Die Berechnung und Beurteilung von Öfen zur Kontaktfabrikation endothermer und exothermer Reaktionen, die innerhalb enger Temperaturgrenzen ablaufen.

Inhaltsverzeichnis.

Leuna-Werke 4.Juli 1942 Th.

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 Umwandlung aus Abb. 1 zu ersehen.

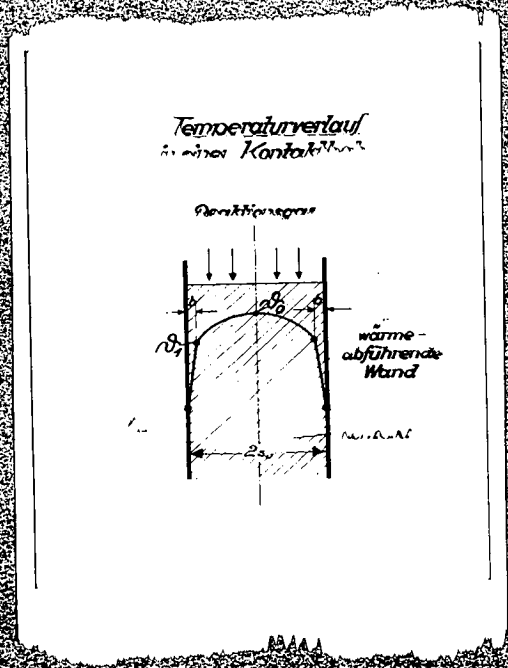


Abb. 1 Temperaturverlauf in einer Kontaktbahn.

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 nach an die Wand abgeführt wird, so dient, abgesehen

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 den Mitte der Strombahn herrscht die Temperatur ϑ_0. Durch Wärmeableitung gegen die Wand fällt die Temperatur parabelförmig ab und erreicht in der Nähe der Kühlfläche den Wert ϑ_1. In einer verhältnismäßig schmalen Randzone von der Breite b erfolgt der Wärmeübergang an die Wand mit einem Temperaturgefälle ($\vartheta_1 - \vartheta_2$). 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 ($\vartheta_0 - \vartheta_1$) 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 Wärmeleitzahl 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 inbezug 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 Innenkontaktröhrenofen genannt, wurde infolgedessen den anschließenden Betrachtungen als Norm bezw. 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 Kühlwänden gelagert ist (Abb. 2).

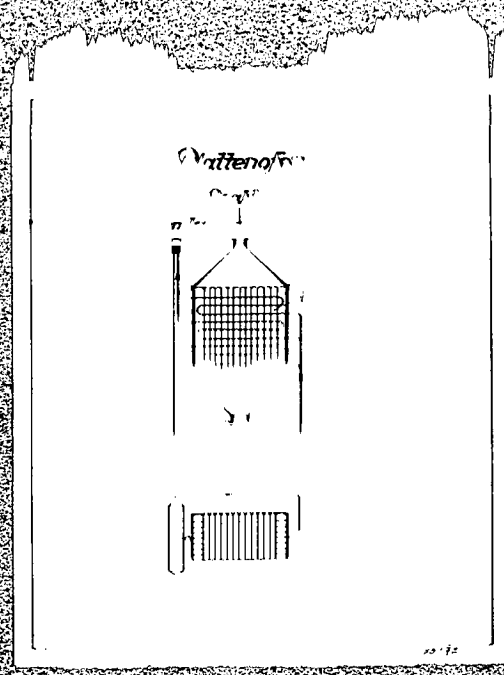


Abb. 2 Plattenofen.

Senkrecht zu den Kühlflächen laufen von einer Kühlflüssigkeit durchströmte Rohre, auf denen diese Kühlflächen durch Aufgießen 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 Obertrommel, aus welcher der Dampf abgezogen und in welche neues Speisewasser eingeführt wird. Das Synthesegas tritt oben in den Kontakt ein und wird durch die Kühlflächen in eine entsprechende Anzahl Teilströme verlegt. Unten verläßt das nicht umgesetzte Gas zusammen mit den Reaktionsprodukten den Ofen. Der Ofen stellt also praktisch ein Röhrenrohr der

[illegible]

b) Innenkontaktröhrenofen.

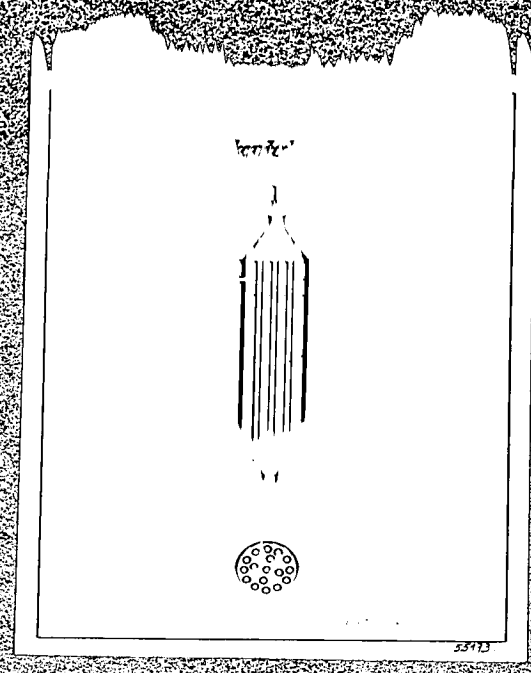


Abb. 3 Innenkontaktröhrenofen

Bei dieser Bauart wird eine Anzahl von Rohren, die mit Kontakt gefüllt sind, parallel geschaltet, indem man sie oben und unten in einen Rohrboden 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 hineinkonstruiert. So weit der Dampfraum reicht, dürfen die Rohre nicht mit Kontakt gefüllt sein, da sonst Überhitzungen erfolgen. Dieser Teil der Rohre 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.

