

Der Druckverlust in Gasaer Kieselgel.

(Versuchsbericht)

1. Einleitung.

Für den Bau von Kieselgelanlagen zur Trocknung und Reifigung von Gasen ist es wichtig, den Druckverlust des Gases in der Kieselgelschicht für alle vorkommenden Betriebsverhältnisse vorausberechnen zu können. Widerstandsmessungen ähnlicher Art, die an anderen Körpern, z.B. an Füllkörpern in Absorptions- und Rektifikationstürmen ¹⁾ oder an kleinen und kleinsten Körnern ²⁾ und staubförmigen Stoffen ³⁾ aus der Literatur bereits bekannt sind, können nicht ohne weiteres auf Kieselgelkörner übertragen werden, da bei diesem Übergang von anderen Stoffen die Forderung des Reynolds'schen Ähnlichkeitsgesetzes nicht streng erfüllt werden kann, denn die Reynolds-Zahl kann hier nur sehr schwer richtig erfaßt werden. Diese wird nämlich hier im allgemeinen auf die Strömungsgeschwindigkeit im leeren Rohrquerschnitt und auf den Durchmesser der sehr unregelmäßig geformten Körner bezogen (modifizierte Reynolds-Zahl). Außerdem erlaubt die Oberflächenbeschaffenheit der Kieselgelkörner nicht die Übertragung der an anderen Körnern gleicher Größe erhaltenen Resultate. Da das Schüttgewicht bei loser Schüttung etwa 5 bis 10 % tiefer liegt als bei Rüttelung, ist be -

¹⁾ E. Mach, Druckverluste und Belastungsgrenzen von Füllkörpersäulen. V.D.I.Forschungsheft 375 (1936) (dort finden sich auch weitere Literaturangaben.)

²⁾ A. Wagner, A. Hohlschuh u. W. Barth. Gasdurchlässigkeit von Schüttstoffen, besonders von Hochofenmüllerstoffen. Arch.Eisenhüttenwes. 6 (1932) S.129.

³⁾ W. Barth u. W. Esser. Der Druckverlust in geschichteten Stoffen. Forschg. 4 Hft. 2 S. 82 (1933)

sonders bei Gemischen verschiedener Korngrößen das Zwischenvolumen starken Schwankungen unterworfen, die ebenfalls die Widerstandsmessung beeinflussen.

Es wurden daher neue Versuche angestellt, um die Abhängigkeit des Widerstandes von Oppauer Kieselgel von allen in Frage kommenden Größen festzustellen.

2. Theoretische Vorbemerkungen.

Den Berechnungen wird gewöhnlich die Gleichung für den Druckverlust in Röhren zu Grunde gelegt. Diese lautet:

$$\Delta p = \lambda \frac{w^2 \ell}{2 g d} \quad (1)$$

$$\text{oder } \lambda = \frac{2 g d \Delta p}{w^2 \ell} \quad (1a)$$

Die dimensionslose Widerstandsziffer λ hängt darin von der Reynolds-Zahl Re ab:

$$\lambda = f(Re).$$

Die modifizierte Reynolds-Zahl ist:

$$Re = \frac{w d \rho}{\eta} \quad (2)$$

In diesen Gleichungen sollen nun bedeuten:

- Δp den Druckverlust in mm WS bzw. kg/m^2 ,
- l die Schichthöhe in m,
- w die Strömungsgeschwindigkeit im freien Rohrquerschnitt in m/sec.,
- ρ das spezifische Gewicht des Gases in kg/m^3 ,
- η die dynamische Zähigkeit des Gases in $\frac{kg \cdot sec}{m^2}$,
- d den mittleren Korndurchmesser, gemessen in m!

Für glatte leere Röhre ist bei laminarer Strömung λ proportional $\frac{1}{Re}$ und bei turbulenter Strömung proportional $\frac{1}{\sqrt{Re}}$. Bei rauhen Röhren bleibt nach den bisher bekannten Widerstandsgesetzen λ bei laminarer Strömung proportional $\frac{1}{Re}$ während bei turbulenter Strömung λ allmählich weniger abhängig von Re wird. Bei diesem Unterschied der Strömungswiderstände in rauhen gegenüber glatten leeren Röhren können bei der Strömung durch Kieselgel auch Verhältnisse erwartet

worden, die sich nicht im Voraus abschätzen lassen. Die folgenden Messungen hatten also zum Ziel, zu prüfen, ob ein eindeutiger Zusammenhang zwischen λ und Re speziell für Kieselgel besteht und wie die Kurve verläuft.

