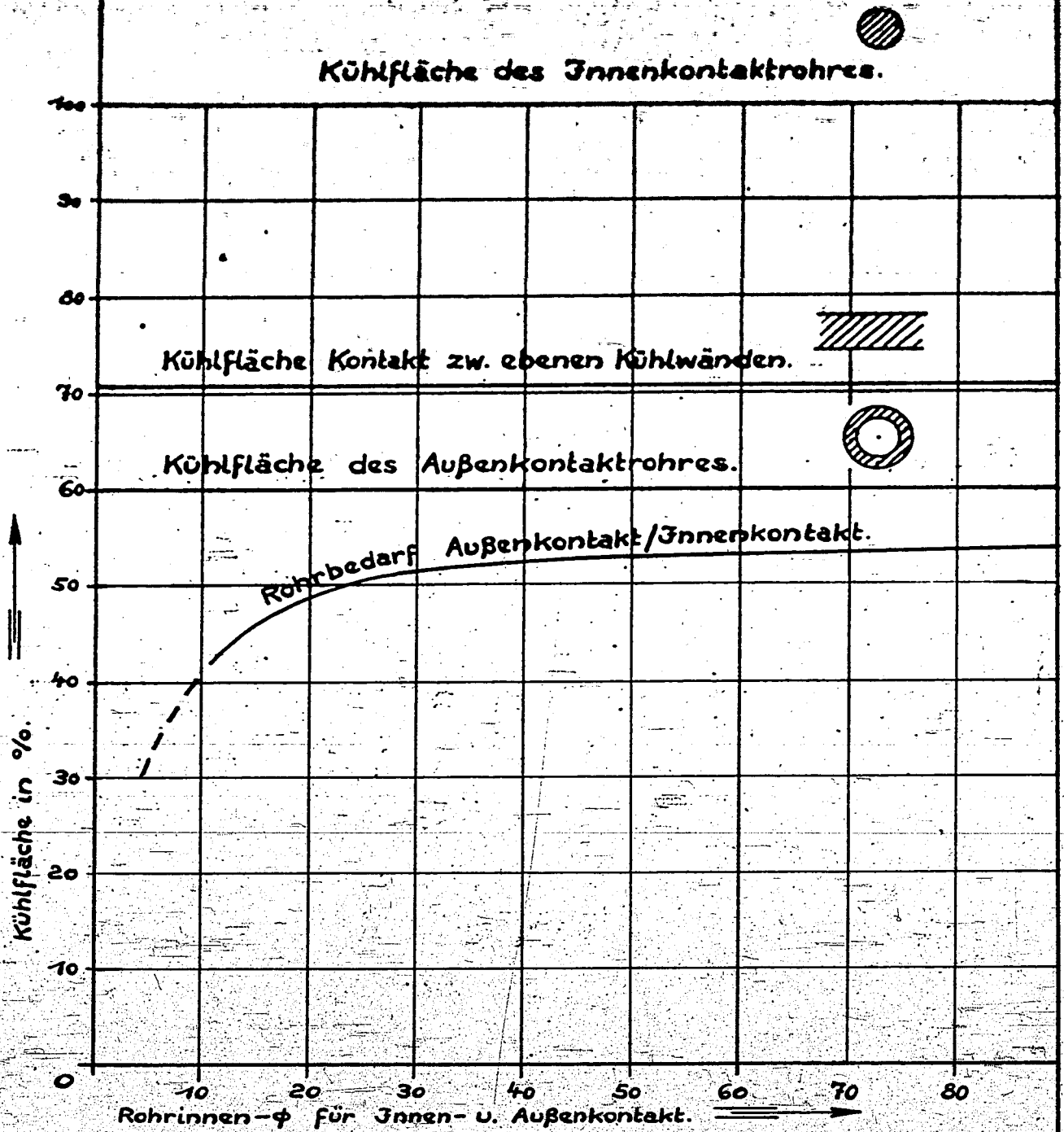
I. Vergleich der verschiedenen Reaktionsräume, Kontakt im Rohr (Rohr mit Innenkontakt), Kontakt um das Rohr (Rohr mit Außenkontakt) und Kontakt zwischen zwei ebenen Kühlflächen.

Da bei fast allen Labor- und Kleinversuchen der Kontakt im Rohr angeordnet wird und demnach die meisten Ergebnisse, die für den Entwurf großer Anlagen zur Verfügung stehen an solchen Einrichtungen gewonnen worden sind, wird bei den nachfolgenden Betrachtungen das Rohr mit innenliegendem Kontakt (Rohr mit Innenkontakt) als Vergleichsmaßstab bzw. als Norm gewählt und die Werte des Plattenofens bzw. eines Kühlrohres, um welches der Kontakt konzentrisch angeordnet ist, darauf bezogen.

a.) Gleichwertige Kontaktraumquerschnitte.

Für angenommene Werte von  $\lambda$ ,  $q$  und  $\Delta t$  wurde nach Gleichung 1, 3 und 23 der Kühlflächenabstand des Plattenofens, der Durchmesser eines Rohres mit Innenkontakt und die Ringraumbreite  $r_1 - r_0$  eines Rohres mit Außenkontakt ermittelt und in Abb. 3 über dem Durch-

**Abbildung** Der Kühlflächenbedarf bei verschiedenen gefüllten Reaktionsröhren.



messer des Rohres mit Innenkontakt aufgetragen.