97 Außenkontaktröhrenofen

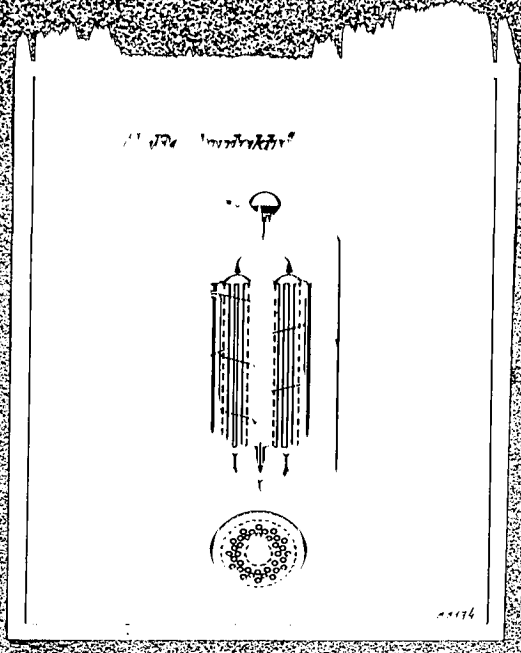


Abb. 4 Außenkontaktröhrenofen

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

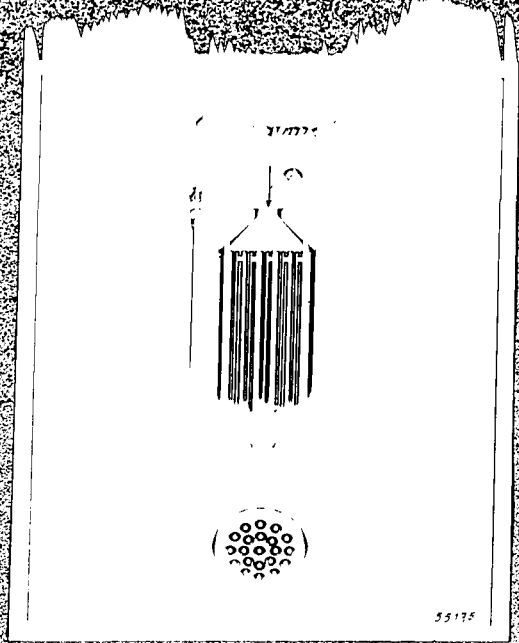


Abb. 5 Ringraumofen

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

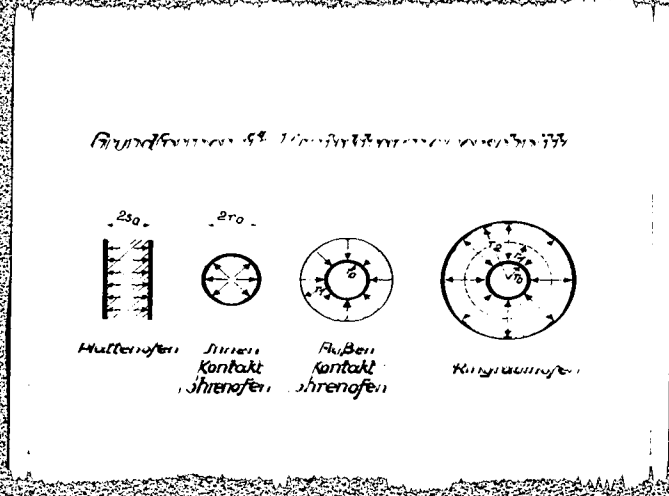
evtl. auch für solche Öfen eine überschlägige Dimensionierung vornehmen.

Ferner sollen die Betrachtungen auf exotherme Vorgänge beschränkt bleiben, die 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:

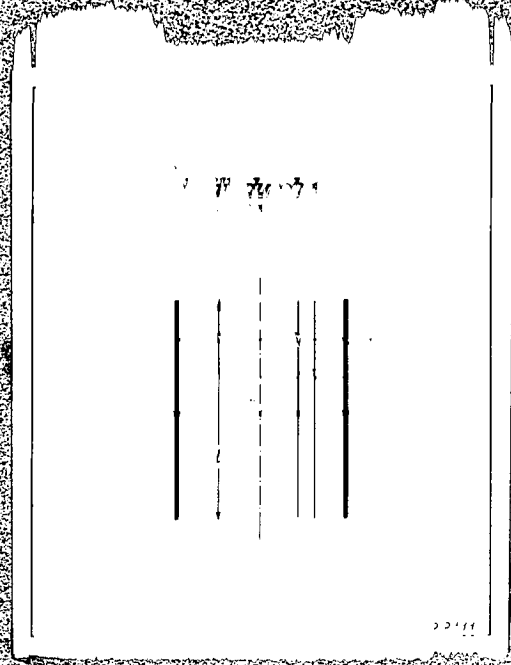
$2s_0$ den Kühlflächenabstand in mtr.

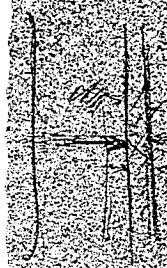
ϑ die Temperatur in °C

λ die Wärmeleitzahl in kal/m h °C (Es ist eine mittlere Wärmeleitzahl einzusetzen, welche die Wärmeleitung, Konvektion und im Dampf berücksichtigt).

q die bei der Reaktion erzeugte Wärme in kal/m³ Kontaktgemisch h

Δt_1 die zulässige Temperaturdifferenz in °C zwischen Mitte Kontaktschicht und Kühlfläche = $\vartheta_0 - \vartheta_1$





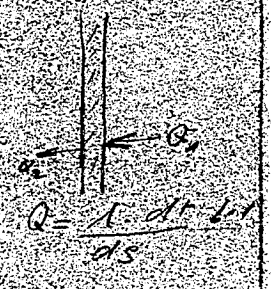


Abb. 7 Schnitt durch eine Kontakttasche.

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

Die im Volumenelement 1 . ds . 1 erzeugte Wärme ist dann:

$$\lambda \quad d\,Q = 1 \cdot ds \cdot q \qquad (1)$$

Die Wärme $d\,Q^{s}$, die aus dem Inneren dem Volumenelement zugeführt wird, ergibt sich zu:

$$d\,Q^{s} = -\lambda \cdot 1 \cdot \frac{d\vartheta}{ds} \qquad (2)$$

Die Wärme $d\,Q^{a}$, die aus dem Volumenelement abgeführt ist:

$$d\,Q^{a} = -\lambda \cdot 1 \cdot \frac{d\vartheta}{ds} - \lambda \cdot 1 \cdot \frac{d\left\{\frac{d\vartheta}{ds}\right\}}{ds} \cdot ds \qquad (3)$$

Die im Volumenelement erzeugte Wärme beträgt :

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

Aus Gleichung 1 und 4 erhält man :

$$1\,ds = q\,\varrho = -\lambda \cdot 1 \cdot \frac{d\left\{\frac{d\vartheta}{ds}\right\}}{ds} \cdot ds \qquad (5)$$

$$q \cdot s = -\lambda \cdot \frac{d\vartheta}{ds} + C_1 \qquad (6)$$

Die Integrationskonstante C_1 ergibt sich durch Einsetzen der Grenzbedingung

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

$$\rightarrow \quad q \cdot s \cdot ds = -\lambda \cdot d\vartheta \qquad (7)$$

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

für : $s = s_0$ erhält man $\vartheta = \vartheta_1$

Die Integrationskonstante C_2 wird also :

$$C_2 = \frac{q}{\lambda} \cdot \frac{s_0^2}{2} + \vartheta_1 \qquad (9)$$

Gleichung 9 in 8 eingesetzt ergibt :

$$\vartheta = \vartheta_1 + \frac{q}{2\lambda} \cdot \left\{ s_0^2 - s^2 \right\} \qquad (10)$$

Die Maximaltemperatur ϑ_0 erhält man für $s = 0$ und damit wird:

$$s_0 = \sqrt{\frac{2\lambda}{q} \cdot \left\{ \vartheta_0 - \vartheta_1 \right\}} \qquad (11)$$

Setzt man $(\vartheta_0 - \vartheta_1) = \Delta t$, der maximalen Temperaturdifferenz so ergibt sich der halbe Flächenbetrag zu :

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

oder die auftretende Temperaturdifferenz in der Kontaktschicht ist:

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

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

Es bedeutet:

r_0 = Radius des Rohres in m.