Trotz des zu erwartenden gekrümmten Verlaufs der λ -Kurve auf Potenspapier (beide Achsen logarithmisch geteilt) kann für einen kleinen Bereich der Reynolds-Zahlen eine Gerade eingezeichnet werden, für die sich in einfacher Weise die Gleichung ablesen lässt:

$$\lambda = \alpha Re^{-x} \quad (3)$$

Für diesen kleinen Bereich gilt dann bei Verwendung von Gleichung (2) die folgende Druckverlustformel, in der die Reynolds-Zahl nicht mehr vorhanden ist:

$$\Delta p = \frac{\alpha}{2} \frac{1}{g^{1-x}} \cdot l \cdot \frac{w^{2-x} (1-x) \eta^x}{d^{1+x}}$$

Nach Einführung der Konstanten

$$\beta = \frac{\alpha}{2} \frac{1}{g^{1-x}} \quad (4)$$

lautet die Formel:

$$\Delta p = \beta \cdot l \cdot \frac{w^{2-x} (1-x) \eta^x}{d^{1+x}} \quad (5)$$

Mit Hilfe dieser Formel läßt sich in allen Fällen in dem betreffenden Bereich der Reynolds-Zahlen der Druckverlust schnell direkt ausrechnen, während normalerweise die Gleichungen (2) und (1) mit Hilfe der Kurve zur Berechnung dienen.

In einer ähnlichen Rechenformel in der Arbeit von E. Mach ¹⁾ wird die Abhängigkeit der Druckverluste von der Gaszähigkeit nicht berücksichtigt. Der Faktor η^x fällt dort aber nur deshalb nicht stark ins Gewicht, weil diese Formel für größere Reynolds-Zahlen gilt, bei welchen x kleiner wird (in diesem Fall etwa $x = 0,2$).

In der Veröffentlichung von W. Barth und W. Esser ³⁾ erhält die oben angeführte Gleichung (1) auf Grund theoretischer Überlegungen noch den Berichtigungsfaktor C_1 und die Gleichung (2) den Faktor C_2 . Diese Faktoren berücksichtigen das Volumen der Zwischenräume in der Schüttung und machen die Re, λ Kurve

allgemeingültiger. Ist ξ das Volumen der Zwischenräume je Raumeinheit, so sind die Berichtigungsfaktoren

$$C_1 = \frac{1 - \xi}{\xi^3} \quad (6)$$

$$\text{und } C_2 = \frac{1}{4 \xi (1 - \xi)} \approx 1 \quad (7).$$

Bei den vorliegenden Kieselgelsorten wurde daher auch das Zwischenvolumen bestimmt; aber es zeigte sich, daß die Anwendung dieser Faktoren die Kurven für die verschiedenen Körnungen wesentlich zerstreute, da sich Fehler in den Q Werten stark auswirkten. Außerdem wurde die allgemeine Kurve von W. Barth und W. Esser nicht erreicht. Es wurde daher zugunsten größerer Genauigkeit auf diese Umrechnung verzichtet. Das Zwischenvolumen, ausschließlich des Porenvolumens betrug bei einer besonders gleichmäßigen Sorte bei loser Schüttung 40 %, also ist $Q = 0,4$.

3. Versuchseinrichtungen.

Zur Messung der Druckverluste dienten zwei Apparaturen. Im ersten Fall wurde ein senkrecht stehendes Rohr von der Länge 1,5 m und von Durchmesser 0,6 m verwendet und Luft aus der Druckluftleitung durch diesen großen Querschnitt und durch die durchschnittliche Schichthöhe des Kieselgels von 0,5 m geblasen. Zur Messung der Luftmenge diente eine Meßstrecke mit Drosselscheibe in der Druckluftleitung. Vor der Meßstrecke befand sich noch ein geschlossenes Gefäß mit Kieselgel zur Reinigung der Luft von Wasser und Öl.