Wie aus dem Vergleich von Gleichung 1 und 3 ohne weiteres zu ersehen ist, verhält sich der Durchmesser des Rohres mit Innenkontakt zum Kühlflächenabstand des Plattenofens wie  $2 : 1,41$ . Infolgedessen ergibt sich für den Plattenabstand in Abb. 3 eine gerade Linie, wobei die Plattenabstände jeweils das  $1,41$  fache des Rohrdurchmessers betragen.

Die doppelte Ringraumbreite  $2 \cdot (r_1 - r_0)$  erhält man aus Gleichung 23 für das Rohr mit Außenkontakt und zwar sind die Werte etwas kleiner als diejenigen für den Plattenabstand  $2 \cdot s_0$ . Die Kurve für die Ringraumbreite in Abb. 3 liegt demnach etwas unter der Geraden für den Plattenabstand.

Hat man z.B. für ein Rohr mit Innenkontakt den zulässigen Rohrdurchmesser zu 51 mm bestimmt, so müßte man, um den gleichen Temperaturabfall in der Kontaktschicht zu erhalten, einen Plattenofen mit 36 mm Abstand der Kühlwände und ein Rohr mit Außenkontakt bei Anwendung eines Kühlrohres von 51/57 mm  $\phi$  mit einer Kontaktringraumbreite  $(r_1 - r_0)$  von 16,7 mm ausführen.

In der Abb. 3 sind als Abszisse die lichten Rohrdurchmesser aufgetragen, während die Ringraumbreite des Ofens mit Außenkontakt mit den Außendurchmessern der entsprechenden normalen Siederohren gerechnet wurden.

#### b.) Kühlflächenvergleich.

Mit Hilfe der aus den Gleichungen 1, 3 und 23 ermittelten Werte kann man die pro 1 m<sup>2</sup> Kontakt sich ergebenden Kühlflächen ausrechnen und miteinander vergleichen. In Abb. 4 ist das Ergebnis über dem Rohrdurchmesser für das Innenkontaktrrohr aufgetragen. Außerdem ist die Kühlfläche bei Innenkontakt mit 100 % bezeichnet und die anderen Werte darauf bezogen worden.

Man sieht, daß man bei Anordnung des Kontaktes zwischen Platten nur etwa 71 % der Kühlfläche des Rohres mit Innenkontakt braucht und zwar gilt dies ganz unabhängig von der absoluten Größe des Rohrdurchmessers.

Wählt man dagegen ein Kühlrohr mit Außenkontakt, so benötigt man nur 60 % der Kühlfläche gegenüber einem gleichgroßen Rohr mit Innenkontakt und zwar in dem untersuchten Bereich unabhängig von der Größe des Rohrdurchmessers wie Abb. 4 zeigt. Berücksichtigt man ferner, daß man beim Rohr mit Innenkontakt infolge der geringen Wärmeübergangszahl auf der Innenseite den lichten Durchmesser, dagegen beim Rohr mit Außenkontakt

den äußeren Durchmesser für die Berechnung der Kühlfläche einsetzen muß, so ergibt sich, wie gleichfalls Abb. 4 zeigt, daß der Rohrbedarf bei Außenkontakt noch unter 60 % des Rohraufwandes für Innenkontakt liegt. Für diese Betrachtung wurde wiederum ebenfalls wieder normale Siederohre zugrunde gelegt.

Je größer der Rohrdurchmesser, umso mehr verschwindet der Einfluß der Rohrwandstärke. Für kleine Durchmesser ergibt sich infolge relativ großer Wandstärken ein großer Unterschied in der Innen- und Außenfläche und infolgedessen ein großer Vorteil des Rohres mit Außenkontakt. Man benötigt z. B. bei 10 mm Rohrdurchmesser beim Rohr mit Außenkontakt nur etwa 40 % des Rohrmaterials wie bei dem gleichen Rohr mit Innenkontakt.

Die ganzen Betrachtungen gelten unter der Annahme, daß in der Kontaktschicht bei allen miteinander verglichenen Ofenkonstruktionen der gleiche Temperaturabfall herrscht und daß man den Temperatursturz in der Grenzschrift bedingt durch den Wärmeübergangswiderstand an die Wand vernachlässigen kann, d. h., daß sich dieser Temperatursturz in einer so kleinen Randzone abspielt, daß er keinen Einfluß auf den Verlauf der Reaktion hat.

## II. Vergleich von verschiedenen Ofentypen

### a.) Rohrabstand des Ofens mit Außenkontakt.

Bei den bisherigen Betrachtungen wurde angenommen, daß es sich um ein einzelnes Rohr bezw. um eine einzige zwischen zwei ebenen Platten befindliche Kontaktschicht handelt. Will man jedoch ganze Syntheseöfen miteinander vergleichen, so muß man berücksichtigen, daß bei dem Ofen mit Außenkontakt die Entfernung zwischen zwei Rohren nicht gleich der rechnerisch nach Gleichung 23 ermittelten doppelten Ringraumbreite ( $r_1 - r_0$ ) sein kann.

