

23565

Die Berechnung und Beurteilung von  
Ofen für katalytische exotherme und  
endotherme Reaktionen, die innerhalb  
enger Temperaturgrenzen verlaufen.

2

Dr. Ing. Wirth

Die Berechnung und Beurteilung von Ofen für katalytische exotherme und endotherme Reaktionen, die innerhalb enger Temperaturgrenzen verlaufen.

### Inhaltsverzeichnis.

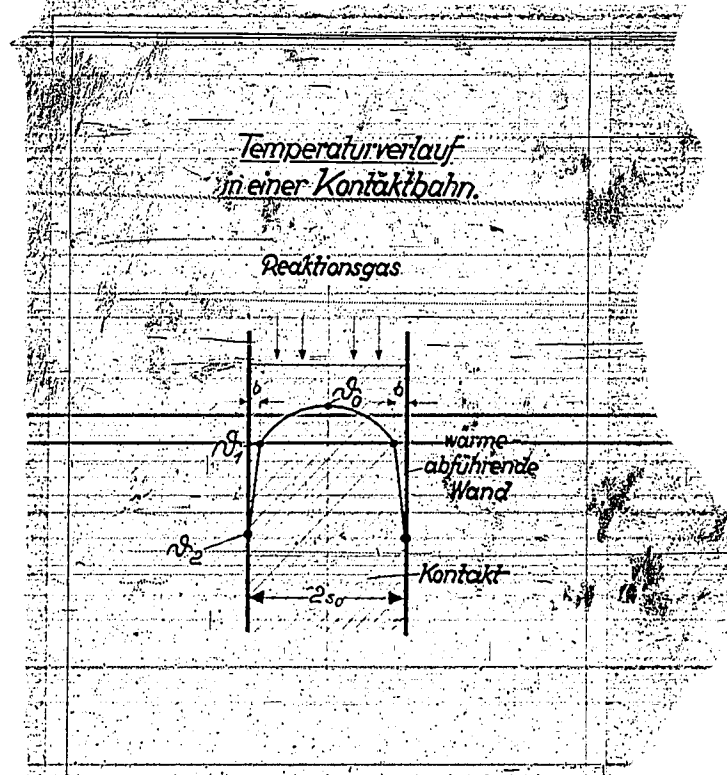
	Seite
<u>I. Einleitung</u>	1
<u>II. Die gebräuchlichsten Bauarten von Reaktionsöfen</u>	3
a) Plattenöfen	3
b) Innenkontaktröhrenöfen	4
c) Außenkontaktröhrenöfen	5
d) Ringraumöfen	6
<u>III. Theoretische Berechnungsgrundlagen</u>	7
a) Der Kontakt befindet sich zwischen parallelen ebenen Kühlflächen.	7
b) Der Kontakt befindet sich in einem Rohr, das von Kühlmedium umgeben ist.	10
c) Der Kontakt ist in einer konzentrischen Schicht um das Kühlrohr angebracht.	12
d) Der Kontakt befindet sich zwischen zwei kreisförmigen äquidistanten Kühlflächen.	16
<u>IV. Diskussion</u>	18
A) Vergleich einzelner Kontaktbahnen	18
a) Gleichwertige Kontaktraumquerschnitte	18
b) Kühlflächen	20
B) Vergleich von Reaktionsöfen	21
a) Kühlflächenbedarf der verschiedenen Bauarten	21
b) Raumausnutzung der verschiedenen Bauarten	27
<u>V. Zusammenfassung.</u>	29

Bei katalytischen Reaktionen ist die Einhaltung bestimmter Temperaturen sehr wichtig. Für verschiedene Grundformen von Reaktionsöfen werden Berechnungsunterlagen für die Abmessungen des Kontaktraumes entwickelt und die einzelnen Bauarten miteinander verglichen.

### I. Einleitung.

Eine Reihe von katalytischen Reaktionen, die in der Gasphase vor sich gehen, sind an sehr enge Temperaturgrenzen gebunden. Werden diese Temperaturen nicht eingehalten, so verläuft der Prozeß in anderer Richtung als gewünscht und die Ausbeute sinkt stark ab. Man hat zur Beherrschung derartiger temperaturempfindlicher Umsetzungen Öfen gebaut, bei denen der Kontakt in einzelnen Bahnen von sehr geringer Stärke zwischen gekühlten wärmeabführenden Wänden angebracht wird.

Der Temperaturverlauf in einer solchen Kontaktbahn ist für eine exotherme Umsetzung aus Abb. 1 zu ersehen.



55171

Abb. 1 Temperaturverlauf in  
einer Kontaktbahn.

Durch eine Kontaktschicht von der Breite  $2 \cdot s_0$  strömt von oben nach unten das Reaktionsgas. Nimmt man an, daß in jedem Volumenelement eine gleich große Wärmemenge erzeugt und auch an die Wand abgeführt wird, so dient, abgese-

hen von einer kurzen Anlaufstrecke am Ofeneingang, die Reaktionswärme nicht zur Temperaturerhöhung des Gases. Die Temperatur auf einer Parallelen zur Achse ist durch den ganzen Ofen hindurch die gleiche. In der Mitte der Strombahn herrscht die Temperatur  $\mathcal{R}_0$ . Durch Wärmeableitung gegen die Wand fällt die Temperatur parabelförmig ab und erreicht in der Nähe der Kühlfläche den Wert  $\mathcal{R}_1$ . In einer verhältnismäßig schmalen Randzone von der Breite  $b$  erfolgt der Wärmeübergang an die Wand mit einem Temperaturgefälle  $(\mathcal{R}_1 - \mathcal{R}_2)$ . Da in der Literatur für die Bestimmung der Wärmeübergangszahlen von strömenden Gasen an eine Wand in mit Kontakt gefüllten Räumen nur sehr unvollkommene Unterlagen zu finden sind, und außerdem die schmale Randzone infolge ihrer tieferen Temperatur vermutlich ohne wesentlichen Einfluß auf die Reaktion ist, wurde den folgenden Betrachtungen und Berechnungen nur der Temperaturabfall  $(\mathcal{R}_0 - \mathcal{R}_1)$  durch Wärmeleitung innerhalb der Kontaktschicht zugrunde gelegt, dagegen der Temperaturverlauf in der Grenzschicht an der Kühlwand vernachlässigt.

Die anschließenden Betrachtungen haben den Zweck Berechnungsunterlagen zu schaffen, mit deren Hilfe folgende Probleme einer Lösung zugeführt werden können:

- 1.) Die Dimensionierung von Reaktionsöfen anhand physikalischer Stoffwerte, wie der Wärmeleitfähigkeit in der Kontaktschicht und einiger durch Versuche zu bestimmender Größen wie der je Volumeneinheit im Kontakt entwickelten Wärmemenge und der zulässigen Temperaturdifferenz in der Kontaktschicht.
- 2.) Die Bemessung von verschieden geformten Kontakträumen mit Hilfe der meist an kleinen Einrohröfen im Laboratorium gefundenen maximal zulässigen Abmessungen des Kontaktrohres.
- 3.) Die Bewertung und Beurteilung der verschiedenen für exotherme und endotherme Reaktionen verwendeten Ofenbauarten in bezug auf den Aufwand an Wärmeaustauschfläche und die Ausnutzung des umbauten Raumes für die Aufnahme von Kontakt.

Wie gesagt, verwendet man im Laboratorium für Versuche in fast allen Fällen Röhrenöfen, bei denen der Kontakt innerhalb des Rohres angeordnet ist. Für diesen Ofentyp liegen die maximal möglichen Abmessungen meist fest, da die größte noch zulässige Rohrweite ermittelt werden kann, indem man die Reaktion in Öfen verschiedenen Durchmessers ausführt.

Der Ofen mit dem Kontakt in den Rohren, im folgenden kurz Innenkontaktrohröfen genannt, wurde infolgedessen den anschließenden Betrachtungen als Norm bzw. als Vergleichsbasis zugrunde gelegt und alle anderen Ofenbauarten darauf bezogen.

## II. Die gebräuchlichsten Bauarten von Reaktionsöfen.

### a) Plattenöfen

Für die Kohlenwasserstoffsynthese wird vorzugsweise ein Ofen benutzt, bei dem der Kontakt zwischen ebenen Kühlflächen gelagert ist (Abb. 2).

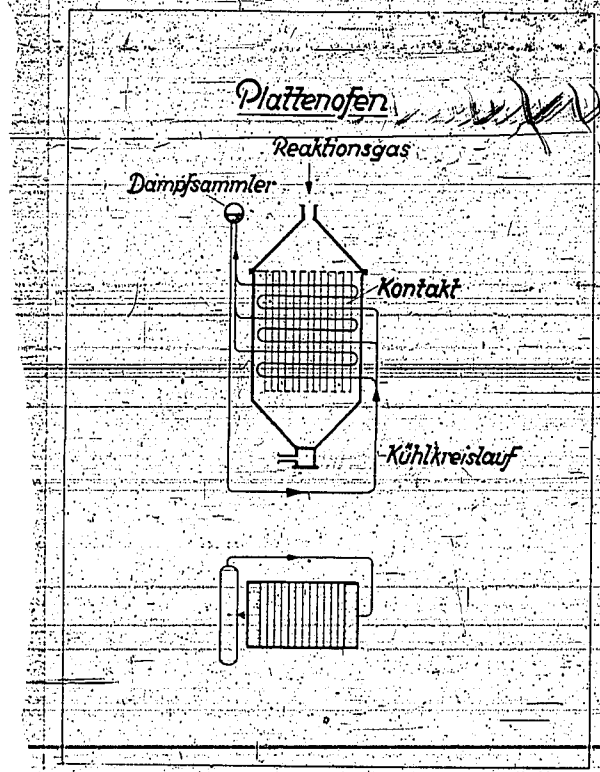


Abb. 2 Plattenofen.