Die zweite Apparatur bestand aus einem kleineren Kreislaufsystem mit einem gasdichten Gebläse, einer Mengenneßeinrichtung und einem Rohr von 1 m Höhe und 0,1 m Durchmesser zur Aufnahme des Kieselgels. Vgl. Abb. 1. In dieser Apparatur konnte auch mit Gasen z.B. Wasserstoff und Kohlendioxyd gemessen werden. Der Druckverlust wurde durch ein Wassermanometer angezeigt. Bei kleinen Drucken wurde ein Schrägrohrmanometer benutzt. Die in sich geschlossene Apparatur erlaubte unabhängig vom Luftdruck bei stets gleichen Versuchsbedingungen zu messen.

4. Versuchsergebnisse.

Zur Verfügung standen die in Oppau verkäuflichen Kieselgelsorten A (engporig) und B (weitporig) in den Korngrößen 2 bis 4 mm (im Mittel $d = 0,003m$) und 4 bis 6 mm im Mittel $d = 0,005 m$). Außerdem wurden noch gemessen die zum Verkauf gelangenden Mischungen.

von A : 70 % 2 bis 4 mit 30 % 4 bis 6 mm (im Mittel $d = 0,0036 m$)
und von B : 60 % 2 bis 4 mit 40 % 4 bis 6 mm (im Mittel $d = 0,0038 m$).

Für diese Korngrößen ließ sich der mittlere Durchmesser nicht genau genug angeben. Es wurde auch versucht, die Körnermenge in einem kleinen gemessenen Volumen auszuzählen und so den mittleren Raum zu bestimmen, der einem einzelnen Korn zukommt. Wenn als mittlerer Korndurchmesser die 3. Wurzel dieses mittleren Raumes angenommen wurde, so zeigten die $R_e; \lambda$ Kurven eine gleichgroße Schwankung um annähernd denselben Mittelwert wie bei Annahme der durch die Siebe gegebenen mittleren Maschenweiten.

Um jedoch neben der Messung dieser Verkaufssorten Resultate mit größerer Sicherheit zu erhalten, wurde eine weitporige Kieselgelsorte mit größerer Sorgfalt gesiebt, sodaß sie in dem engeren Korngrößenbereich zwischen 3 und 4 mm (im Mittel $d = 0,0035 m$) erhalten wurde. Der Widerstand dieser Sorte wurde mit Luft, Kohlendioxyd und Wasserstoff bei verschiedenen Geschwindigkeiten in der kleinen Apparatur gemessen. Alle Messungen wurden bei loser Schüttung des Materials vorgenommen.

Für die schnelle Auswertung wird es in der Technik zuweilen gewünscht, den Druckverlust direkt in Abhängigkeit von der Gasgeschwindigkeit aufzuzeichnen. Dies ist natürlich nur für einen ganz speziellen Zustand eines Gases und für nur eine Korngröße möglich. Für Luft im Zustand von etwa 760 mm Q.S. und $15^{\circ} C$ wurde diese Darstellung für die Versuche mit den Verkaufssorten bei Messungen in der großen Apparatur gewählt, siehe Kurvenblatt Abb. 2. Bei dieser Kurvenschar ist die Korngröße d also Parameter.

Bei den Versuchen in der kleinen Apparatur jedoch, bei welchen ver-

schiedene Gase zur Anwendung kamen, also außer d auch δ und η verändert wurden, war die dimensionslose Darstellung der Widerstandsziffer λ als Funktion der Reynolds-Zahl Re sinnvoller, da alle Kurven zusammenfallen oder sich ergänzen sollen, wodurch leicht eine Kritik der Genauigkeit ermöglicht wird. Siehe Abb. 3. Mit Wasserstoff (in den Kurven durch x gekennzeichnet) und mit Kohlenoxyd (durch $.$ gekennzeichnet) ließ sich die mit Luft (durch o gekennzeichnet) erhaltene Kurve nach beiden Seiten verlängern.