Wenn man, wie auf Seite 4 ausgeführt, setzt :

$$r_1 = x \cdot 0,5386 \quad (25)$$

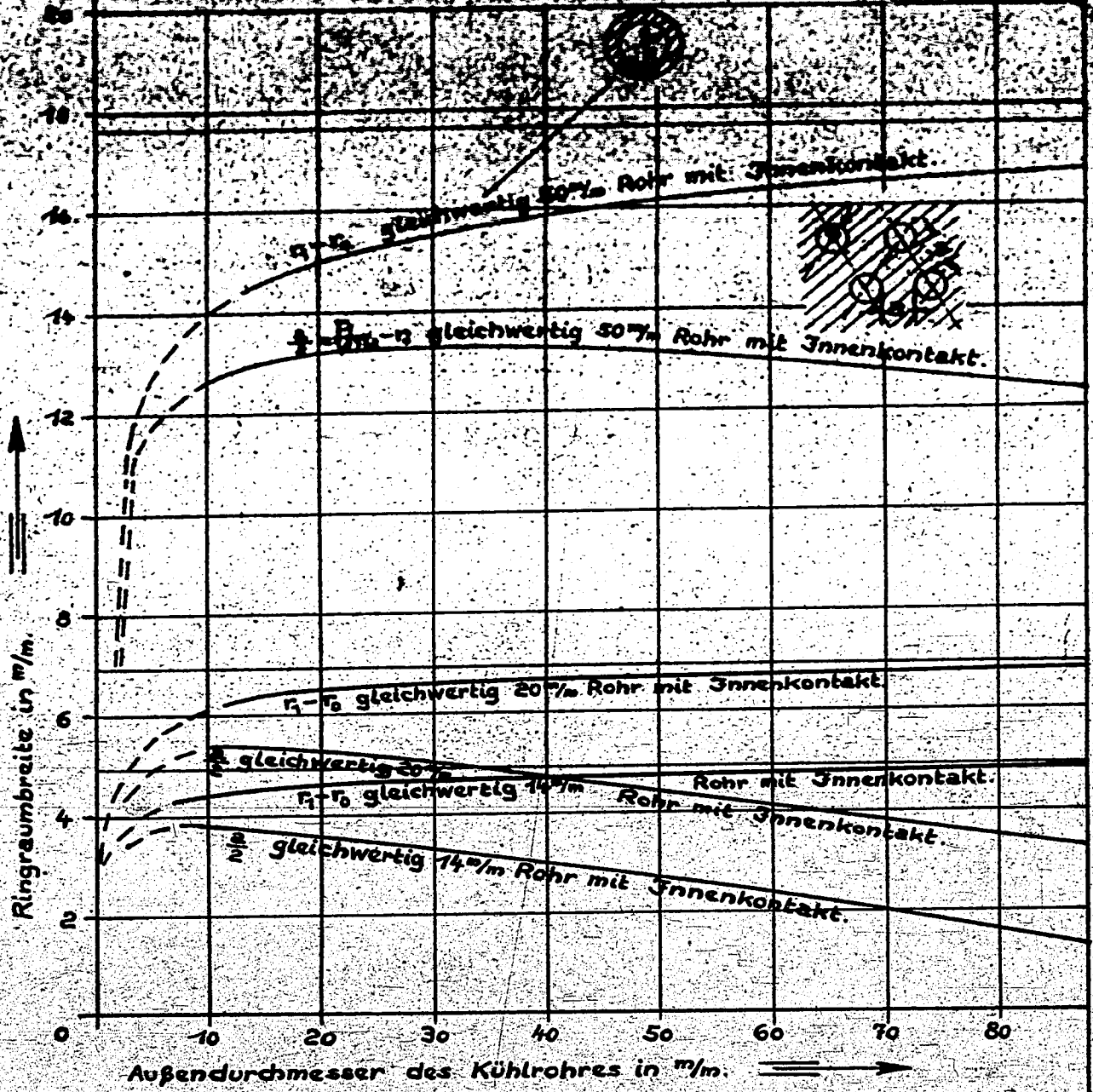
$$\text{und} \quad x = 2 \cdot r_0 + a \quad (26)$$

wobei  $a$  die Entfernung zwischen zwei Rohren bedeutet, so wird

$$a = 2 \cdot \left( \frac{r_1}{1,0772} - r_0 \right) \quad (27)$$

Der nach Gleichung 23 ermittelte Wert  $r_1$  für den äußeren Radius der kreisringförmigen Kontaktschicht muß also auf  $\frac{r_1}{1,0772}$  verkleinert wer-

Die Ringraumbreite ( $r_1 - r_2$ ) von Kühlrohren mit 214 Nuten  
aus Aluminium für Kühlrohren mit Außenkontakt in Abhängigkeit  
von dem Nutenabstand  $s$  veranschaulicht, der sich mit  
zunehmender Nutenbreite  $r_1 - r_2$  vergrößert.



den, um den Rohrabstand  $a$  nach Gleichung 27 zu erhalten.

Mit diesen Annahmen wurden die nachfolgenden Betrachtungen über Reaktionsöfen verschiedener Bauart durchgeführt.