Senkrecht zu den Kühlflächen laufen von einer Kühlflüssigkeit durchströmte Rohre, auf denen diese Kühlflächen durch Aufwalzen oder Aufdornen befestigt sind. Der Wärmestrom geht im wesentlichen von dem Kontakt an die Wand und durch die Wand an das Kühlrohr. Dabei kann der Temperaturabfall in der Wand infolge der geringen Wärmebelastungen vernachlässigt werden. Als Kühlmittel wird vorwiegend verdampfendes Wasser benutzt. Die Trennung zwischen Wasser und Dampf erfolgt in einer Overtrommel, aus welcher der Dampf abgezogen und in welche neues Speisewasser eingeführt wird. Das Synthesegas tritt oben in den Kontakt ein und wird durch die Kühlfläche in eine entsprechende Anzahl Teilströme zerlegt. Unten verläßt das nicht umgesetzte Gas zusammen mit den Reaktionsprodukten den Ofen. Der Ofen stellt also praktisch ein Rippenrohr dar

mit sehr großen Rippen, welche von einer ganzen Anzahl von parallelen Rohren durchdrungen sind.

b) Innenkontaktröhrenofen.

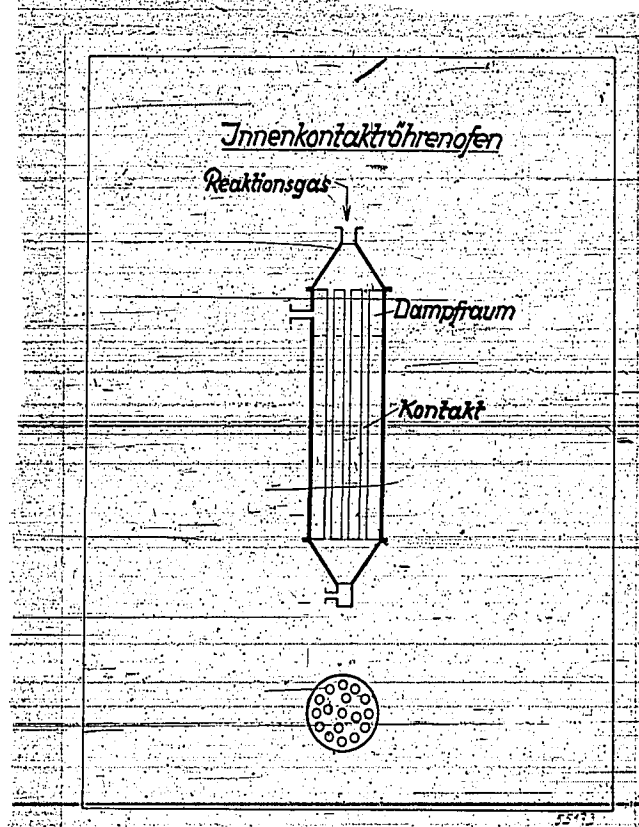


Abb. 3 Innenkontaktröhrenofen.

Bei dieser Bauart wird eine Anzahl von Rohren, die mit Kontakt gefüllt sind, parallel geschaltet, indem man sie oben und unten in einen Rohrbo-  
den einwalzt oder einschweißt. Um die Rohre befindet sich die verdampfende  
Kühlflüssigkeit, die durch einen druckfesten Mantel umschlossen ist. Der  
Gasstrom geht von oben nach unten durch den Reaktionsraum. Der Ofen kann,  
wie im Fall a, einen eigenen Dampfsammler erhalten oder der Dampfraum  
wird, wie auf Abb. 3 gezeichnet, in den eigentlichen Ofenmantel hineinkon-  
struiert. So weit der Dampfraum reicht, dürfen die Rohre nicht mit Kon-  
takt gefüllt sein, da sonst Überhitzungen erfolgen. Dieser Teil der Röh-  
re dient dann zur Gasvorheizung auf Synthesetemperatur. Praktisch stellt  
dieser Ofentyp nur die zweckmäßig durchgebildete Parallelschaltung einer  
entsprechenden Anzahl von Einrohröfen, wie sie im Laboratorium verwendet  
werden, dar.

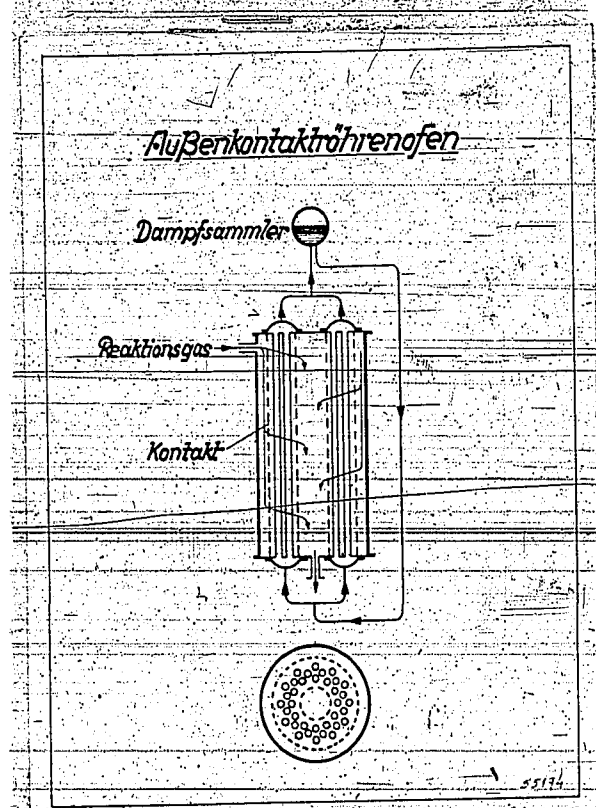
c) Außenkontaktröhrenofen.

Abb. 4 Außenkontaktröhrenofen

Man kann aber auch das Kühlmittel durch die Rohre fließen lassen und den Kontakt um die Rohre anordnen und erhält dadurch, wie auf Abb. 4 gezeigt, den Außenkontaktröhrenofen. Die Rohre sind bei der gezeichneten Ausführung senkrecht angebracht. Das Synthesegas fließt aus einem Ringraum in horizontaler Richtung durch die Kontaktschicht und wird aus einem kreisförmigen Sammelraum in der Mitte des Ofens zusammen mit dem Reaktionsprodukt nach unten abgezogen. Der Kühlkreislauf bietet gegenüber den besprochenen Ausführungsformen nichts neues.

## d) Ringraumofen

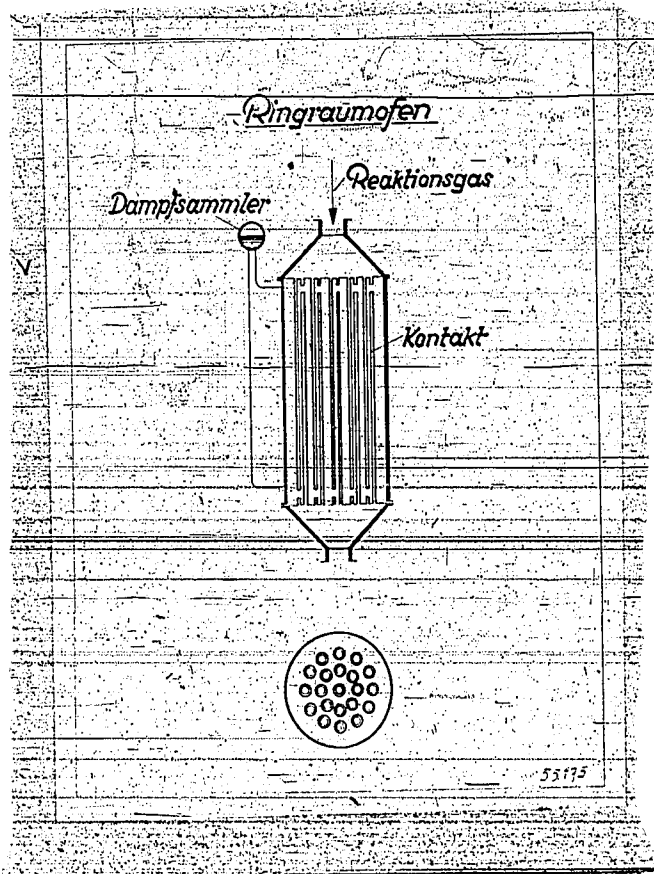


Abb. 5 Ringraumofen

An Stelle der unter b beschriebenen Kontaktanordnung in Rohren kann man den Katalysator auch in Ringräume einfüllen, welche durch zwei konzentrische Rohre gebildet werden. Die Kühlflüssigkeit befindet sich dann sowohl in dem inneren, als auch um das äußere Rohr. Letzteres wird oben und unten in einen Boden eingeschweißt. Im übrigen zeigt der Ofen den gleichen Aufbau, wie der unter b beschriebene Innenkontaktröhrenofen.

Die aufgeführten Ofentypen stellen die heute für katalytische Reaktionen gebräuchlichsten Formen dar. Sie sollen den folgenden Berechnungen zugrunde gelegt werden, vor allem, weil die Querschnittsformen des Kontaktraumes so einfach sind oder auf so einfache Grundformen zurückgeführt werden können, daß sie der Rechnung zugänglich sind. Alle anderen mehr oder weniger gesuchten Bauformen spielen eine untergeordnete Rolle und sollen außer Betracht bleiben. Es wird allerdings möglich sein, sich anhand der Rechnungs- und Kurvenunterlagen ein Bild über ihren Wert zu machen und



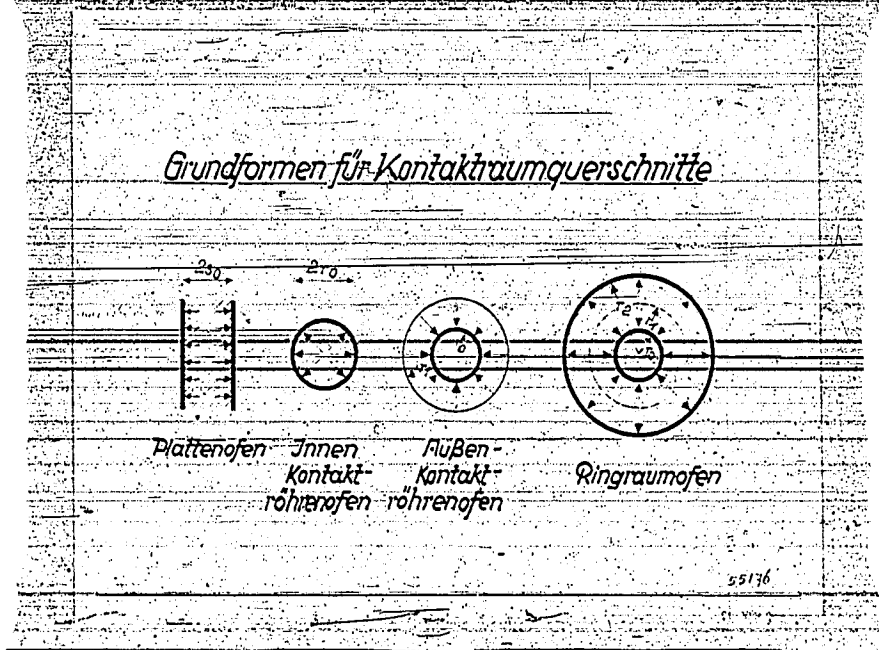
evtl. auch für solche Öfen eine überschlägige Dimensionierung vorzunehmen.