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

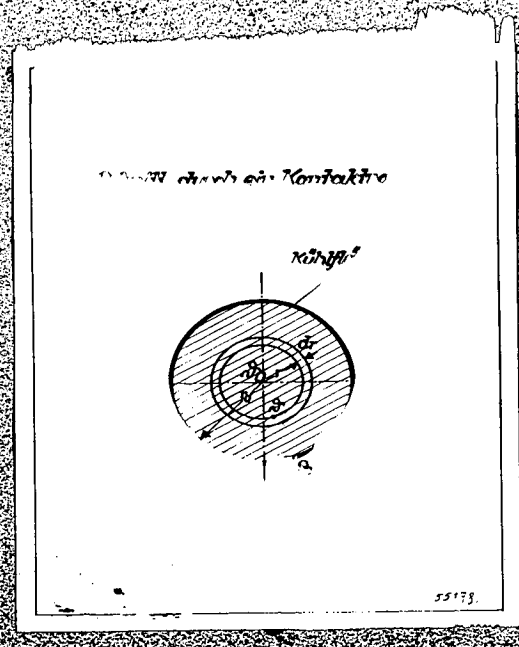


Abb. 4 Schnitt durch ein Kontaktrohr.

Die in einem Volumenelement erzeugte Wärme ist:

$$d\,Q = 2r \cdot \pi \cdot dr \cdot q \qquad (14)$$

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

$$d\,Q' = -\lambda \cdot 2r \cdot \pi \cdot \frac{d\vartheta}{dr} \qquad (15)$$

und die Wärme, die aus dem Volumenelement abströmt:

$$d\,Q'' = -\lambda \cdot 2r \cdot \pi \cdot \frac{d\vartheta}{dr} - \lambda \cdot 2\pi \cdot \frac{d\left(r\lambda \frac{d\vartheta}{dr}\right)}{dr} \cdot dr \qquad (16)$$

Die im Volumenelement erzeugte Wärme ist dann:

$$d\,Q = d\,Q'' - d\,Q' \qquad (17)$$

$$\ldots \; \lambda \cdot \vartheta = \lambda \cdot \frac{\ldots}{\ldots} \; \ldots \qquad (19)$$

oder in Mittelwerte ist eingesetzt :

$$2 \cdot \pi \cdot r \cdot \ldots \cdot dr \cdot \ldots \cdot \vartheta \cdot \ldots \cdot r \cdot \ldots = \frac{\ldots}{\ldots} \cdot \ldots \qquad (20)$$

$$q \cdot r \cdot dr = -\lambda \cdot \ldots \qquad (20)$$

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

Die Integrationskonstante C_1 erhält man durch Einsetzen der Grenzbedingung

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

Es wird also :

$$q \cdot \frac{r}{2} \cdot dr = -\lambda \cdot d\vartheta \qquad (22)$$

$$\frac{q \cdot r^2}{4 \cdot \lambda} = -\vartheta + C_2 \qquad (23)$$

Für : $r = r_0$ $\vartheta = \vartheta_1$ ergibt sich die Integrationskonstante C_2 zu :

$$C_2 = \frac{q \cdot r_0^2}{4 \cdot \lambda} + \vartheta_1 \qquad (24)$$

Die Temperatur ϑ an einer Stelle mit dem Radius r wird dann

$$\vartheta = \vartheta_1 + \frac{q}{4\lambda} \cdot \left\{ r_0^2 - r^2 \right\} \qquad (25)$$

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

$$\vartheta_{max.} = \vartheta_0 = \vartheta_1 + \frac{q}{4\lambda} \cdot r_0^2 \qquad (26)$$

oder $$r_0 = \sqrt{\frac{4\lambda}{q} \cdot (\vartheta_0 - \vartheta_1)} \qquad (27)$$

setzt man $\vartheta_0 - \vartheta_1 = \Delta$:

Der Radius des Kontaktrohres wird dann :

$$\boxed{r_0 = 2 \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{q} \cdot \Delta}} \qquad (28)$$

oder die auftretende Temperaturdifferenz zwischen Rohrmitte und Wand ist:

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

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

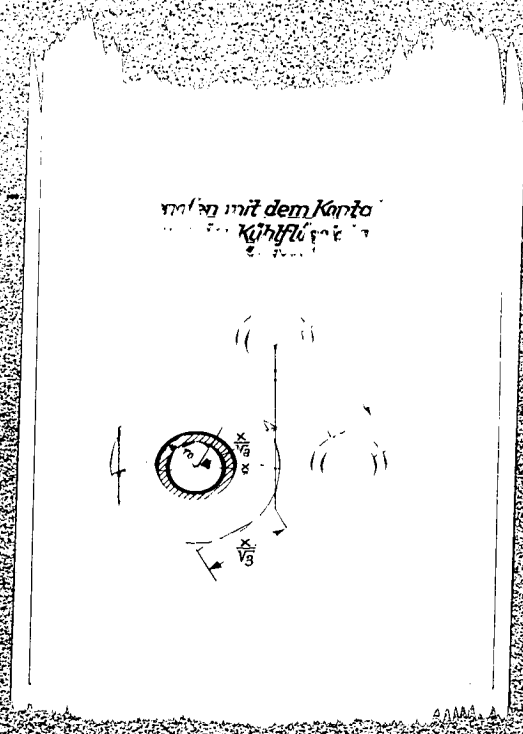


Abb. 9 Röhrenofen mit dem Kontakt um die von der Kühlflüssigkeit durchströmten Rohre

Ordnet man die Röhre 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 $\frac{x}{\sqrt{3}}$ 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:

[illegible]

Das Integral von [illegible] kann [illegible] und [illegible] [illegible] Anfangs- und Endpunkt.
Auch das Integral über [illegible] sollen bedeutungslos [illegible]