In Abb. 5 sind die Werte für die Ringraumbreite des Rohres mit Außenkontakt nach Gleichung 25 und die korrigierten Werte für den halben Abstand zweier Kühlrohre nach Gleichung 27 für drei Fälle eingetragen und zwar für Ofen mit Außenkontakt, welche Ofen mit Innenkontakt von 14 mm, 20 mm und 50 mm l. p. gleichwertig sind.

Ein Ofen mit Außenkontakt, der eine gleich gute Wärmeabfuhr hat wie ein 50 mm Röhrenofen mit Innenkontakt, muß bei Anwendung von Kühlrohren mit 40 mm Außendurchmesser einen Rohrabstand von  $2 \cdot \frac{a}{2} = 2 \cdot 13,3$  mm haben, während man bei Verwendung von 10 mm Kühlrohren einen Rohrabstand von  $2 \cdot 12,6$  mm wählen muß. Die entsprechenden Werte des Innenrohrofens mit Außenkontakt sind gleichfalls aus Abb. 5 zu entnehmen und betragen  $2 \cdot (r_1 - r_0) = 2 \cdot 15,9$  bzw.  $2 \cdot 13,9$  mm.

Man sieht auf Abb. 5, daß der Unterschied zwischen  $(r_1 - r_0)$  u.  $\frac{a}{2}$  um so geringer ist, je kleiner man den Durchmesser des Kühlrohres wählt. Es erscheint also schon nach diesen Betrachtungen als zweckmäßig, einen Außenkontaktofen mit möglichst kleinen Kühlrohren auszurüsten.

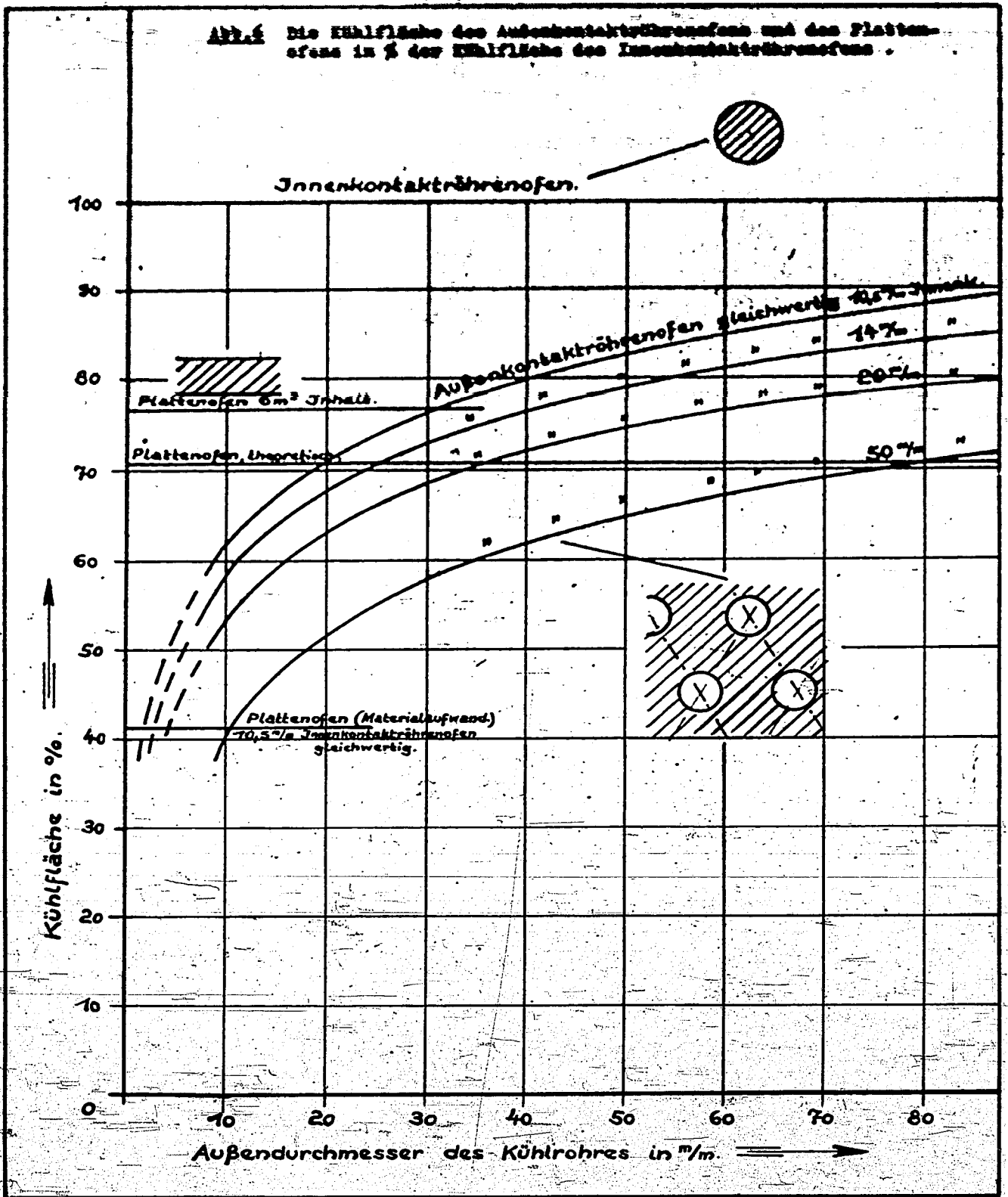
Bei Ofen, die Rohren von 14 mm  $\phi$  mit Innenkontakt gleichwertig sein sollen, hat es nach Abb. 5 z. B. keinen Sinn den Durchmesser des Kühlrohres größer als 20 mm zu wählen, da sonst der Rohrabstand zu gering wird um eine gute Ausnutzung des umbauten Raumes zu erreichen.