Ferner sollen die Betrachtungen auf exotherme Vorgänge beschränkt bleiben. Sie gelten aber grundsätzlich unter Umkehrung des Vorzeichens auch für endotherme Reaktionen.

III. Theoretische Berechnungsgrundlagen.

Die beschriebenen Ofentypen lassen sich auf folgende in Abb.6 gezeichneten Querschnittsformen zurückführen:

1. Rechteckiger Kontaktquerschnitt (Plattenofen). Der Wärmestrom geht von der Mitte gegen die beiden begrenzenden Kühlwände.
2. Kreisförmiger Kontaktquerschnitt (Innenkontaktröhrenofen). Wärmestrom radial zur Kühlfläche.
3. Kreisringförmiger Kontaktquerschnitt (Außenkontaktröhrenofen). Kontakt in Ringform um ein Kühlrohr angeordnet.
4. Kreisringförmiger Kontaktquerschnitt (Ringraumofen). Kontakt zwischen zwei konzentrischen Kühlflächen.



Der Wärmefluß ist durch die eingezeichneten Pfeile angegeben.

Abb.6 Grundformen für Kontaktraumquerschnitte.

a. Der Kontakt befindet sich zwischen parallelen ebenen Kühlflächen (Plattenofen)

Es bedeuten:

- $2 s_0$       den Kühlflächenabstand in mtr.
- $\theta$           die Temperatur in  $^{\circ}C$

- $\lambda$  die Wärmeleitzahl in  $\text{kal/mh}^\circ\text{C}$  (Es ist eine mittlere Wärmeleitzahl einzusetzen, welche die Wärmeleitung im Kontakt und im Gas berücksichtigt).
- $q$  die bei der Reaktion erzeugte Wärme in  $\text{kal/m}^2$  Kontaktraum,  $h$
- $\Delta t$  die zulässige Temperaturdifferenz in  $^\circ\text{C}$  zwischen Mitte Kontaktschicht und Kühlfläche =  $\tau_0 - \tau_1$

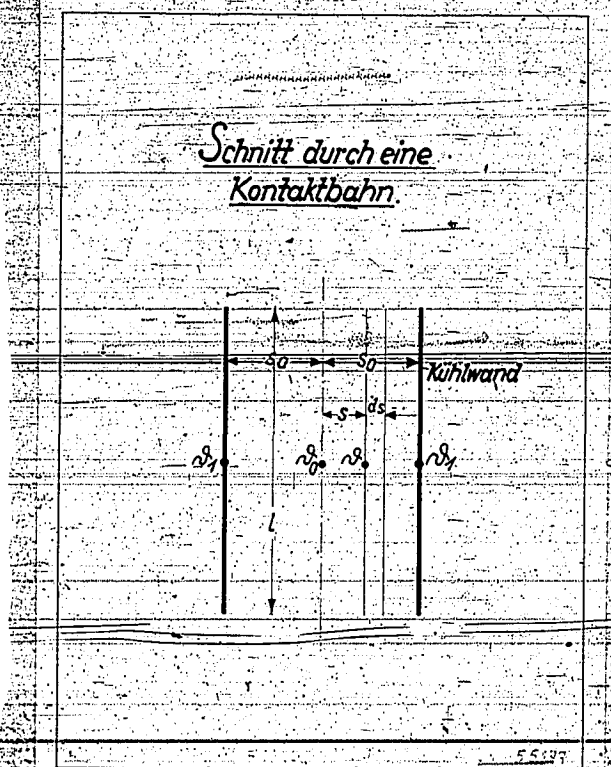


Abb. 7 Schnitt durch eine Kontakttasche.

Es wird in allen Fällen angenommen, daß die Oberflächentemperatur der Kühlwände konstant ist.

Die im Volumenelement  $l \cdot ds \cdot 1$  erzeugte Wärme ist dann:

$$dQ = l \cdot ds \cdot q \quad (1)$$

Die Wärme  $dQ'$ , die aus dem Inneren dem Volumenelement zugeführt wird, ergibt sich zu:

$$dQ' = -\lambda \cdot l \cdot \frac{d\tau}{ds} \quad (2)$$

Die Wärme  $dQ''$ , die aus dem Volumenelement abströmt, ist:

$$dQ'' = -\lambda \cdot l \cdot \frac{d\tau}{ds} - \lambda \left( l \cdot \frac{d}{ds} \left( \frac{d\tau}{ds} \right) \right) \cdot ds \quad (3)$$

Die im Volumenelement erzeugte Wärme beträgt:

$$dQ = dQ'' - dQ' \quad (4)$$

Aus Gleichung 1 und 4 erhält man:

$$l ds \cdot q = -\lambda \cdot l \cdot \frac{d\theta}{ds} + da \quad (5)$$

$$q \cdot s = -\lambda \cdot \frac{d\theta}{ds} + a_1 \quad (6)$$

Die Integrationskonstante  $C_1$  ergibt sich durch Einsetzen der Grenzbedingung

für  $s = 0$ , wird  $\frac{d\theta}{ds} = 0$  und damit  $C_1 = 0$

$$q \cdot s \cdot ds = -\lambda \cdot d\theta \quad (7)$$

$$\frac{q}{\lambda} \cdot \frac{s^2}{2} = -\theta + C_2 \quad (8)$$

für  $s = s_0$  erhält man  $\theta = \theta_1$

Die Integrationskonstante  $C_2$  wird also:

$$C_2 = \frac{q}{\lambda} \cdot \frac{s_0^2}{2} + \theta_1 \quad (9)$$

Gleichung 9 in 8 eingesetzt ergibt:

$$\theta = \theta_1 + \frac{q}{2\lambda} \cdot (s_0^2 - s^2) \quad (10)$$

Die Maximaltemperatur  $\theta_0$  erhält man für  $s = 0$  und damit wird:

$$s_0 = \sqrt{2 \cdot \frac{\lambda}{q} \cdot (\theta_0 - \theta_1)} \quad (11)$$

Setzt man  $(\theta_0 - \theta_1) = \Delta t$  der zeitlichen Temperaturdifferenz so ergibt sich der halbe Plattenabstand zu:

$$s_0 = 1.414 \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{q} \cdot \Delta t} \quad (12)$$

oder die auftretende Temperaturdifferenz in der Kontaktschicht ist:

$$\Delta t = \frac{s_0^2}{2} \cdot \frac{q}{\lambda} \quad (13)$$

b. Der Kontakt befindet sich in einem Rohr, das vom Kühlmedium umgeben ist.  
 (Innenkontaktröhrenden)

Es bedeutet:

$r_0$  = Radius des Rohres in m.

Die Bezeichnung der übrigen Größen ist wie unter a. gewählt worden.

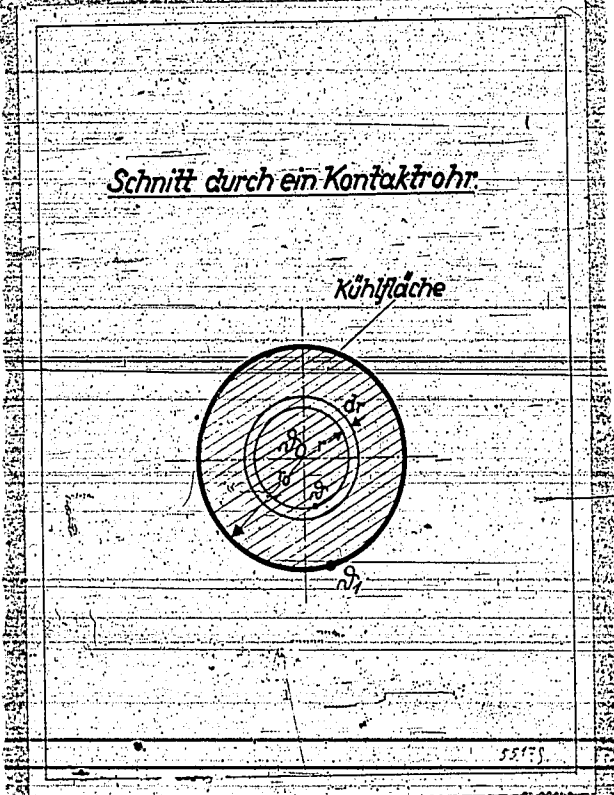


Abb. 8 Schnitt durch ein Kontaktröhrenden.