In Abb. 3 sind die aus der Abb. 2 ungerechneten Kurven zum Vergleich noch einmal eingezeichnet. Es zeigt sich, daß alle diese Kurven in der Richtung genau übereinstimmen, denn die in den Gleichungen vorkommenden Größen λ , p , l und w lassen sich sehr genau messen, und δ und η sind im allgemeinen für den gegebenen mittleren Druck und die vorhandene Temperatur sehr genau aus Tabellen zu entnehmen.⁴⁾ Eine Ausnahme bildet nur die Bestimmung der Größe von d . Ihre Ungenauigkeit allein verschuldet die bei der Auswechslung der Kieselgelsorte auftretende Streuung der Kurven. Da sowohl λ als auch Re direkt proportional d sind, beeinflußt ein Fehler von d diese Größen im gleichen Sinn, d.h. die λ -Kurven verschieben sich etwa senkrecht zu ihrem Verlauf, wodurch die Streuung stark ins Auge fällt. Umgekehrt wäre es dagegen leicht, bei schon genau bekannter Re ; λ Kurve die Druckverlustmessung zur Bestimmung des mittleren Korndurchmessers zu verwenden.

An erster Stelle wurde an einer Kieselgelsorte die vollkommene Proportionalität zwischen Schichthöhe und Druckverlust bei sonst gleichen Bedingungen festgestellt. Unterschiede im Druckverlust zwischen Messungen mit feuchter Luft und vorher durch Kieselgel getrockneter Luft wurden keine beobachtet. Auch zeigte sich kein Unterschied im Druckverlust zwischen eng- und weitporigen Kieselgelsorten. In den Untersuchungen des Herrn Dr. König⁵⁾ wird angegeben, daß

4) siehe VDI Durchfluß-Meßregeln.

5) Dr. König. Widerstand von Kieselgel gegen strömende Gase. Ammoniaklaboratorium Oppau. Laborbericht vom 14. 2. 31 Nr. 1168.

Die technische Auswertung der Messungen in dieser Arbeit ist behandelt in der Arbeit von Dipl. Ing. Lehmann. Druckverlust in Schüttstoffen.

Oppauer Kieselgel. Bericht des techn. Prüfstandes v. 21. 1. 1936 Nr. 301

der Widerstand der weitporigen Sorten größer sei als der der engporigen. Bei Betrachtung mehrerer Beispiele zeigt es sich jedoch, daß dort auch der umgekehrte Fall auftritt, was lediglich auf Schwankungen der Resultate zurückzuführen ist. Da dort auch der Widerstand nicht proportional der Schichthöhe war, fehlte eine wichtige Voraussetzung zur Messung, wodurch ein Vergleich dieser Meßergebnisse mit den hier vorliegenden erschwert wird.

Abb. 4 zeigt die mit der gleichmäßigeren Kieselgelsorte gewonnene und auf Potenzpapier aufgezeichnete Kurve für den Widerstandsbeiwert in Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl mit dem für das Übergangsgebiet von laminarer zu turbulenter Strömung charakteristischen gekrümmten Verlauf. Während bei kleinen Reynolds-Zahlen, also im laminaren Gebiet, λ proportional $\frac{1}{Re}$ ist, wird λ im turbulenten Gebiet etwa proportional $\frac{1}{\sqrt[6]{Re}}$.⁶⁾ Für die Kurve der Abb. 4 wurde empirisch die Gleichung gefunden:

$$\lambda = \frac{2440}{Re} - \frac{180}{\sqrt[2]{Re}} + \frac{134}{\sqrt[6]{Re}} \quad (8)$$

Für kleine Reynolds-Zahlen ist das erste Glied maßgebend und bei großen Reynolds-Zahlen tritt das letzte Glied in den Vordergrund. Das mittlere Glied gibt ungefähr die mittlere Krümmung der Kurve wieder und wurde eingeführt, damit die Gleichung die Kurve auch im Übergangsgebiet genau wiedergibt.

Zur Ermittlung des Druckverlustes Δp muß also zunächst die modifizierte Reynolds-Zahl nach Gleichung (2) berechnet werden, sodann λ graphisch aus der Kurve (Abb. 4) oder rechnerisch aus Gl. (8) ermittelt und Δp aus Gl. (1) bestimmt werden.