#### b.) Kühlflächenvergleich der verschiedenen Ofen.

Ermittelt man mit den im vorhergehenden Abschnitt gefundenen Werten für den Rohrabstand die Kühlflächen des Außenkontaktofens und vergleicht sie mit denjenigen des Innenkontaktröhrenofens und mit denen des Plattenofens, so erhält man die in Abb. 6 dargestellte Abhängigkeit. Die Kühlfläche des Röhrenofens mit Innenkontakt wurde wieder zu 100 % angenommen, dann beträgt die Kühlfläche des Plattenofens etwa 71 %. Für den Röhrenofen mit Außenkontakt wurden wieder drei Fälle durchgerechnet und zwar gleichwertig dem Innenkontaktofen mit 14, 20 und 50 mm Kontaktrohren. Es ergibt sich für den Mehrrohrfen nach Abb. 6 eine starke Abhängigkeit der Kühlfläche von der Kühlrohrgröße.

Je größer die Kühlrohrabmessungen gewählt werden, um so größer wird der

**Abb. 4** Die Kühlfläche des Außenkontaktröhrenofens und des Plattenofens in % der Kühlfläche des Innenkontaktröhrenofens.





Kühlflächenaufwand zur Erzielung eines bestimmten zulässigen Temperaturanstieges in der Kontaktschicht. Will man z.B. einen Ofen bauen, der einen Röhrenofen mit 20 mm Innenkontakt gleichwertig ist, so braucht man bei Anwendung von 50 mm Kühlrohren 74,5 %, bei 10 mm Kühlrohren nur 53,5 % der Kühlfläche des Ofens mit Innenkontakt.

Je höher man mit dem gleichwertigen Durchmesser geht, d.h. je weniger temperaturempfindlich die Reaktion ist, um so vorteilhafter wird der Ofen mit Außenkontakt gegenüber jenen mit Innenkontakt. Bei 10 mm Kühlrohren und dem gleichwertigen Durchmesser von 50 mm benötigt der Ofen mit Außenkontakt nur 40 % der Kühlfläche eines Röhrenofens mit 50 mm Rohren bei dem der Kontakt in den Rohren angeordnet ist.