Die in einem Volumenelement erzeugte Wärme ist:

$$dQ = 2r \cdot \pi \cdot dr \cdot q \quad (14)$$

Die Wärme, die aus dem Inneren des Rohres dem Volumenelement zugeführt wird, ist:

$$dQ' = -\lambda \cdot 2r \cdot \pi \cdot \frac{d\theta}{dr} \quad (15)$$

und die Wärme, die aus dem Volumenelement abströmt:

$$dQ'' = -\lambda \cdot 2r \cdot \pi \cdot \frac{d\theta}{dr} - \lambda \cdot 2\pi \cdot r \cdot \frac{d(r \cdot \frac{d\theta}{dr})}{dr} \cdot dr \quad (16)$$

Die im Volumenelement erzeugte Wärme ist dann:

$$dQ = dQ'' - dQ' \quad (17)$$

$$dq = -\lambda \cdot 2\pi r \cdot \frac{d\theta}{dr} \cdot dr \quad (18)$$

oder in Gleichung 14 eingesetzt:

$$2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \cdot q = -\lambda \cdot 2\pi r \cdot \frac{d\theta}{dr} \cdot dr \quad (19)$$

$$q \cdot r \cdot dr = -\lambda \cdot r \cdot \frac{d\theta}{dr} \quad (20)$$

$$q \cdot \frac{r^2}{2} = -\lambda \cdot r \cdot \frac{d\theta}{dr} + C_1 \quad (21)$$

Die Integrationskonstante  $C_1$  erhält man durch Einsetzen der Grenzbedingung:

für  $r = 0$ , wird  $\frac{d\theta}{dr} = 0$ , folglich  $C_1 = 0$

Es wird also:

$$q \cdot \frac{r^2}{2} + \lambda r = -\lambda \cdot r \cdot \frac{d\theta}{dr} \quad (22)$$

$$\frac{q \cdot r^2}{2\lambda} = -r - \frac{d\theta}{dr} \quad (23)$$

für  $r = r_0$ ,  $\theta = \theta_1$  ergibt sich die Integrationskonstante  $C_2$  zu:

$$C_2 = \frac{q \cdot r_0^2}{2\lambda} + \lambda r_0 \quad (24)$$

Die Temperatur an einer Stelle mit dem Radius  $r$  wird dann:

$$\theta = \theta_1 + \frac{q}{4\lambda} \cdot \left( r_0^2 - \frac{r^2}{2} \right) \quad (25)$$

Die Maximaltemperatur stellt sich bei  $r = 0$  ein, und ergibt sich zu:

$$\theta_{\max} = \theta_0 = \theta_1 + \frac{q}{4\lambda} \cdot r_0^2 \quad (26)$$

oder 
$$r_0 = \sqrt{\frac{4\lambda}{q} \cdot (\theta_0 - \theta_1)}$$

setzt man  $\theta_0 - \theta_1 = \Delta t$

Der Radius des Kontaktrohres wird dann:

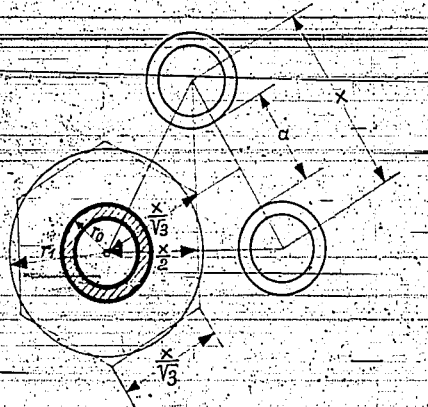
$$r_0 = 2 \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{q} \cdot \Delta t}$$

oder die auftretende Temperaturdifferenz zwischen Rohrmittle und Wand ist:

$$\Delta t = \frac{r_0^2}{4} \cdot \frac{q}{\lambda} \quad (29)$$

- c. Der Kontakt ist in einer konzentrischen Schicht um das Kühlrohr angebracht.  
(Außenkontaktröhrenofen)

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



55179

Abb. 9 Röhrenofen mit dem Kontakt um die von  
der Kühlflüssigkeit durchströmten Rohre

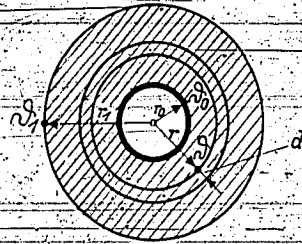
Ordnet man die Rohre in der allgemein üblichen Teilung an, wie auf Abb. 9  
gezeigt ist, so strömt die Wärme dem Kühlrohr aus einem Kontaktquerschnitt  
zu, der ein reguläres Sechseck mit einem kreisförmigen Ausschnitt bildet.  
Die Seitenlänge des Sechsecks beträgt  $x$  wenn die Rohrteilung mit  $x$   
bezeichnet wird,

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

$$r_1 = \frac{r_0 + \sqrt{r_0^2 + 2 \lambda \Delta t}}{2} = 0,5386 \cdot r_0 \text{ annimmt.}$$

Der Kontaktraum des Rohr erhält damit kreisringförmigen Querschnitt und für diesen vereinfachten Fall gilt die nachstehende Rechnung. Außer den bereits oben angegebenen Bezeichnungen sollen bedeuten:

*Kühlrohr mit kreisringförmiger Kontaktschicht.*



**Abb. 10** Kühlrohr mit kreisringförmiger Kontaktschicht.

$r_0$  = den äußeren Radius des Kühlrohres gleich dem inneren Radius  $a$ , Kontaktschicht in  $m$

$r_1$  = den äußeren Radius der Kontaktschicht

$\Delta t = \theta_1 - \theta_0$  Temperaturdifferenz in der Kontaktschicht

Die in einem Volumenelement erzeugte Wärme ist dann:

$$dQ = 2 \pi r \cdot dr \cdot q \tag{30}$$

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

$$dQ_1 = \lambda \cdot 2 \pi r \cdot \frac{d\theta}{dr} \tag{31}$$

und die Wärme, die aus dem Volumenelement abstrahlt:

$$dQ'' = -\lambda \cdot 2\pi r \cdot \frac{d\vartheta}{dr} = -\lambda \cdot 2\pi \cdot \left\{ r \cdot \frac{d\vartheta}{dr} \right\} \cdot dr \quad (32)$$

die im Volumenelement erzeugte Wärme ist:

$$dQ = dQ'' - dQ' \quad (33)$$

$$= -\lambda \cdot 2\pi \cdot \left\{ r \cdot \frac{d\vartheta}{dr} \right\} \cdot dr \quad (34)$$

oder in Gleichung 30 eingesetzt:

$$2\pi r \cdot dr \cdot q = -\lambda \cdot 2\pi \cdot \left\{ r \cdot \frac{d\vartheta}{dr} \right\} \cdot dr \quad (35)$$

$$\int q \cdot r \cdot dr = -\int \lambda \cdot \left\{ r \cdot \frac{d\vartheta}{dr} \right\} \cdot dr \quad (36)$$

$$q \cdot \frac{r^2}{2} = -\lambda \cdot r \cdot \frac{d\vartheta}{dr} + C_1 \quad (37)$$

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

damit ergibt sich die Integrationskonstante  $C_1$  zu:

$$C_1 = q \cdot \frac{r_1^2}{2} \quad (38)$$

In Gleichung 37 eingesetzt erhält man:

$$q \cdot \frac{r^2}{2} = -\lambda \cdot r \cdot \frac{d\vartheta}{dr} + q \cdot \frac{r_1^2}{2} \quad (39)$$

$$\lambda \cdot r \cdot \frac{d\vartheta}{dr} = \frac{q}{2} \cdot \left\{ r_1^2 - r^2 \right\} \quad (40)$$

$$\lambda \cdot \int d\vartheta = \frac{q}{2} \cdot \left\{ \frac{r_1^2}{r} - r \right\} \cdot dr \quad (41)$$

$$\lambda \cdot \vartheta = \frac{q}{2} \cdot \left\{ r_1^2 \cdot \ln r - \frac{r^2}{2} \right\} + C_2 \quad (42)$$

Als Grenzbedingung ergibt sich für  $r = r_0$ ,  $\vartheta = \vartheta_0$

$$\lambda \cdot \vartheta_0 = \frac{q}{2} \cdot \left\{ r_1^2 \cdot \ln r_0 - \frac{r_0^2}{2} \right\} + C_2 \quad (43)$$



oder die Integrationskonstante  $C_2$  ist

$$C_2 = \lambda + \alpha b_0 - \frac{q}{2} \cdot \left( r_1^2 \ln r_0 - \frac{r_0^2}{2} \right) \quad (44)$$

In Gleichung 42 eingesetzt erhält man

$$\lambda \cdot (\alpha b - \alpha b_0) = \frac{q}{2} \cdot \left( \frac{r_0^2}{2} - \frac{r_1^2}{2} - 1 + \ln \frac{r_1}{r_0} \right) \quad (45)$$

für  $\alpha b = \alpha b_1$  wird  $r = r_1$  (46)

$$\lambda \cdot \Delta t = \frac{q}{2} \cdot \left( \frac{r_0^2}{2} - \frac{r_1^2}{2} + r_1^2 \cdot \ln \frac{r_1}{r_0} \right) \quad (47)$$

$$\lambda \cdot \Delta t = \frac{q}{2} \cdot \left( \frac{r_0^2}{2} - \frac{r_1^2}{2} + r_1^2 \cdot \ln \frac{r_1}{r_0} \right) + \alpha b_0 \quad (48)$$

Die in der Kontaktregion auftretende Temperaturdifferenz be-  
trägt demnach

$$\Delta t = \frac{q}{4\lambda} \cdot \left[ r_1^2 \cdot \left( 2 \ln \frac{r_1}{r_0} - 1 \right) + r_0^2 \right] \quad (49)$$

aus Gleichung 48 kann, wenn die Wärmeleitfähigkeit pro m Kontaktraum  
erzeugte Wärme und der Radius des Kühlrohres bekannt ist, für eine vor-  
geschriebene Temperaturdifferenz  $\Delta t$  der äußere Radius des Kontakt-  
ringraumes und damit die Breite der Kontaktschicht ( $r_1 - r_0$ ) durch  
Probieren gefunden werden. Die Gleichung 48 kann also im Gegensatz zu  
Gleichung 12 für den Plattenofen und Gleichung 28 für den Röhrenofen  
mit dem Kontakt in den Rohren nicht exact gelöst werden.

Die abgeleitete Formel 48 gilt unter der Voraussetzung, daß das Reaktions-  
gas parallel zu den Kühlrohren strömt. Für den Fall, daß die Strömung  
senkrecht zu den Rohren verläuft, sind die Verhältnisse günstiger, da  
das Gas von der kalten Wand durch eine heiße Zone und dann wieder an die  
kalte Wand fließt und damit zusätzlich Wärme aus dem Reaktionsraum her-  
ausfördert. Rechnerisch ist dieser Fall jedoch nicht zu erfassen und  
kann höchstens durch Zuschläge zu dem nach Gleichung 48 errechneten  
Kühlrohrabstand erfaßt werden.