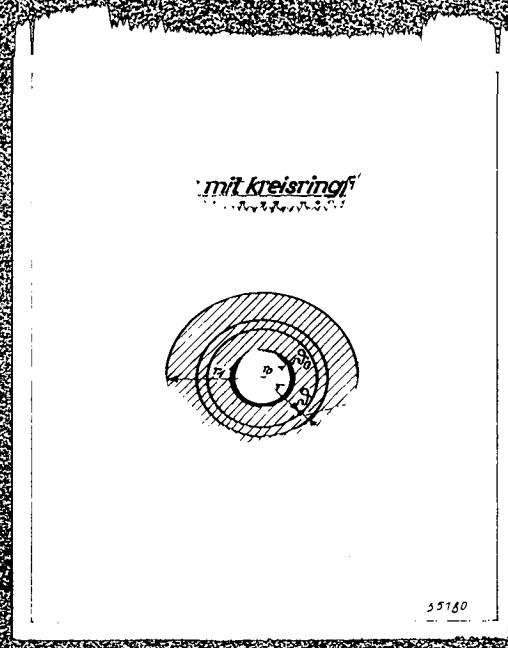


Abbildung [illegible] mit Kreisringelement
Zu Gleichung [illegible]

r_1 = dem Radius Radius des Kreisbogens gleich dem Umfang Durchmesser der Kontaktscheibe [illegible]

r_2 = dem äußeren Radius der Kontaktscheibe

$\Delta r = r_2 - r_1$ = Vergrößerung [illegible] der Kontaktscheibe

Das in einem Volumenelement vorhandene Wasser ist dann:

$$dV = \pi r^2 \cdot dz \quad \text{bzw.} \quad dV = \pi r^2 \cdot dx \qquad (30)$$

Die Menge, die aus der Kontaktscheibe das Volumenelement ausgeführt wird, ist:

$$dV = \pi r^2 \cdot dz + \pi r^2 \cdot dx = \frac{\pi r^2}{dt} \qquad (31)$$

und die Kräfte, die mit dem Volumenelement übertragen

$$dV = -\lambda \cdot x \cdot \gamma \cdot \frac{d\vartheta}{dx} - \lambda \cdot \gamma \cdot 2\pi \cdot \frac{d\left\{x \cdot \frac{d\vartheta}{dx}\right\}}{dx} \cdot dx \qquad (32)$$

die in Volumenelement hineingeführte Wärme ist:

$$dQ = dQ' + dQ_1 \qquad (33)$$

$$= \lambda \cdot \gamma \cdot 2\pi \cdot \frac{d\left\{x \cdot \frac{d\vartheta}{dx}\right\}}{dx} \cdot dx \qquad (34)$$

oder in Gleichung 30 eingesetzt:

$$2 \cdot \pi \cdot x \cdot dx \cdot q = -\lambda \cdot 2\pi \cdot \frac{d\left\{x \cdot \frac{d\vartheta}{dx}\right\}}{dx} \cdot dx \qquad (35)$$

$$\int q \cdot x \cdot dx = -\int \lambda \cdot d\left(x \cdot \frac{d\vartheta}{dx}\right) \cdot dx \qquad (36)$$

$$q \cdot \frac{x^2}{2} = -\lambda \cdot x \cdot \frac{d\vartheta}{dx} + C_1 \qquad (37)$$

für $x = x_1$ wird $\frac{d\vartheta}{dx} = 0$

damit ergibt sich die Integrationskonstante C_1 zu:

$$C_1 = q \cdot \frac{x_1^2}{2} \qquad (38)$$

In Gleichung 37 eingesetzt erhält man:

$$q \cdot \frac{x^2}{2} = -\lambda \cdot x \cdot \frac{d\vartheta}{dx} + q \cdot \frac{x_1^2}{2} \qquad (39)$$

$$\lambda \cdot x \cdot \frac{d\vartheta}{dx} = \frac{q}{2} \cdot \left\{x_1^2 - x^2\right\} \qquad (40)$$

$$\lambda \cdot \int \frac{d\vartheta}{dx} = \frac{q}{2} \cdot \int \left\{\frac{x_1^2}{x} - x\right\} \cdot dx \qquad (41)$$

$$\lambda \cdot \vartheta = \frac{q}{2} \cdot \left\{x_1^2 \cdot \ln x - \frac{x^2}{2}\right\} + C_2 \qquad (42)$$

Als Grenzbedingung ergibt sich für $x = x_a$, $\vartheta = \vartheta_0$

$$\lambda \cdot \vartheta_0 = \frac{q}{2} \cdot \left\{x_1^2 \cdot \ln x_a - \frac{x_a^2}{2}\right\} + C_2 \qquad (43)$$

oder die Integrationskonstante C_2 ist:

$$C_2 = \lambda \cdot \vartheta_o - \frac{q}{2} \cdot \left\{ r_1^2 \ln r_o - \frac{r_o^2}{2} \right\} \qquad (44)$$

in Gleichung 42 eingesetzt erhält man:

$$\lambda \cdot (\vartheta - \vartheta_o) = \frac{q}{2} \cdot \left\{ \frac{r_o^2}{2} - \frac{r^2}{2} + r_1^2 \cdot \ln \frac{r}{r_o} \right\} \qquad (45)$$

für $\vartheta = \vartheta_1$ wird $r = r_1$ (46)

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

$$\boxed{\frac{4 \lambda \cdot \Delta t}{q} = r_1^2 \cdot \left(2 \ln \frac{r_1}{r_o} - 1 \right) + r_o^2} \qquad (48)$$

Die in der Kontaktringzone auftretende Temperaturdifferenz beträgt demnach:

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

Aus Gleichung 49 kann, wenn die Wärmeleitzahl, die pro m Kontaktzone erzeugte Wärme und der Radius des Kühlrohres bekannt ist, für eine vorgeschriebene Temperaturdifferenz Δt der äußere Radius des Kontaktringraumes und damit die Breite $(r_1 - r_o)$ der Kontaktzone durch Probieren gefunden werden. Die Gleichung 49 kann also in Verbindung mit Gleichung 12 für den Flächenmesser und Gleichung 26 für den Schneidenkontakt in den Kopfen nicht exact gelöst werden.

Die abgeleitete Formel 49 gilt unter der Voraussetzung, daß das Kühlmittel gut 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 herausfördert. Rechnerisch ist dieser Fall jedoch nicht zu erfassen und kann höchstens durch Zuschläge zu dem nach Gleichung 49 errechneten Kühlrohrabstand erfaßt werden.