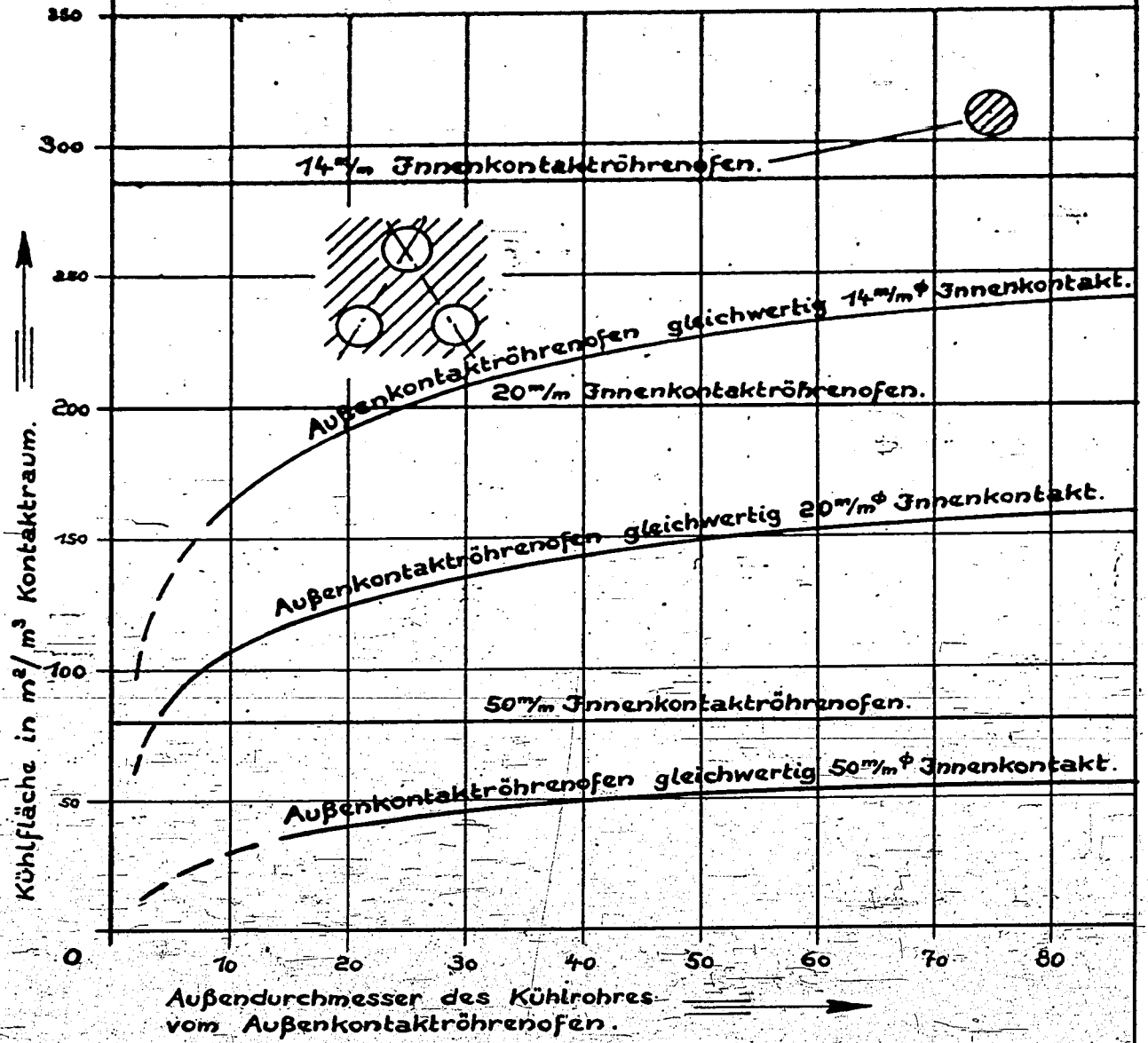
In Abb. 6 wurde ferner noch der Kühlflächenbedarf für einen ausgeführten Plattenofen von 6 m<sup>3</sup> Inhalt, der einem Innenkontaktröhrenofen von 10,5 mm Rohren gleichwertig ist, eingetragen. Rechnet man nur die Plattenkühlfläche, so beträgt diese etwa 71 % von der des gleichwertigen Innenkontaktröhrenofens. Nimmt man jedoch die beim Plattenofen gleichfalls notwendigen Kühlrohre hinzu, so ergibt sich, daß die tatsächliche Kühlfläche 77 % der Innenkontaktofenkühlfläche beträgt. Der gleichwertige Außenkontaktröhrenofen ist in bezug auf Kühlfläche dem Plattenofen überlegen, wenn der Ofen mit Kühlrohren kleiner als 30 mm ausgeführt wird. Dabei ist aber zu bedenken, daß bei Fischerofen die Platten von beiden Seiten Wärme aufnehmen und damit als Kühlfläche einzusetzen sind, während bei dem Röhrenofen nur die Außen- oder die Innenfläche der Röhre als Kühlfläche in die Rechnung eingeht. Wenn man also den Materialaufwand betrachtet, so ergibt sich, daß der Plattenofen nur etwa 41,5 % vom Baustoff des Röhrenofens mit Innenkontakt benötigt und daß der Außenkontaktofen nicht mit so kleinen Kühlrohren ausgerüstet werden kann, daß er dem Plattenofen überlegen wäre. Der Fischerplattenofen ist demnach in dieser Hinsicht nicht zu übertreffen.

c.) Kühlfläche je m<sup>3</sup> Kontaktraum für die verschiedenen Öfen.

In Abb. 7 sind die absoluten Werte für die Kühlfläche des Außenkontaktröhrenofens für verschiedene gleichwertige Durchmesser in Abhängigkeit vom Außendurchmesser des Kühlrohres eingetragen. In dem gleichen Diagramm sind auch die Kühlflächen der Röhrenofen mit Innenkontakt für die Durchmesser 14, 20 u. 50 mm eingezeichnet. Ein Röhrenofen mit Innenkontakt hat bei 14 mm Rohren 286 m<sup>2</sup> Kühlfläche pro m<sup>3</sup> Kontakt, dagegen der gleichwertige Ofen mit Außenkontakt, bei Anwendung von 20 mm Rohren nur 192 m<sup>2</sup>.

Abb. 1

Die Kühlfläche pro l Kontakttraum für den Röhrenofen mit Innen- und Außenkontakt.



Man spart also bei letzter Ausführung 33 % an Kühlfläche ohne die Wirkung des Ofens zu verschlechtern. Da, wie schon gesagt, die Fläche bei Anordnung des Kontaktes im Rohr auf den Innendurchmesser, die beim Ofen mit Außenkontakt auf den äußeren Durchmesser des Kühlrohres zu beziehen ist, ist die Einsparung an Rohrmaterial noch größer als 33 %.

Man sieht außerdem aus Abb. 7 wie bei weniger empfindlichen Reaktionen, also wenn man den gleichwertigen Durchmesser größer wählen kann, der Aufwand an Kühlfläche je  $\text{m}^3$  Kontaktraum stark zurück geht. Der Außenkontaktofen, der einen Innenkontaktofen mit 14 mm  $\varnothing$  gleichwertig ist, erfordert, wie schon gesagt, bei 20 mm Kühlrohren  $192 \text{ m}^2$  Kühlfläche, jener der einen Innenkontaktofen von 50 mm  $\varnothing$  gleichwertig ist, verlangt bei gleichem Kühlrohrdurchmesser nur  $40 \text{ m}^2$  Fläche.