Setzt man in Gleichung 48  $r_1 = r_0 + s_0$  wobei  $s_0$  die Breite der Kontaktschicht ist, so ergibt sich:

$$\frac{4 \cdot \lambda \cdot \Delta t}{q} = (r_0 + s_0)^2 \cdot \left( 2 \cdot \ln \frac{r_0 + s_0}{r_0} - 1 \right) + r_0^2 \quad (50)$$

oder

$$\frac{4 \cdot \lambda \cdot \Delta t}{q} = \left[ 2 r_0^2 \cdot \ln \frac{r_0 + s_0}{r_0} - 2 r_0 \cdot s_0 \right] + \left[ 4 r_0 \cdot s_0 \cdot \ln \frac{r_0 + s_0}{r_0} \right] + \left[ 2 s_0^2 \cdot \ln \frac{r_0 + s_0}{r_0} \right] - s_0^2 \quad (51)$$

für  $r_0 = \infty$  erhält man:

$$\lim_{r_0 \rightarrow \infty} \frac{4 \cdot \lambda \cdot \Delta t}{q} = -s_0^2 + 4s_0^2 + 0 - s_0^2 \quad (52)$$

$$\text{oder } \lim_{r_0 \rightarrow \infty} s_0 = 1,414 \cdot \sqrt{\frac{\lambda \cdot \Delta t}{q}} \quad (12)$$

3.A. Für ein unendlich großes Kühlrohr geht Gleichung 48 über in die Gleichung 12 für die Kontaktanordnung zwischen parallelen ebenen Wänden.

#### d. Das Kontakt befindet sich zwischen zwei kreisförmigen konzentrischen Kühlflächen. (Ringraumofen)

Wenn man den Katalysator in einem Kreisringquerschnitt mit äußerer und innerer Kühlfläche anordnet, kann man den Kontaktraum in zwei Zonen von der Breite  $(r_1 - r_2)$  und  $(r_2 - r_1)$  einteilen. Abb. 11. Aus der inneren Zone fließt die Wärme gegen das innere Kühlrohr. Diese Zone stellt praktisch einen Außenkontaktrohröfen mit einem Kühlrohr vom Radius  $r_1$  und einer Kontaktraumbreite  $(r_2 - r_1)$  dar. Die Berechnung kann nach der für den Außenkontaktrohröfen abgeleiteten Gleichung erfolgen. Die zweite Zone von der Breite  $(r_1 - r_2)$  gibt die Wärme an das äußere Kühlrohr ab.

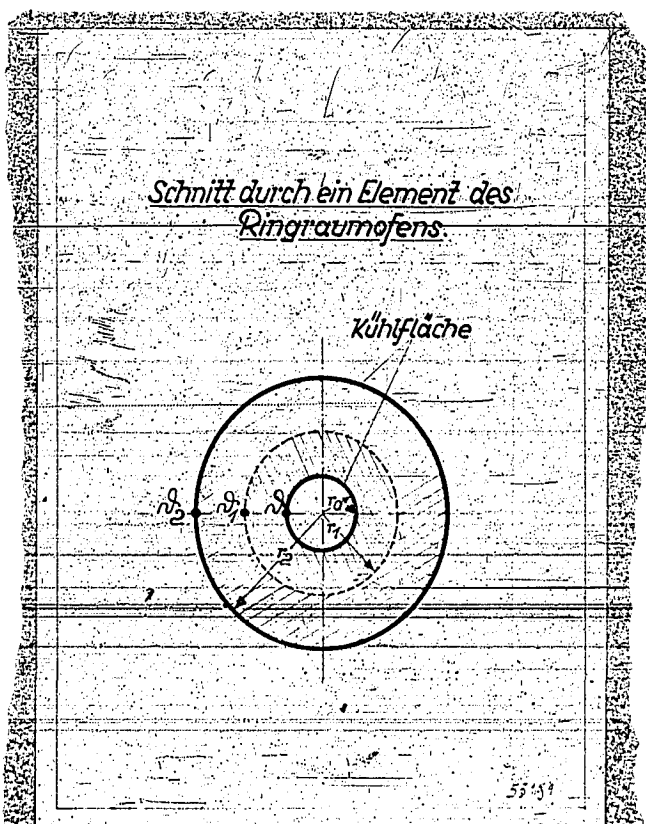


Abb. 11 Schnitt durch ein Element des Ringraumofens.

Mit den gleichen Bezeichnungen wie in den früheren Ableitungen und dem Radius  $r_2$  für das äußere Kühlrohr erhält man für die äußere Zone die Beziehung

$$r_1^2 \cdot \left( 2 \cdot \ln \frac{r_1}{r_2} - 1 \right) + r_2^2 = \frac{4 \cdot \Delta t \cdot \lambda}{\pi} \quad (53)$$

oder der zulässige Temperaturunterschied  $\Delta t$  ist

$$\Delta t = \frac{\pi}{4 \lambda} \cdot \left[ r_1^2 \cdot \left( 2 \cdot \ln \frac{r_1}{r_2} - 1 \right) + r_2^2 \right] \quad (54)$$

Mit Hilfe von Gleichung 54 kann man die Abmessungen der äußeren Zone, mit Gleichung 48 diejenigen der inneren Zone des Ringraumofens berechnen und durch Addition der beiden Werte die gesamte Breite  $r_2 - r_0$  bestimmen.

Setzt man in Gleichung 53  $r_1 = 0$ , so erhält man:

$$r_2 = 2 \cdot \sqrt{\frac{\Delta t \cdot \lambda}{\pi}} \quad (28)$$

d.h. die Gleichung geht über in diejenige für das vollständig mit Kontakt gefüllte Rohr des Innenkontaktröhrenofens.

#### IV. Diskussion.

Für die Beurteilung der einzelnen Bauformen stehen demnach folgende Gleichungen zur Verfügung:

$$\text{Plattenofen} \quad r_0 = 1,411 \cdot \sqrt{\frac{\lambda \cdot \Delta t}{g}} \quad (12)$$

$$\text{Innenkontaktröhrenofen} \quad r_0 = 2 \cdot \sqrt{\frac{\lambda \cdot \Delta t}{g}} \quad (26)$$

Außenkontaktröhrenofen

$$r_1^2 \cdot \left(2 \cdot \ln \frac{r_1}{r_0} - 1\right) + \frac{r_0^2}{g} = \frac{\lambda \cdot \Delta t}{g} \quad (48)$$

Ringraumofen

$$\text{innere Zone} \quad r_1^2 \cdot \left(2 \cdot \ln \frac{r_1}{r_0} - 1\right) + \frac{r_0^2}{g} = \frac{\lambda \cdot \Delta t}{g} \quad (49)$$

$$\text{äußere Zone} \quad r_2^2 \cdot \left(2 \cdot \ln \frac{r_2}{r_0} - 1\right) + \frac{r_0^2}{g} = \frac{\lambda \cdot \Delta t}{g} \quad (50)$$

#### A. Vergleich einzelner Kontaktbauarten

##### a. Gleichwertige Kontaktraumquerschnitte

Setzt man in jede dieser Gleichungen für  $\lambda$ ,  $g$  und  $\Delta t$  die selben Werte ein, so erhält man für die Kontaktbauarten Abmessungen, die einander gleichwertig sind, d.h. Kontaktstärken in denen das gleiche Temperaturgefälle herrscht. Für angenommene Werte von  $\lambda$ ,  $g$  und

$\Delta t$  wurden der Kühlflächenabstand des Plattenofens, der Durchmesser eines Rohres mit Innenkontakt, die Kontaktraumbreite  $r_1 - r_0$  eines Rohres mit Außenkontakt und die Ringraumbreite  $r_2 - r_0$  einer

zwischen zwei konzentrischen Kühlrohren gelagerten Katalysatormasse berechnet und in Abb. 12 eingetragen. Als Abszisse wurde der lichte Durchmesser des Rohren mit Innenkontakt gewählt und als Ordinaten darüber die gleichwertigen Abmessungen der anderen Bauarten aufgetragen. Dabei wurde angenommen, daß das Kühlrohr mit Außenkontakt und das innere Kühlrohr für die Ringraumanordnung des Katalysators jeweils die gleichen Abmessungen haben sollen wie das Rohr mit dem Innenkontakt.

Wie aus der Gegenüberstellung von Gleichung 12 mit Gleichung 28 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. 12

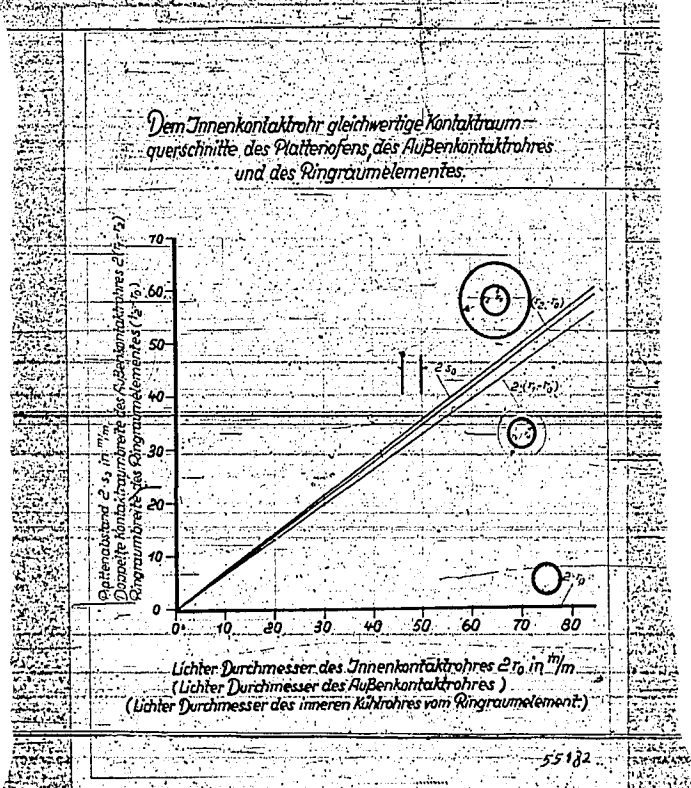


Abb. 12 Dem Innenkontaktrohr gleichwertige Kontaktraumquerschnitte des Plattenofens, des Außenkontaktrohres und des Ringraumelementes.

eine gerade Linie mit dem  $\tan$  des Neigungswinkels 1,41.