Wie aus Abb. 3 hervorgeht, kommt für viele Fälle nur ein kleiner Bereich der modifizierten Reynolds-Zahlen in Betracht. So läßt sich beispielsweise im Bereich $20 < Re < 70$ (d.h. für Luft im Normalzustand für die Strömungs-

⁶⁾ Ähnliche Resultate zeigten sich auch bei Arbeiten des Technischen Prüfstandes, Oppau, an anderen Körpern. Vgl. auch die Arbeit:

G. Kling. Das Wärmeleitvermögen eines Kugelhäufwerks. Forschg. 9

geschwindigkeit $0,07 < w < 0,25 \frac{m}{sec}$, wenn $d \sim 0,004 m$ ist) durch die Re; λ Kurve eine Gerade legen. Entsprechend Gleichung (5) lassen sich auf dem Potenspapier die Werte

$$a = 880$$

$$\text{und } \lambda = 0,58$$

und damit die Gleichung

$$a = 880 \cdot Re^{-0,58} \text{ graphisch ablesen.}$$

Aus Gleichung (4) folgt die Konstante

$$\beta = 168,5$$

und aus Gleichung (5) die Formel für den Druckverlust

$$\Delta p = 168,5 \cdot l \cdot \frac{w^{1,42} \rho^{0,42} \gamma^{0,58}}{d^{1,58}} \quad (9)$$

Aus dieser Formel kann der Druckverlust für einen bestimmten Bereich logarithmisch schnell errechnet werden.

5. Zusammenfassung.

Es wurden Druckverlustmessungen an mehreren Kieselgeisorten vorgenommen bei Änderungen der Schichthöhe, der Strömungsgeschwindigkeit, des mittleren Korndurchmessers und des Gases, d.h. des spezifischen Gewichtes und der Zähigkeit. Innerhalb dieser Kieselgeisorten war das Reynolds'sche Ähnlichkeitsgesetz bei Einführung einer modifizierten Reynolds-Zahl streng erfüllt, sodaß bei einer Änderung der obengenannten Größen nur die Änderung der Reynolds-Zahl für die Widerstandsziffer maßgebend war. Aus Druckverlustmessungen wurde die Abhängigkeit der dimensionslosen Widerstandsziffer von der Reynolds-Zahl experimentell ermittelt und auf Potenspapier graphisch aufgetragen. Die Gleichung dieser Kurve wurde empirisch bestimmt. Für einen bestimmten kleineren Bereich der Reynolds-Zahlen wurde außerdem eine Formel angegeben, aus welcher der Druckverlust direkt berechnet werden kann.