[illegible]

[illegible]

[illegible]

b. [illegible] (Ringraumofen)

Wenn man den Katalysator in einem Kontaktrohrofen mit äußeren und inneren Kühlrohre anordnet, kann man den Kontaktraum in zwei Zonen von der Breite $(r_1 - r_a)$ und $(r_2 - r_1)$ einteilen, Abb. 13. Aus der inneren Zone fließt die Wärme gegen das innere Kühlrohr. Diese Zone stellt praktisch einen Außenkontaktrohrofen mit einem Kühlrohr vom Radius r_a und einer Kontaktraumbreite $(r_1 - r_a)$ dar. Die Berechnung kann nach der für den Außenkontaktrohrofen abgeleiteten Gleichung erfolgen. Die zweite Zone von der Breite $(r_2 - r_1)$ gibt die Wärme an das äußere Kühlrohr ab.

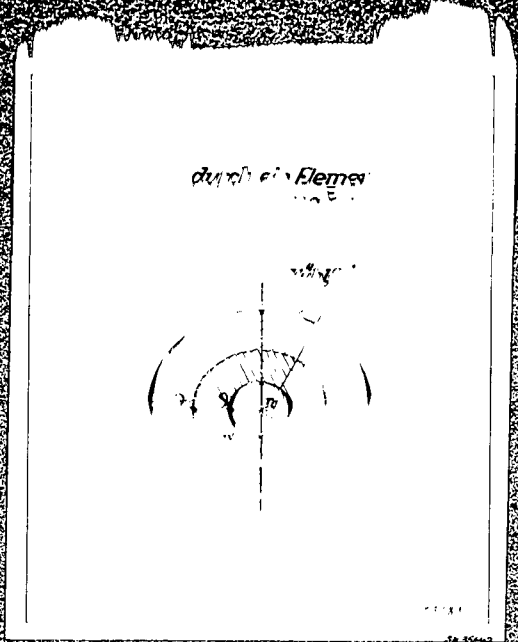


Abb.11 Schnitt durch ein Element des Ringgasofens.

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

$$\boxed{r_1^2 \cdot \left(2 \cdot \ln \frac{r_1}{r_2} - 1\right) + r_2^2 = \frac{4 \cdot \Delta t \cdot \lambda}{q}} \qquad (33)$$

oder der zulässige Temperaturunterschied Δt ist:

$$\Delta t = \frac{q}{4\lambda} \cdot \left[r_1^2 \cdot \left(2 \cdot \ln \frac{r_1}{r_2} - 1\right) + r_2^2\right] \qquad (34)$$

Mit Hilfe von Gleichung 34 kann man die Abmessungen der äußeren Zone, mit Gleichung 40 diejenigen der inneren Zone des Ringgasofens berechnen und durch Addition der beiden Werte die gesamte Breite $r_2 - r_0$ bestimmen.

Setzt man in Gleichung 33 $r_1 = 0$, so erhält man:

$$r_2 = 2 \cdot \sqrt{\frac{\Delta t \cdot \lambda}{q}} \qquad (26)$$

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

17. Diskussion.

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

Plattenofen $$r_0 = 1{,}42 \cdot \sqrt{\frac{\lambda \cdot \Delta t}{q}} \qquad (12)$$

Innenkontaktrohrofen $$r_0 = 2 \cdot \sqrt{\frac{\lambda \cdot \Delta t}{q}} \qquad (36)$$

Außenkontaktrohrofen:

$$r_1^2 \cdot \left(2 \ln \frac{r_1}{r_0} - 1\right) + r_0^2 = \frac{4 \cdot \lambda \cdot \Delta t}{q} \qquad (40)$$

Ringraumofen:

Innere Zone $$r_1^2 \cdot \left(2 \cdot \ln \frac{r_1}{r_0} + 1\right) + r_0^2 = \frac{4 \cdot \lambda \cdot \Delta t}{q} \qquad (45)$$

Äußere Zone $$r_1^2 \cdot \left(2 \cdot \ln \frac{r_1}{r_0} - 1\right) + r_0^2 = \frac{4 \cdot \lambda \cdot \Delta t}{q} \qquad (42)$$

4. Vergleich einzelner Kontaktöfen

a. Gleichwertige Kontaktraumverschnitte

Setzt man in jede dieser Gleichungen für λ, q und Δt die selben Werte ein, so erhält man für die Kontaktöfen Abmessungen, die einander gleichwertig sind, d.h. Kontaktschichten in denen das gleiche Temperaturgefälle herrscht. Für angenommene Werte von λ, q und Δt wurden der Kühlflächenbedarf 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 Katalysatorschicht berechnet und in Abb. 12 eingetragen. Als Abszisse wurde der lichte Durchmesser des Rohres mit Innenkontakt gewählt und als Ordinaten darüber die gleichwertigen Abmessungen der anderen Bauarten aufgetragen. Dabei wurde angenommen, daß das Kühlrohr mit Außenkontakt und das äußere Kühlrohr für die Ringraumanordnung des Katalysators jeweils die gleichen Abmessungen haben sollen wie das Rohr mit dem Innenkontakt.

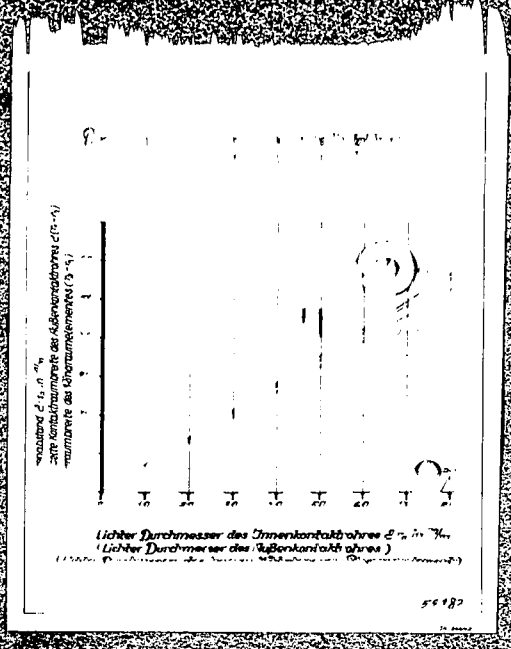


Abb. 12 Der Innenkontaktrohr gleichwertige Kontaktraumquerschnitte des Plattenofens, des Außenkontaktrohres und des Ringraumelementes.

eine gerade Linie mit dem ½ des Neigungswinkels $\frac{1,14}{2}$ °.