Die doppelte Kontakttraumbreite  $2 \cdot (r_1 - r_0)$  aus Gleichung 48 für das Rohr mit Außenkontakt ergibt etwas kleinere Werte, als der gleichwertige Plattenabstand  $2 \cdot e_0$ . Die Kurve für die doppelte Kontakttraumbreite liegt demzufolge in Abb. 12 unter der Geraden für den Plattenabstand.

In die gleiche Abb. ist noch die Ringraumbreite  $r_2 - r_0$  bei Anordnung des Katalysatorrohres zwischen zwei konzentrischen Kühlrohren eingetragen.

Die Werte, die ebenfalls fast geradlinig mit dem Durchmesser ansteigen, unterscheiden sich nur ganz wenig von denen des Kühlflächenabstandes beim Plattenofen. Beträgt zum Beispiel für ein Rohr mit Innenkontakt der zulässige Rohrdurchmesser 51 mm, so müßte man, um den gleichen Temperaturab-

fall in der Kontaktschicht zu erhalten, einen Plattenofen mit 36 mm Abstand der Kühlwände ein Rohr von 51/57 mm  $\phi$  mit Außenkontakt mit einer Kontaktraumbreite  $(r_1 - r_0) = 16,7$  mm und ein Ringraumelement mit einer Ringraumbreite von 35,4 mm bei einem inneren Kühlrohr von 51/57  $\phi$  ausführen.

Bei den ganzen Untersuchungen wurden normale Siederöhre der Berechnung zugrunde gelegt.

#### b. Kühlflächenvergleich

Mit den aus den Gleichungen 12, 28, 46 u. 53 ermittelten Abmessungen der verschiedenen Querschnittsformen wurden die für 1 m Kontakt sich ergebenden Kühlflächen errechnet und miteinander verglichen. Das Ergebnis ist in Abb. 13

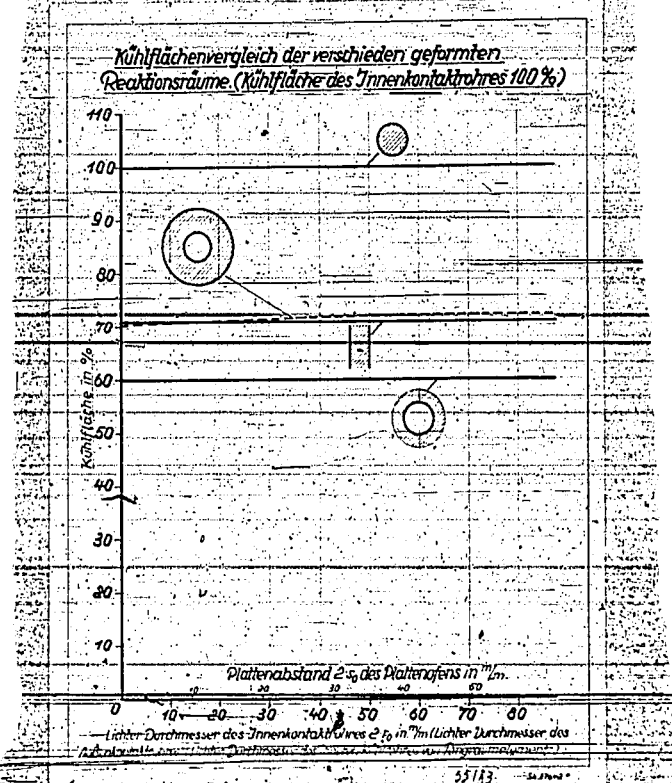


Abb. 13 Kühlflächenvergleich der verschieden geformten Reaktionsräume.

für die verschiedenen Bauarten aufgetragen. Als Abszisse wurde nacheinander der lichte Rohrdurchmesser vom Innenkontaktrrohr, vom Außenkontaktrrohr und vom inneren Rohr des Ringraumelementes bzw. der Plattenabstand der

ebenen Kühlflächen gewählt. Außerdem wurde die Kühlfläche des Innenkontaktröhres aus den weiter oben diskutierten Gründen zu 100 % angenommen und die anderen Teile darauf bezogen.

Man sieht, daß man bei Anordnung des Kontaktes zwischen ebenen Wänden nur etwa 71 % der Kühlfläche des Rohres mit Innenkontakt benötigt und zwar gilt dieses ganz unabhängig von der absoluten Größe des Rohrdurchmessers. Beim Außenkontakt für braucht man ca. 50 % der Kühlfläche gegenüber einem gleich großen Rohr mit Innenkontakt und zwar ebenfalls unabhängig vom Rohrdurchmesser. Berücksichtigt man dabei, daß man beim Rohr mit Innenkontakt infolge der geringeren Wärmeübergangszahl auf der Innenseite den lichten, dagegen beim Rohr mit Außenkontakt den äußeren Durchmesser zur Berechnung der Kühlfläche einzusetzen hat, so weist das Rohr mit Außenkontakt einen Materialbedarf auf, der noch unter 50 % gegenüber demjenigen eines Innenkontaktröhres liegt. Je größer der Rohrdurchmesser ist, umso mehr verschwindet unter der Voraussetzung normaler Siederohre dieser Vorteil, da das Verhältnis zwischen Außen- und Innendurchmesser sich mehr und mehr dem Wert 1 nähert.

Die Kühlfläche des Ringraumelementes in dem untersuchten Bereich beträgt 70 - 75 % von derjenigen des Innenkontaktröhres, hat also ungefähr den gleichen Wert, wie bei der Anordnung des Kontaktes zwischen ebenen Kühlwänden. Die konvexe Fläche des inneren Rohres und die konkave des äußeren Rohres gleichen sich also in dieser Hinsicht aus.

B. Vergleich von Reaktionsöfen

a. Kühlflächenbedarf der verschiedenen Bauarten.

Bei den bisherigen Betrachtungen wurde angenommen, daß es sich um eine einzige Kontaktbahn handelt. Will man ganze Reaktionsöfen betrachten, so ergibt sich für den Plattenofen, den Innenkontaktröhrenofen und den Ringraumofen praktisch eine Parallelschaltung von vielen Einzелеlementen. Beim Außenkontaktröhrenofen kann, wie auf Seite 15 besprochen, die Entfernung  $a$  zwischen zwei Kühlrohren nicht gleich der rechnerisch nach Gleichung 48 ermittelten doppelten Kontaktraumbreite  $2 \cdot (r_1 - r_0)$  sein. Nach Abb. 9 ist die Mittenentfernung zweier Kühlrohre

$$x = 2 \cdot r_0 + a \tag{55}$$

und damit 
$$a = 2 \cdot \left( \frac{r_1}{1.0772} - r_0 \right) \tag{56}$$

Der nach Gleichung 48 ermittelte Wert  $r_1$  für den äußeren Radius der

ringförmigen Kontaktschicht muß also  $\frac{1}{1.0772}$  verkleinert werden, um den Rohrabstand  $a$  nach Gleichung 56 zu erhalten.

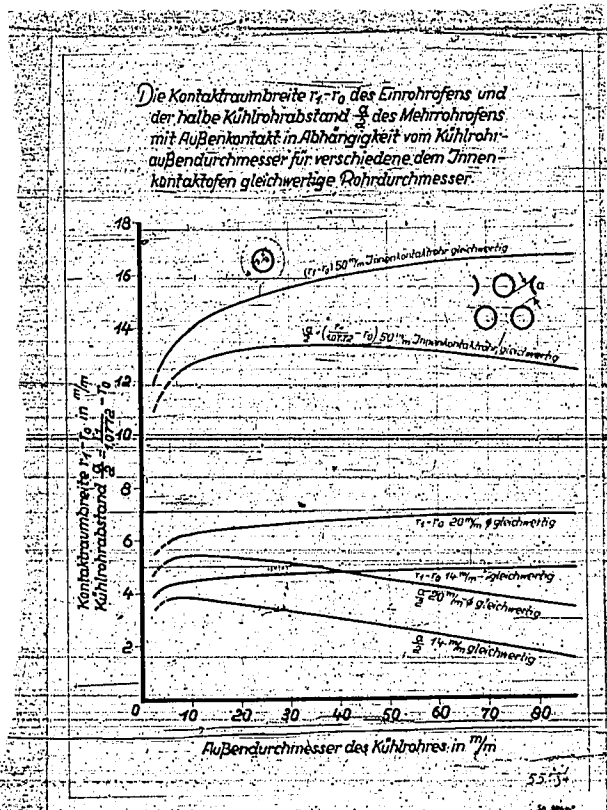


Abb.14 Die Kontaktraumbreite  $r_1 - r_0$  des Einrohrförens und der halbe Kühlrohrabstand  $\frac{B}{2}$  des Mehrrohrförens mit Außenkontakt in Abhängigkeit vom Kühlrohräußendurchmesser für verschiedene, dem Innenkontaktfören gleichwertige Rohrdurchmesser.

In Abb.14 sind die Werte für die Kontaktraumbreite eines einzelnen Rohres mit Außenkontakt nach Gleichung 48 und die reduzierten Werte für den halben Abstand zweier Kühlrohre nach Gleichung 56 eingetragen und zwar für 3 Fälle, in denen der Außenkontaktröhrenfören einem Innenkontaktröhrenfören mit 14 mm, 20 mm und 50 mm Rohren gleichwertig ist. Als Abszissenmaßstab wurde der Außendurchmesser des von Kontakt umgebenen Kühlrohres gewählt.