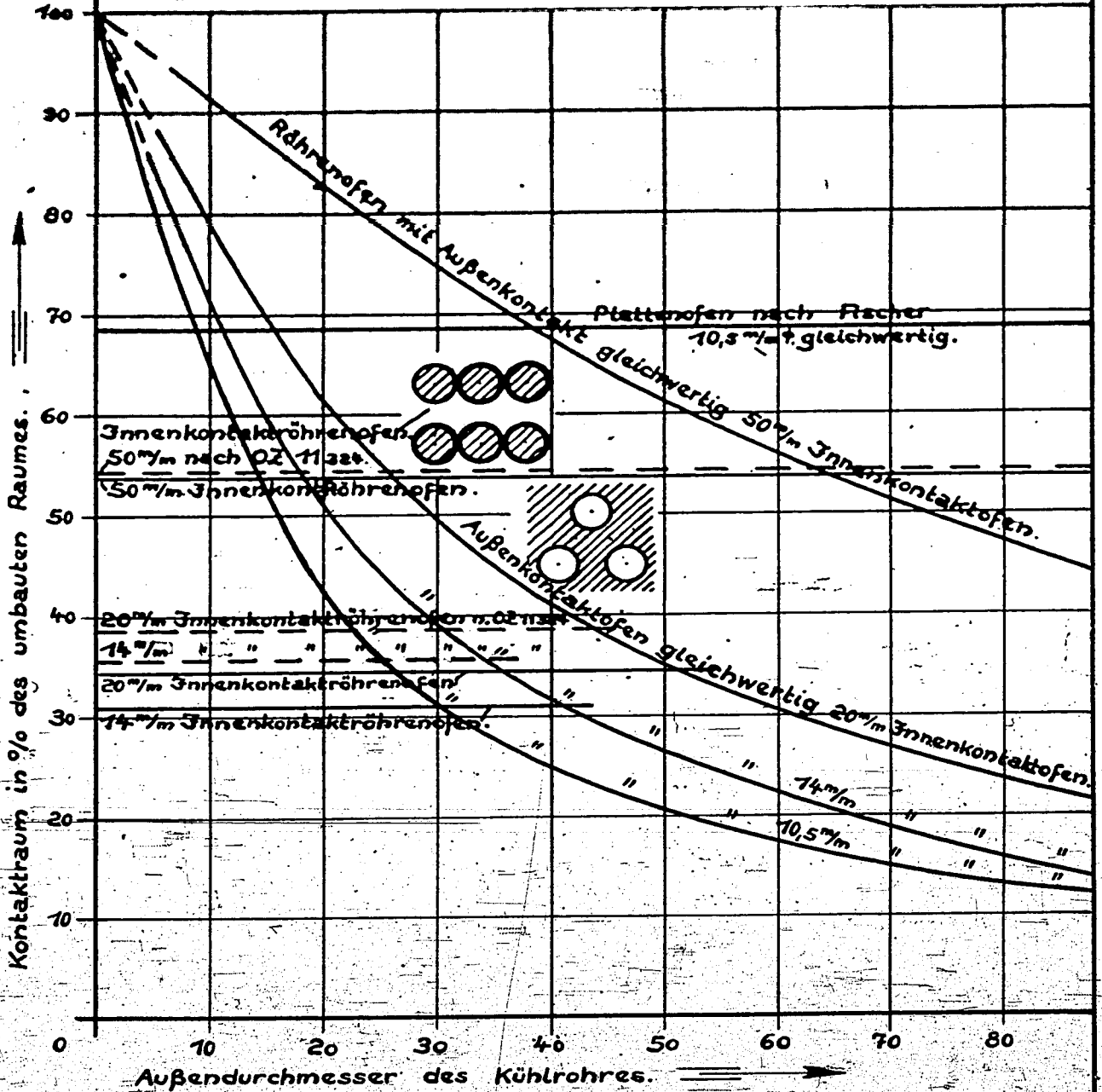
d.) Die Raumausnutzung bei den verschiedenen Ofensystemen.

Betrachtet man noch die Raumausnutzung der einzelnen Syntheseöfen, so sieht man aus Abb. 8, daß ein Röhrenofen mit Außenkontakt einen um so größeren Prozentsatz des umbauten Raumes als von Kontakt erfüllt aufweist, je kleiner der Durchmesser der verwendeten Kühlrohre gewählt wird. Für den Kühlrohrdurchmesser 0 gehen die Kurven durch den Punkt 100 %. Für einen Ofen gleichwertig einem Röhrenofen mit Innenkontakt von 14 mm  $\varnothing$  beträgt die Raumausnutzung bei Verwendung von 20 mm Kühlrohren 51,0 %, während sie bei 10 mm Kühlrohren auf 71 % ansteigt. Im Interesse einer guten Raumausnutzung ist es also ebenfalls zweckmäßig, den Röhrenofen mit Außenkontakt mit möglichst kleinen Kühlrohren auszurüsten.