R. G. G.

M. M.

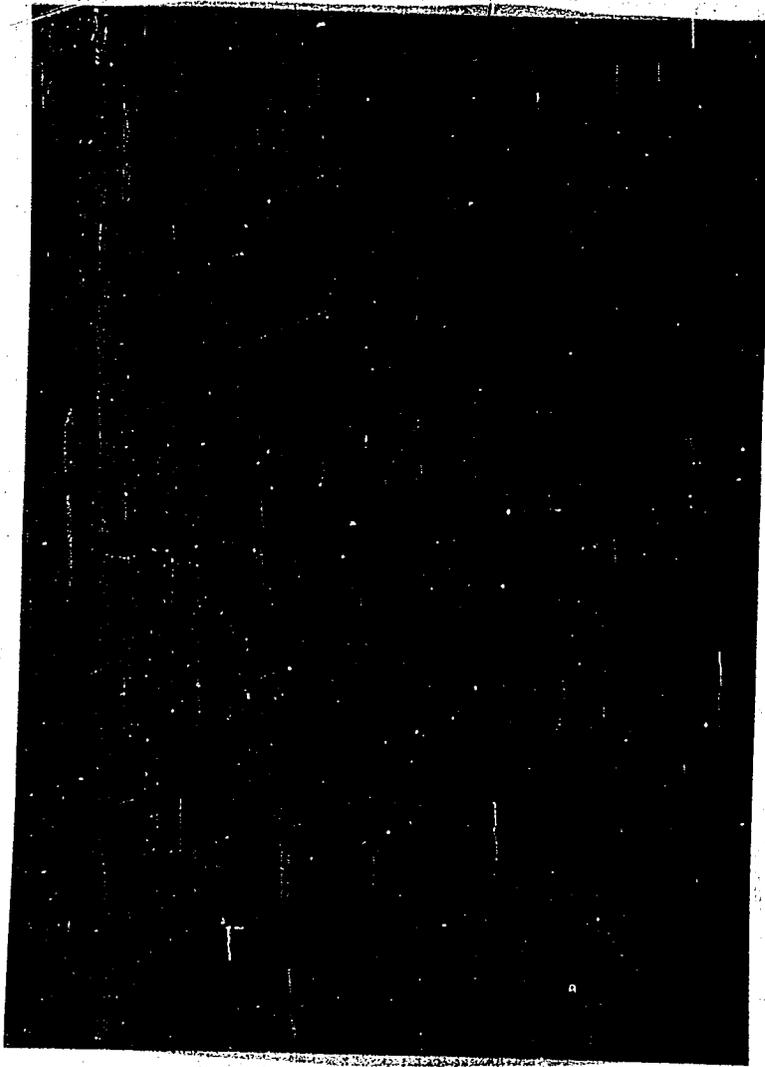
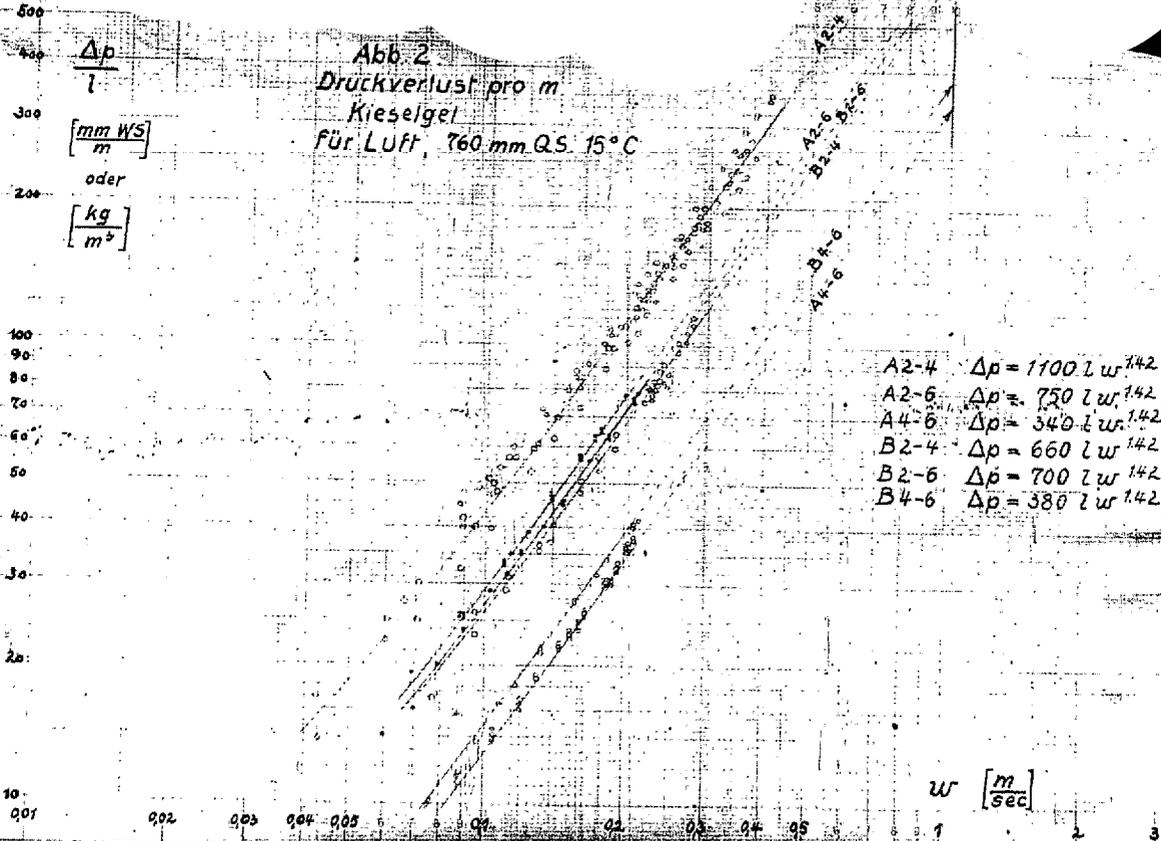


Abb. 1. Kreislaufapparatur.