Die Kontaktraumbreite ( $r_1 - r_0$ ) eines einzelnen Rohres steigt, wie aus Abb. 14 zu ersehen ist, mit zunehmendem Kühlrohrdurchmesser an, um sich asymptotisch dem Wert für den Plattenfören zu nähern, der bei



erreicht wird. Dagegen nimmt der Wert für die halbe Rohr-  
 erweiterung  $\frac{r_1}{r_0} = \frac{r_1}{1,3772 \cdot r_0}$  für den Außenkontaktröhrenofen mit stetig  
 wachsendem Rohrdurchmesser zuerst ab, dann aber wieder zu. Dies ist faktisch  
 zurückzuführen, daß der Unterschied zwischen dem Radius  $r_1$  und der halben  
 Rohrerweiterung  $\frac{r_1}{2}$  (siehe Abb. 9) mit zunehmendem Rohrdurchmesser  
 immer größer wird.

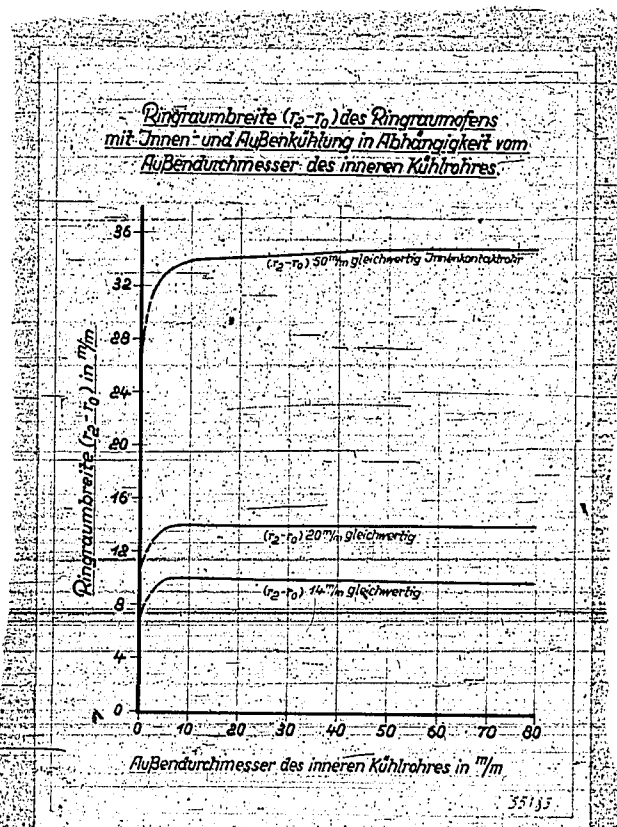
Die vereinfachte Annahme, daß man den einschichtigen Kontaktquerschnitt  
 näherungsweise in einem kreisförmigen Umwandeln kann, gilt um so weniger,  
 je größer man den Kühlrohrdurchmesser wählt, und je strenger die  
 Temperaturbedingungen sind, d.h. je kleiner der Abschlußwert für den  
 Rohrstand ist oder je kleiner der Durchmesser des Innenkontaktröhres  
 ist, dem der Außenkontaktröhrenofen gleichwertig sein soll.

Ein Ofen mit Außenkontakt, der eine gleich gute Wärmeabfuhr hat, wie  
 ein 50 mm Röhrenofen mit Innenkontakt, muß bei Anwendung von Kühlrohr-  
 ren mit 40 mm Außendurchmesser einen Rohrstand von  $2 \cdot \frac{r_1}{2} = 2 \cdot 13,7$   
 mm haben, während man bei Verwendung von 10 mm Kühlrohren einen Rohr-  
 stand von  $2 \cdot 12,6$  mm wählen muß. Die entsprechenden Werte des Hin-  
 röhrenofens mit Außenkontakt sind gleichfalls aus Abb. 14 zu entnehmen  
 und betragen

$$2 \cdot (r_1 - r_0) = 2 \cdot 14,9 \text{ bzw. } 2 \cdot 13,9 \text{ mm.}$$

Man sieht aus Abb. 14, daß der Unterschied zwischen  $(r_1 - r_0)$  und  
 $\frac{r_1}{2}$  um so geringer wird, je kleiner man den Durchmesser des Kühlrohres  
 wählt. Es erscheint also schon nach diesen Betrachtungen als zweckmäßig,  
 einen Außenkontaktofen mit möglichst kleinen Kühlrohren auszurüsten.

In Abb. 15 wurde abhängig vom Außendurchmesser des inneren Kühlrohres  
 für einen Ringraumofen die Ringraumweite aufgetragen und zwar wieder  
 für die 3 Fälle, daß der Ringraumofen einen Innenkontaktröhrenofen mit  
 14, 20 und 50 mm Innem Durchmesser gleichwertig sein soll.



**Abb. 15** Ringraumbreite  $(r_2 - r_0)$  des Ringraumofens mit Innen- und Außenkühlung in Abhängigkeit vom Außendurchmesser des inneren Kühlrohres.

Für den inneren Rohrdurchmesser 0 erhält man als Ringraumbreite die gleichen Werte wie für den Radius des Innenkontaktröhres. Von diesem Grenzwert an steigen die Ringraumbreiten mit wachsendem Durchmesser zuerst schnell, dann langsamer, und sind für größere Durchmesser als 10 mm annähernd konstant und in ihrem absoluten Wert etwa gleich dem Plattenabstand des Plattenofens. Man kann also die verhältnismäßig umständliche Rechnung für den Ringraumofen ersetzen, indem man die Ringraumbreite nach der Formel für den Plattenofen berechnet, ohne daß sich dadurch ein merklicher Fehler einstellt, denn kleinere Durchmesser als 10 mm für das innere Kühlrohr scheiden für großtechnische Ausführungen so wie so aus.

Mit den Kontaktraumabmessungen nach Gleichung 12 u. Gleichung 28 für Platten- und Innenkontaktröhrenofen und den in Abb. 14 u. 15 eingetragenen Werten für den Außenkontaktröhrenofen u. den Ringraumofen wurden die Kühlflächen pro 1 m<sup>2</sup> Kontaktraum ermittelt und in Abb. 16 zusammengestellt.

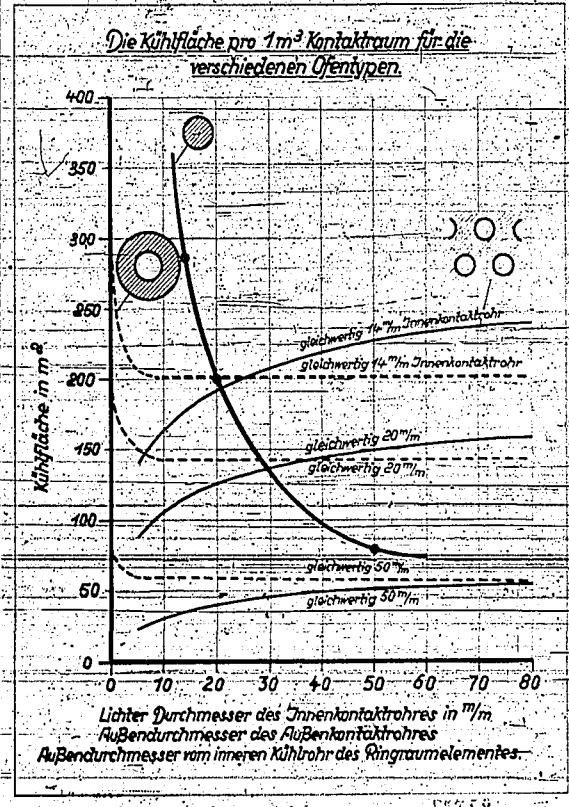


Abb. 15. Die Kühlfläche pro 1 m³ Kontaktraum für die verschiedenen Ofentypen.

Als Anlaß für die Abb. 15 wählte man den Rohrdurchmesser des Kühlrohres vom Außenkontaktofen gleich demjenigen des inneren Kühlrohres vom Ringraumofen und der Größe des inneren Kühlrohres gewählter, während die Ordinate die Kühlfläche pro 1 m³ Kontaktraum genommen wurde.

Man sieht aus dem Diagramm, daß ein 10 mm Innendurchmesser bei 200 mm Außendurchmesser einen Kühlraum von 200 m³ und der gleiche Ofen mit Rohren von 50 mm i. D. weist 50 m³ Kühlfläche pro 1 m³ Kontaktraum. In die gleiche Abb. sind 3 Kurven für den Außenkontaktofen eingezeichnet, die zwar gleichwertig dem 11 mm, 20 mm und 30 mm Innendurchmesser sind. In allen 3 Fällen steigt die Kühlfläche mit steigendem Rohrdurchmesser des Kühlrohres stark an, bleibt aber immer unter dem Wert des entsprechenden gleichwertigen Innenkontaktofens. Der Kühlflächenbedarf ist also beim Außenkontaktofen um so geringer, je kleiner man den Rohrdurchmesser wählt. Man benötigt, wenn man einen, sei es 11 mm Innendurchmesser oder gleichwertigen Außenkontaktofen bauen will, bei Verwendung von 10 mm Kühlrohren zum Beispiel 164 m³, bei 50 mm Rohren jedoch 206 m³ Kühlfläche pro 1 m³.

Kontakt, beim Ringraumofen liegen die technischen Verhältnisse anders. Man sieht aus Abb. 16, die Abhängigkeit vom Kühlrohrdurchmesser des inneren Kühlrohres für einen gewissen Bereich der Kühlflächenverhältnisse annähernd konstant ist unter der Voraussetzung, daß der Ringraumofen einen Innenkontaktröhrenofen gleichen Durchmessers gleichwertig ist. Für die 7 Fälle gleichwertig 14, 20 und 30 mm Innenkontaktröhren wurden die Werte für den Ringraumofen in Abb. 16 eingetragen. Auch beim Ringraumofen hat der Kühlflächenbedarf niedriger als beim Innenkontaktröhrenofen, nur in Bereich sehr kleiner Durchmesser des inneren Kühlrohres, etwa unter 10 mm  $\phi$  steigt die Kühlfläche mit abnehmendem Durchmesser stark an, um beim Durchmesser 0 für den inneren Kühlrohr den Wert des gleichwertigen Innenkontaktröhrenofens zu erreichen. Beim Ringraumofen ist es aus diesem Grunde also zweckmäßig, die Abmessungen des inneren Kühlrohres nicht unter 10 mm zu wählen. Während in Abb. 16 die absoluten Werte für den Kühlflächenbedarf der verschiedenen Ofenbauarten eingetragen wurden, sind in Abb. 17 die relativen Werte dargestellt und zwar bezogen auf den mit 100% eingesetzten Innenkontaktröhrenofen.