Die doppelte Kontaktraumbreite $2 \cdot (r_1 - r_0)$ aus Gleichung 46 für das Rohr mit Außenkontakt ergibt etwas kleinere Werte, als der gleichwertige Plattenabstand $2 \cdot e_0$. Die Kurve für die doppelte Kontaktraumbreite 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 Katalysators 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 mittlere Rohrdurchmesser 51 mm, so müßte man, um den gleichen Temperaturab-

[illegible]

[illegible]

3. Kühlflächenvergleich

Mit den aus den Zeichnungen 12, 20, 18 u. 53 ermittelten Abmessungen der verschiedenen Querschnittsformen wurden die für 1 m³ Kontakt sich ergebenden Kühlflächen errechnet und miteinander verglichen. Das Ergebnis ist in Abb.13

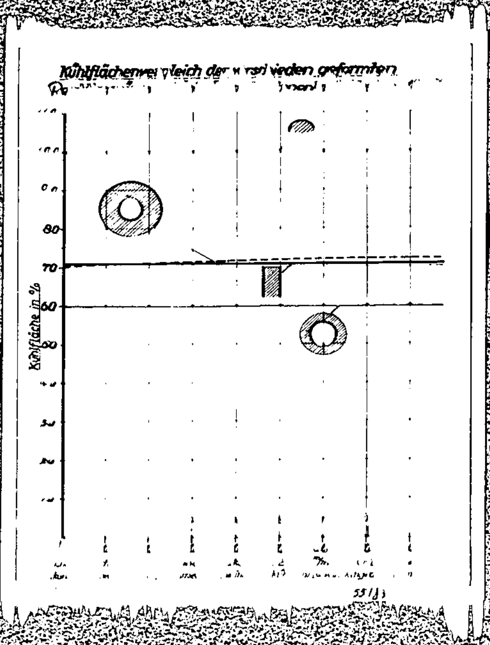


Abb.13 Kühlflächenvergleich der verschieden geformten Reaktionsräume.

für die verschiedenen Bauarten aufgetragen. Als Abszisse wurde wahlweise der lichte Rohrdurchmesser vom Innenkontaktrohr, vom Außenkontaktrohr und vom inneren Rohr des Ringraumelementes bzw. der Plattenabstand der

Wenn Kühlflächen gegenüber [illegible] Kühlflächen der Innenkontaktrohren und der Ringe [illegible] Erfahrungen mit f = 0,8 angenommen und die Ergebnisse dürfte darauf beruhen.

Man sieht, daß bei [illegible] des Innenkontaktrohres [illegible] etwa 70 % der Kühlfläche des Rohres mit Kontaktkontakt beteiligt sind. Dies gilt direkt ganz unabhängig von der absoluten Größe des Kontaktrohrdurchmessers. Beim Außenkontaktrohrofen beträgt dies ca. 60 % der Kühlfläche gegenüber einem gleich großen Rohr mit Innenkontakt und zwar ebenfalls unabhängig von Rohrdurchmesser. Berücksichtigt man dabei, daß man Rohr mit Innenkontakt infolge der geringeren Wärmedurchgangszahl auf der Innenseite den lichten, dagegen Rohr mit Außenkontakt den äußeren Durchmesser zur Berechnung der Kühlfläche einzusetzen hat, so weist das Rohr mit Außenkontakt einen Materialbedarf auf, der noch unter 60 % gegenüber demjenigen eines Innenkontaktrohres liegt. Je größer der Rohrdurchmesser ist, umsomehr verschwindet unter der Voraussetzung normaler Gegebenheiten dieser Vorteil, da das Verhältnis zwischen Außen- und Innendurchmesser sich mehr und mehr dem Wert 1 nähert.

Die Kühlfläche des Ringkontaktofens in dem untersuchten Bereich beträgt 70 - 75 % von derjenigen des Innenkontaktrohres, hat also ungefähr den gleichen Wert, wie bei der Anordnung des Kontaktes außerhalb ebener Kühlwände. Die Konvex Fläche des inneren Rohres und die Kühlfläche des äußeren Rohres gleichen sich also in dieser Hinsicht aus.

<u>Vergleich von Reaktionsöfen</u>

<u>a. Kühlflächenbedarf der verschiedenen Bauarten.</u>

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 Innenkontaktrohrenofen und den Ringraumofen praktisch eine Parallelschaltung von vielen Einzelelementen. Beim Außenkontaktrohrenofen kann, wie auf Seite 17 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

$$x = 2 \cdot r_0 + a \qquad (55)$$

und damit

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

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

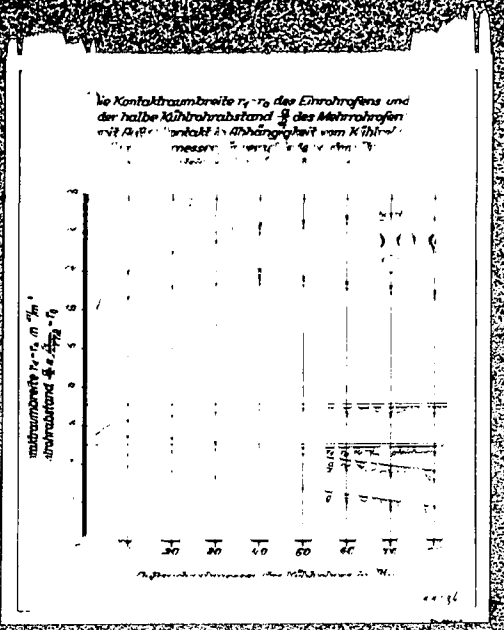


Abb.14 Die Kontaktraumbreite $r_1 - r_0$ des Einrohrofens und der halbe Kühlrohrabstand $\frac{a}{2}$ des Mehrrohrofens mit Außenkontakt in Abhängigkeit vom Kühlrohraußendurchmesser für verschiedene, dem Innenkontaktofen gleichwertige Rohrdurchmesser.

In Abb.14 sind die Werte für die Kontaktraumbreite eines einzelnen Rohres mit Außenkontakt nach Gleichung 46 und die reduzierten Werte für den halben Abstand zweier Kühlrohre nach Gleichung 56 eingetragen und zwar für 3 Fälle, in denen der Außenkontaktdrehrohrofen einem Innenkontaktdrehrohrofen 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 Plattenofen zu nähern, der bei

$r_0 = 0{,}5$ [illegible] erreicht wird. Dagegen steht das Feld für die weiteren Kurvenabschnitte $\frac{a}{2} > r_0$ [illegible] für den Innenkontaktrohrenofen ein weiteres Gebiet [illegible] zu, [illegible] r_0. Dies ist darauf zurückzuführen, daß der Unterschied zwischen dem Radius r_1 und der Entfernung $(r_1 - r_0)$ [illegible] als zugehöriger Rohrdurchmesser immer größer wird.

Die Verwirklichung dessen, daß man den einseitigen Kontaktofenrohrabstand $\frac{a}{2}$ in einen zweiseitigen umwandeln kann, gilt um so mehr, je größer man den Kühlrohrdurchmesser wählt, und je weniger die Temperaturbedingungen sind, d.h. je kleiner der Abgeldurchmesser für den Röhrenbetrieb ist, oder je kleiner der Durchmesser des Innenkontaktrohrs ist, das der Außenkontaktrohrenofen gleichwertig sein soll.