- a Gebläse,
- b Schieber,
- c Gebläse,
- d Kieselgel zur Reinigung,
- e Kieselgel zur Druckverlustmessung,
- f Stützen zur Differenzdruckmessung,
- g Stützen zur Messung des mittleren Druckes,
- h Mengeneinrichtung,
- i Stützen zur Druckmessung bei der Mengemessung.

8379

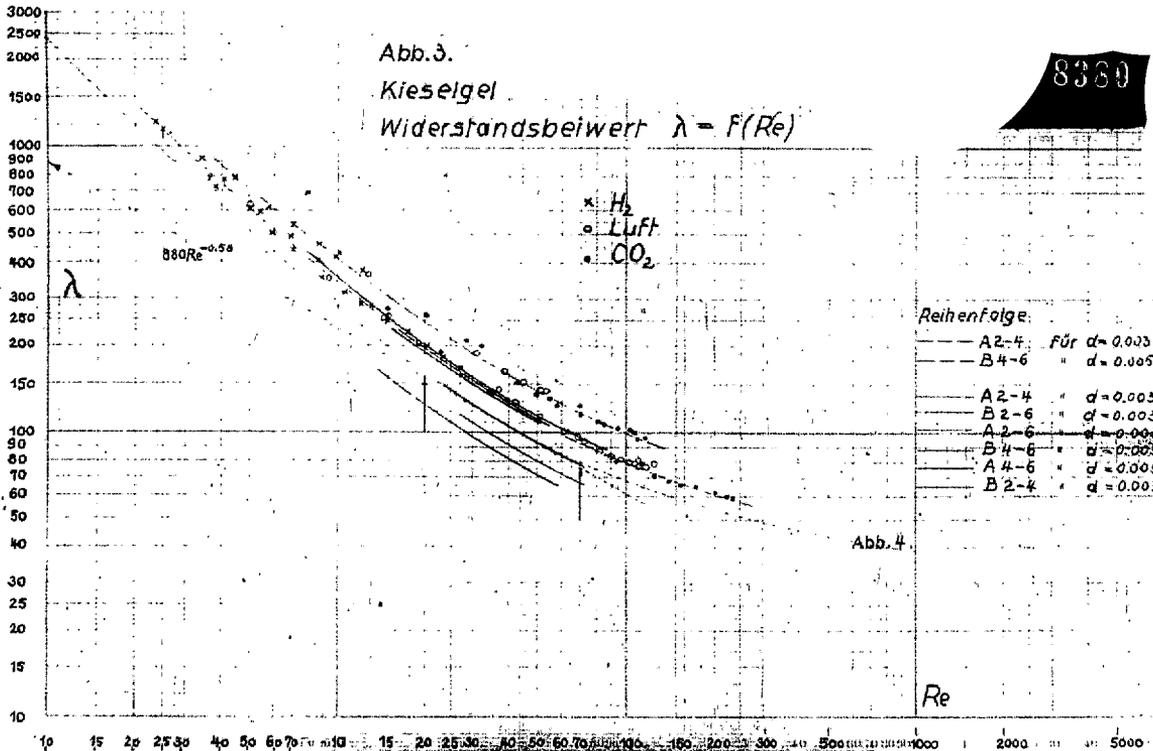
Abb. 2
Druckverlust pro m
Kieselgel
für Luft, 760 mm Q.S. 15°C



A. 6

8380

Abb. 3.
Kieselgel
Widerstandsbeiwert $\lambda = f(Re)$



8361

Abb. 4

Kieselgel

Widerstandsbeiwert $\lambda = \frac{2440}{Re} - \frac{180}{\sqrt{Re}} + \frac{134}{Re}$