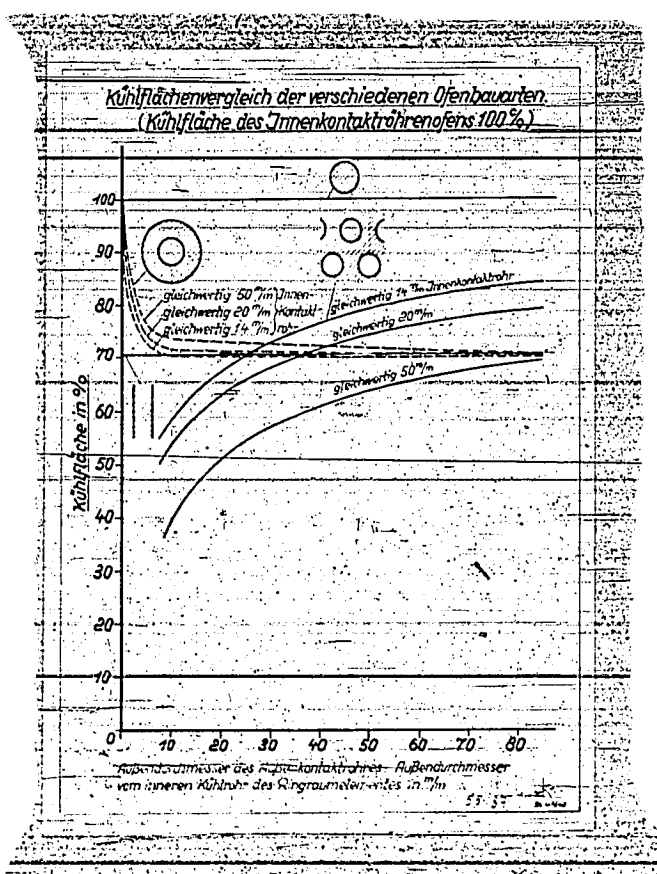


Abb. 17. Kühlflächenvergleich der verschiedenen Ofenbauarten (Kühlfläche des Innenkontaktröhrenofens 100%).

Als Bezugsfläche wurden die gleichen Werte wie in Abb. 16 aufgetragen, dagegen als Ordinate die Kühlfläche in Prozent.

Man erkennt, daß der Kühlflächenbedarf des Außenkontaktröhrenofens ganz gleich ist, ob er 14, 20 oder 50 mm Innendurchmesser hat, gleiches gilt gegenüber letzterer Ofenbauart, in so weit es sich um die Größe der Kühlflächen bemessen genommen wird. Die Ergebnisse an Kühlfläche ist proportional außerdem um so höher, je größer der Durchmesser des Innenkontaktröhrenofens ist, dem der Ofen in Bezug auf den zulässigen Temperaturanstieg in der Kontaktschicht entsprechen soll.

Beim Ringraumofen ist für größere Durchmesser als 10 mm zur des innere Kühlrohr der Kühlflächenbedarf etwa 71 % von demjenigen des Innenkontaktröhrenofens und zwar ergibt sich nur eine geringe Abhängigkeit von der Größe des Innenkontaktröhrenofens, dem er in Bezug auf Temperaturführung entsprechen soll. Bei kleineren Durchmessern als 10 mm findet ein Anstieg im Kühlflächenbedarf wie auf den Wert 100% beim inneren Kühlrohrdurchmesser statt.

In das gleiche Diagramm wurde noch der Kühlflächenbedarf des Plattenofens mit ca. 71 % eingetragen, der je, wie der Vergleich von Gleichung 12 und 28 ohne weiteres erkennen läßt, in einem konstanten Verhältnis zur Kühlfläche des Innenkontaktröhrenofens steht.

#### D. Raumausnutzung der verschiedenen Bauarten:

Ein weiteres Kennzeichen für die Beurteilung eines Reaktionsofens ist die Ausnutzung des ungebauten Raumes. Dabei wurde bei der folgenden Betrachtung der unbaute Raum so definiert, daß er Kontakt plus Kühlflächen plus darin eingeschlossene Kühlflüssigkeit umfaßt. Dagegen wurden alle Nebenkäume, die zur Gas Zu- und Abfuhr dienen, ebenso wie der Raum, den ein evtl. zu bauender Hochdruckmantel beansprucht, nicht berücksichtigt, da sonst zu sehr auf konstruktive Einzelheiten eingegangen werden müßte, was über den Rahmen dieser auf vereinfachten Annahmen aufgebauten theoretischen Untersuchung hinausgehen würde.

Es wurde ferner beim Innenkontaktröhrenofen ebenso wie beim Ringraumofen angenommen, daß der Abstand der in die Böden eingewalzten oder eingeschweißten Rohre gleich drei mal deren Wandstärke ist. In Abb. 18 ist der Kontakt- raum in Prozent des ungebauten Raumes für die einzelnen Bauformen eingetragen und zwar als Funktion des lichten Durchmessers für den Innenkontaktröhrenofen, abhängig von Außendurchmesser des inneren Kühlrohres für den

Ringraumofen und in Abhängigkeit vom Außendurchmesser der Kühlrohre für den Außenkontaktröhrenofen.

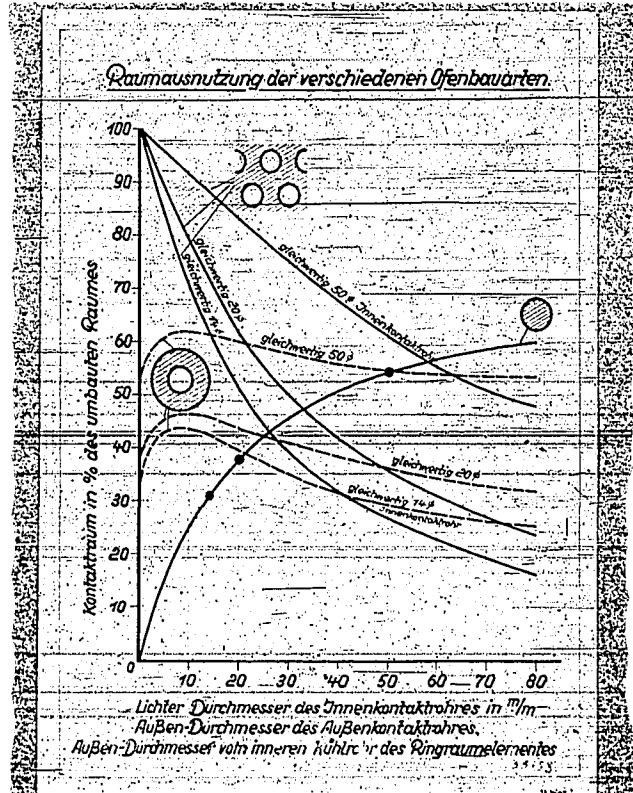


Abb. 18. Raumausnutzung der verschiedenen Ofenbauarten.

Beim Innenkontaktröhrenofen steigt die Raumausnutzung mit wachsendem Rohrdurchmesser vom Wert 0 bis auf 54 % beim Durchmesser 50 mm an. Durch andere Rohrveranordnung bzw. durch Einschieben der Röhre mit verminderten Abständen wäre insbesondere bei kleinen Rohrdurchmessern eine Verbesserung zu erzielen. Jedoch wachsen dann mit zunehmendem Rohrdurchmesser die Schwierigkeiten für die Wärme- bzw. Gasabfuhr auf der Kühlmittelseite.

Der Außenkontaktröhrenofen weist einen um so größeren Prozentsatz des umbaubaren Raumes mit Kontakt gefüllt auf, je kleinere Kühlrohre man verwendet. Für den Rohrdurchmesser 0 erreicht man den Wert 100 %. Praktisch lassen sich kaum kleinere Kühlrohre als 10 mm l. D. verwenden, sodass sich diese Grenzwerte nicht erreichen lassen. Auch bei dieser Ofenbauart wird die Raumausnutzung um so günstiger, je weniger temperaturempfindlich die Reaktion ist. Soll der Ofen einen Innenkontaktröhrenofen von 50 mm gleich-

wertig sein, so erhält man mit 20 mm Kühlrohren eine Raumausnutzung von 43 %, während bei dem gleichen Kühlrohrdurchmesser aber 14 mm Innenkontaktdurchmesser entsprechend nur eine Raumausnutzung von 51 % möglich ist.

Die Kurven für den Ringraumofen steigen mit wachsendem Durchmesser des inneren Kühlrohres zuerst bis zum Durchmesser 10 mm an, fallen dann aber wieder langsam ab. Bei 10 mm Ø für das innere Kühlrohr liegt demnach das Optimum dieser Ofenart. Für den Durchmessermaß des inneren Kühlrohres sind die Werte für die Raumausnutzung fastlich mit den entsprechenden Werten des Innenkontaktofenofens. Überall wie bei den anderen Ofenarten ergibt sich eine um so bessere Raumausnutzung, je größer der Durchmesser des Innenkontaktofenofens ist, dem der Ringraumofen gleichwertig sein soll, wie der Vergleich der eingezeichneten Kurven für 14, 20 und 50 mm Ø zeigt.

#### Zusammenfassung

Es wurde eine Rechenmethode für die verschiedenen Bauarten von Reaktionsöfen für katalytische Reaktionen, die innerhalb enger Temperaturgrenzen verlaufen müssen, entwickelt. Mit Hilfe der aufgestellten Formeln wurden die einzelnen Bauformen in bezug auf Kühlflächenaufwand und Ausnutzung des umhüllten Raumes verglichen. Für die Wahl eines Reaktionsofens sind neben diesen charakteristischen Größen noch andere Forderungen wie z. B. Höhe der Kontaktschicht, lineare Strömungsgeschwindigkeit, Belastbarkeit, Bauart, konstruktive Ausführbarkeit usw. maßgebend, die in der Rechnung jedoch nicht in Erscheinung treten.