Man sieht aber aus Abb. 8 ebenfalls, daß der Ofen mit Außenkontakt dem Ofen mit Innenkontakt um so mehr überlegen ist, je kleinere Kühlrohre man verwendet. Ein Innenkontaktröhrenofen mit 14 mm Rohren, bei normaler Rohranordnung und einer Rohrentfernung, die 3 mal der Wandstärke entspricht, ist die Raumausnutzung 31 %. Im Bereich von Kühlrohrdurchmessern kleiner als 40 mm, ist, wie Abb. 8 zeigt, der gleichwertige Ofen mit Außenkontakt diesem Ofen überlegen. Wählt man für den Röhrenofen mit Innenkontakt die Rohranordnung nach OZ 11324, so erhält man bei gleichfalls 14 mm Rohren die Raumausnutzung von 35,5 % — und man muß bei einem gleichwertigen Röhrenofen mit Außenkontakt den Kühlrohrdurchmesser unter 34 mm senken, damit der letzte Ofen eine vorteilhaftere Raumausnutzung als der erstere hat.

**Abb. 2**

Vergleich der Bauweise von Röhrenöfen mit Innen- und mit Außenkontakt und von Plattenöfen.



Die gleichen Überlegungen wurden auch für den Ofen von 50 mm und 20 mm l.Ø mit Innenkontakt angestellt und gleichfalls in Abb.8 eingetragen. Für 50 mm l.Ø verschwindet für den Innenkontaktofen, wie Abb.8 zeigt, der Vorteil einer Anordnung nach OZ 11324 gegenüber der normal üblichen Ausführung. In beiden Fällen beträgt der Kontakt-raum etwa 54 % des unbauteilen Raumes. Der gleichwertige Ofen mit Außenkontakt muß Kühlrohre mit kleinerem Außendurchmesser als 64 mm erhalten, damit er eine bessere Raumausnutzung aufzuweisen hat, als der Innenkontaktröhrenofen.

In die gleiche Abb.8 wurde für einen ausgeführten Plattenofen nach Fischer von 6 m<sup>2</sup> Kontaktraum die Raumausnutzung eingetragen, die 68,5 % beträgt. Der Ofen, der 7,4 mm Plattenabstand hat, ist einem Innenkontaktröhrenofen von 10,5 mm Ø gleichwertig. Sollte man einen gleichwertigen Außenkontaktröhrenofen mit besserer Raumausnutzung bauen, so müßte man, wie gleichfalls aus der Abb.8 zu entnehmen ist, Kühlrohre mit einem äußeren Durchmesser kleiner als 9 mm wählen. Man sieht daraus, daß der Fischersche Plattenofen in bezug auf Raumausnutzung weder von dem Innen- noch von dem Außenkontaktröhrenofen praktisch zu übertreffen ist.

Bei den obigen Betrachtungen wurde bei allen Konstruktionen die Nebenräume zur Gas-Zu- und Abführung, ebenso wie für die Dampfleitungen oder den Raum, den ein evtl. zu bauender Hochdruckmantel beansprucht, außeracht gelassen, da anzunehmen ist, daß bei guten Konstruktionen dieser Anteil etwa auf den gleichen Wert für alle Bauarten gebracht werden kann.

#### E .) Theoretische Überlegung für den Innenkontaktröhrenofen und kreisringförmiger Kontakthanordnung.

In der gleichen Weise wie für die drei bereits behandelten Ofenbauformen kann man auch nach Abb.9 für ein Kühlrohr vom Radius  $r_0$ , das eine kreisringförmige Kontaktschicht von der Breite  $(r_0 - r_1)$  aufweist und wobei  $r_0 > r_1$  ist, den Temperaturverlauf in der Kontaktschicht ermitteln oder für eine zulässige Temperaturdifferenz  $\Delta t$  die Breite des Ringraumes  $(r_0 - r_1)$  ermitteln. Man erhält dann mit den bereits früher angegebenen Bezeichnungen

$$2 r_1^2 \cdot \ln \frac{r_1}{r_0} + r_0^2 - r_1^2 = \frac{4 \cdot \Delta t \cdot \lambda}{q} \quad (25)$$

oder die Temperaturdifferenz  $\Delta t$  ist

$$\Delta t = \frac{q}{4 \lambda} \cdot \left( 2 \cdot r_1^2 \cdot \ln \frac{r_1}{r_0} + r_0^2 - r_1^2 \right) \quad (26)$$

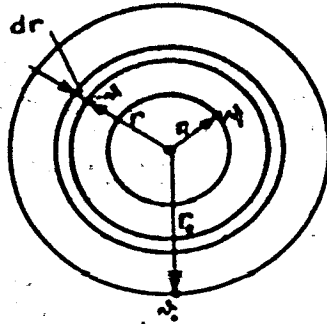


Abb. 9 Kreisringförmige Kontaktschicht  
Kühlfläche außen

für  $r_1 = 0$  ergibt sich aus Gleichung 25

$$r_0 = 2 \cdot \sqrt{\frac{\lambda \cdot \Delta t}{q}}$$

d.h. Gleichung 25 geht dann über in Gleichung 3 für das mit Kontakt gefüllte Rohr.

Durch Kombination von Gleichung 25 und Gleichung 23 ist es möglich den Temperaturverlauf in kreisringförmigen Räumen, die außen und innen gekühlt sind, zu berechnen. Es entspricht dies dann dem von der Ruhrchemie entwickelten Röhrenofen mit kreisringförmiger Anordnung des Kontaktes.