Ein Ofen mit Außenkontakt, der eine gleich gute Wärmeabfuhr hat, wie ein 50 mm Röhrenofen mit Innenkontakt, muß bei Anwendung von Kühlrohren mit 10 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 Ringrohrofens mit Außenkontakt sind gleichfalls aus Abb. 14 zu entnehmen und betragen

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

Man sieht aus Abb.14, daß der Unterschied zwischen $(r_1 - r_0)$ und $\frac{a}{2}$ 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 Ringraumbreite aufgetragen und zwar wieder für die 3 Fälle, daß der Ringraumofen einen Innenkontaktröhrenofen mit 14, 20 und 30 mm lichtem Durchmesser gleichwertig sein soll.

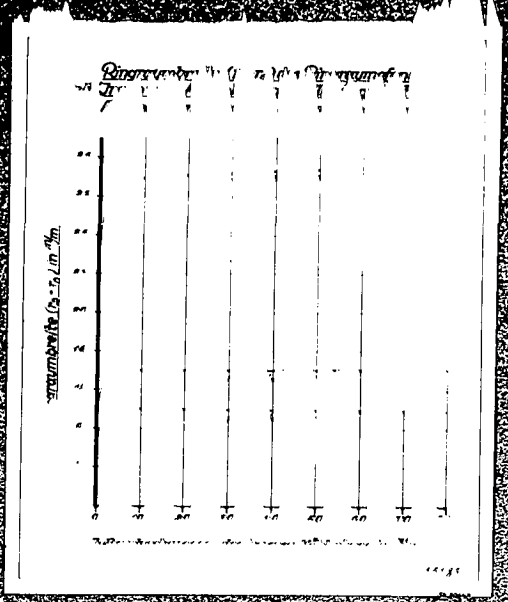


Abb. 12 Ringraumbreite ($r_a - r_i$) des Ringraumofens mit Innen- und Außenkühlung in Abhängigkeit vom Außendurchmesser des inneren Kühlrohres.

Für den inneren Schmelzdurchmesser 0 erhält man als Ringraumbreite die gleichen Werte wie für den Radius des Tropfenkettenofens. Von diesem Grenzwert ist erreicht die Ringraumbreite mit wachsendem Durchmesser zunächst schnell, dann langsamer und wird für größere Durchmesser wie 10 mm annähernd konstant und in ihrem absoluten Wert etwa gleich dem Einsetzbereich des Plattenofens. Man kann also die verhältnismäßig unbeständige Rechnung für den Ringofenofen ersetzen, indem man die Ringraumbreite nach der Formel für den Plattenofen berechnet, ohne daß sich dadurch der unzulässige Fehler erhöht, wenn Durchmesser wie 10 mm für das innere Kühlrohr vorhanden für genauere Berechnungen so wie gut aus.

Mit den Zustandsgrößen nach Gleichung 12 u. Gleichung 28 für Platten- und Ringofen-Tropfenkette und den in Abb. 12 u. 13 eingetragenen Werten für den Außenkühlungsfaktor u. den Ringraumbreite werden die Kühlflächen pro 1 m Kettenbahn ermittelt und in Abb. 15 nebeneinandergestellt.

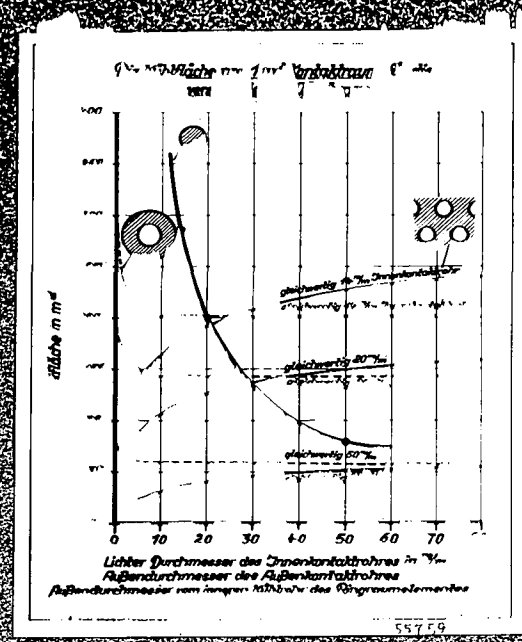


Abb. 16. Kühlfläche pro 1 m² Kontaktraum für die Versuchsöfen Abmessungen.

Als Abszisse hat in Abb. 16 entweder der Außendurchmesser des Kühlkörpers vom Außenkontaktrohrofen, d.h. gleichzeitig der lichtere Kühlkörper vom Ringraumofen und der lichte Durchmesser des Innenkontaktrohres gewählt, während als Ordinate die Kühlfläche pro 1 m² Kontaktraum gemessen wurde.

Der 14 mm Innenkontaktrohrofen hat 280 cm², der 20 mm Innenkontaktrohrofen hat 200 und der gleiche Ofen mit Rohren von 50 mm 1.D. weist 60 m² Kühlfläche pro 1 m² Kontaktraum auf. In der gleichen Abb. sind 3 Kurven für den Außenkontaktrohrofen eingezeichnet und zwar gleichwertig dem 14 mm, 20 mm und 30 mm Innenkontaktrohrofen. In allen 3 Fällen nimmt die Kühlfläche mit steigendem Durchmesser des Kühlkörpers stark ab, bleibt aber immer unter dem Wert des entsprechenden gleichwertigen Innenkontaktrohrofens. Der Kühlflächenaufwand ist also beim Außenkontaktrohrofen um so geringer, je kleiner man den Rohrdurchmesser wählt. Man benötigt, wenn man einen, etwa 14 mm Innenkontaktrohrofen gleichwertigen Außenkontaktrohrofen baut, als will, bei Verwendung von 10 mm Kühlkörper zum Beispiel 164 m², bei 30 mm Rohren jedoch 208 m² Kühlfläche pro 1 m².

[illegible]

[illegible] Wärme [illegible] Kühlfläche [illegible] Kühlrohrofen, nur in Bereich sehr kleiner Durchmesser des inneren Kühlrohres, etwa unter 10 mm Ø steigt die Kühlfläche mit abnehmenden Durchmesser stark an, um beim Durchmesser 0 für den inneren Kühlrohr den Wert des gleichmäßigen Innenkontaktrohrenofens zu erreichen. Beim Ringgasofen 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 Kühlflächenaufwand der verschiedenen Ofenbauarten eingetragen wurden, sind in Abb. 17 die relativen Werte dargestellt und zwar bezogen auf den mit 100 % eingesetzten Innenkontaktrohrenofen.

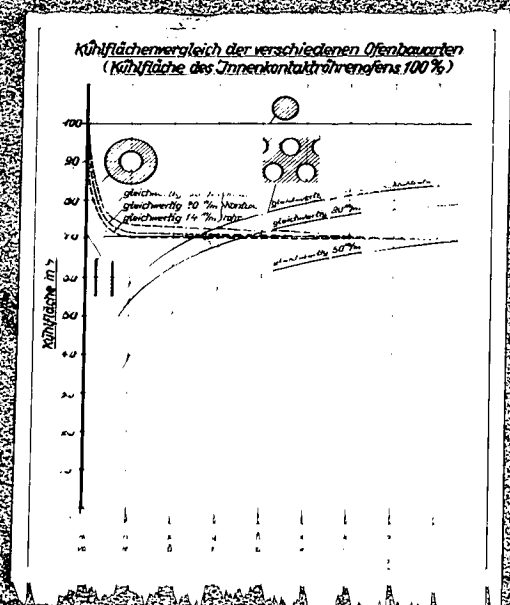


Abb. 17 Kühlflächenvergleich der verschiedenen Ofenbauarten (Kühlfläche des Innenkontaktrohrenofens 100 %).

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

Man erkennt, daß der Kühlflächenaufwand des Außenkontaktröhrenofens ganz gleich, ob er 14, 20 oder 50 mm Innenkontaktröhrenofen gleichwertig ist gegenüber letzterer Ofenbauart, um so geringer ist, je kleiner der Kühlrohrdurchmesser genommen wird. Die Ersparnis an Kühlfläche ist prozentual außerdem um so höher, je größer der Durchmesser des Innenkontaktröhrenofens ist, den der Ofen inbezug auf den zulässigen Temperaturanstieg in der Kontaktschicht entsprechen soll.

Beim Ringraumofen ist für größere Durchmesser als 10 mm für das innere Kühlrohr der Kühlflächenbedarf etwa 71 % von demjenigen des Innenkontaktröhrenofens und zwar ergibt sich nur eine geringe Abhängigkeit von der Größe des Innenkontaktrohres, den er inbezug auf Temperaturführung entsprechen soll. Bei kleineren Durchmessern als 10 mm findet ein Anstieg im Kühlflächenaufwand bis auf den Wert 100 % beim inneren Kühlrohrdurchmesser 0 statt.

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

b. Raumausnutzung für verschiedene Bauarten.

Ein weiteres Kennzeichen für die Beurteilung eines Reaktionsofens ist die Ausnutzung des umbauten Raumes. Dabei wurde bei der folgenden Betrachtung der umbaute Raum so definiert, daß er Kontakt plus Kühlflächen plus darin eingeschlossene Kühlflüssigkeit umfaßt. Dagegen wurden alle Nebenräume, die zur Gas Zu- und Abfuhr dienen, ebenso wie der Raum, den ein evtl. zu nennender 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 Kontaktraum in Prozent des umbauten Raumes für die einzelnen Bauformen eingetragen und zwar als Funktion des lichten Durchmessers für den Innenkontaktröhrenofen, abhängig vom Außendurchmesser des inneren Kühlrohres für den

Ringraumofen und in Abhängigkeit von Außendurchmesser des Kühlrohres für den Innenkontaktröhrenofen.

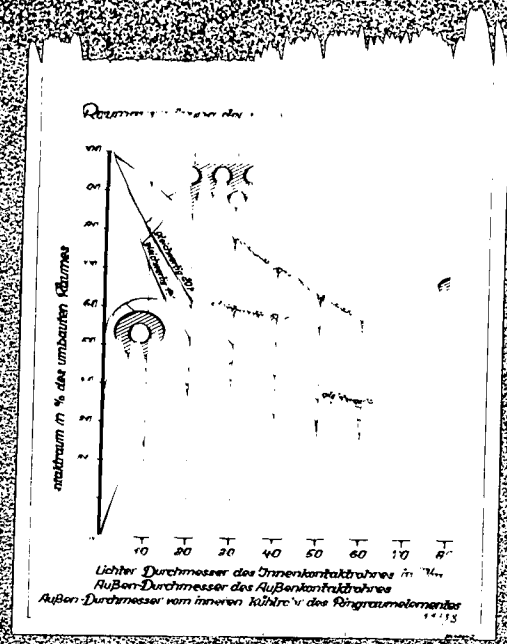


Abb. 18 Raumausnutzung der verschiedenen Ofenbauarten.

Beim Innenkontaktröhrenofen steigt die Raumausnutzung mit wachsendem Rohrdurchmesser von Wert 0 bis auf 54 % bei Durchmesser 50 mm an. Durch andere Rohranordnung bezw. durch Hinzuschalten der Rohre mit verringertem Abstande wäre insbesondere bei kleinen Rohrdurchmessern eine Verbesserung zu erzielen. Jedoch wachsen dann mit abnehmendem Rohr-Durchmesser die Schwierigkeiten für die Wasser-bezw. Luftzuführung auf der Kühlmittelseite.

Der Außenkontaktröhrenofen zeigt einen um so größeren Prozentsatz des umbauten Raumes mit Kontakt gefüllt auf, je kleinere Kühlrohre man verwendet. Mit dem Kühlrohrdurchmesser 0 erreicht man den Wert 100 %. Praktisch lassen sich jedoch Kleinere Kühlrohre als 10 mm l.W. verwenden, sodaß sich diese Grenzwerte nicht erreichen lassen. Auch bei dieser Ofenbauart steigt die Raumausnutzung um so günstiger, je weniger temperaturempfindlich das Material ist. Bei der Ofen einer Innenkontaktröhrenofen von 40 mm größtem

[illegible] 10 mm [illegible] bei 10 m Ø [illegible] das äußere Kühlrohr liegt demnach [illegible] Ofenwand [illegible] mit der Durchmesser [illegible] des äußeren Kühlrohr [illegible] identisch mit den entsprechenden [illegible]. Ebenso wie bei den anderen Ofenbauarten [illegible] eine um so bessere Raumausnutzung, je größer der Durchmesser des [illegible] ist, [illegible] wie der Verlauf der eingezeichneten Kurven für 14, 10 und 30 mm Ø zeigt.

Zusammenfassung.

Es wurde eine Berechnungsmethode 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 inbezug auf Kühlflächenaufwand und Ausnutzung des nutzbaren Raumes verglichen. Für die Wahl eines Reaktionsofens sind neben diesen charakteristischen Größen noch andere Forderungen wie z.B. Höhe der Kontaktschicht, lineare Strömungsgeschwindigkeit, Entleerbarkeit, Beobachten, konstruktive Ausführbarkeit usw. maßgebend, die in der Rechnung jedoch nicht in Erscheinung treten.