



## Praktikum "Experimentelle Strömungsmechanik"

### Versuch S4: Druckverluste in Strömungen durch Kugelschüttungen

#### Inhalt

<b>1. Aufgabenstellung</b> .....	<b>2</b>
<b>2. Theoretische Grundlagen</b> .....	<b>2</b>
2.1. Druckverluste in Festbettschüttungen.....	2
2.2. Druckverluste in Wirbelschichten .....	4
2.3. Abschätzung der Druckverluste der Rohrströmung oberhalb der Schüttungen .....	6
2.4. Bestimmung von Dichten und Porositäten .....	6
2.4.1. Dichte von Flüssigkeiten .....	6
2.4.2. Dichte von Festkörpern.....	7
2.4.3. Schütt- bzw. Rütteldichte und Porosität von Partikelschüttungen .....	7
2.5. Differenzdruckmessung.....	9
2.6. Messung des Volumenstromes .....	9
<b>3. Versuchsstände</b> .....	<b>10</b>
3.1. Versuchsstand Wasser (Abb. 8).....	10
3.2. Versuchsstand Luft (Abb. 9) .....	11
3.3. Geometrische Kenngrößen der Kolonnen und Stoffwerte .....	11
<b>4. Versuchsdurchführung</b> .....	<b>12</b>
4.1. Dichte von Wasser.....	12
4.2. Schüttungsparameter.....	12
4.2.1. Porosität der Schüttung in Luft .....	12
4.2.2. Porosität der Schüttung in Wasser.....	12
4.3. Wasserdurchströmte Schüttungen .....	13
4.4. Luftdurchströmte Schüttung .....	13
<b>5. Versuchsauswertung</b> .....	<b>14</b>
5.1. Dichte von Wasser und Schüttungsparameter .....	14
5.2. Kolonnen: Druckverluste und Porositäten .....	14
<b>6. Literaturempfehlungen und verwendete Literatur</b> .....	<b>15</b>

## **1. Aufgabenstellung**

- a. Ermitteln Sie die Dichte von Wasser und die Anfangsporositäten der ruhenden Kugelschüttungen in Wasser und Luft bei Raumtemperatur.
- b. Bestimmen Sie die Druckverluste in Kugelschüttungen unterschiedlicher Kugeldurchmesser, Packungshöhen, Anströmgeschwindigkeiten und Fluide.

## **2. Theoretische Grundlagen**

Strömungen durch Haufwerke, Packungen von Partikeln oder poröse Materialien besitzen eine hohe technische Relevanz. Als Beispiele seien aufgeführt:

- Stoffaustauschvorgänge in Apparaten der biologischen, chemischen, thermischen und mechanischen Verfahrenstechnik
- Filter-, Trocknungs- und Mischvorgänge
- Sickerströmungen (Umweltschutz)
- pneumatische Förderung

Zur Dimensionierung von Apparaten wie Pumpen oder Reaktoren ist der Druckverlust eine wesentliche Größe. Er stellt sich aufgrund einer komplizierten dreidimensionalen Strömung ein und ist ein integrales Maß für die Reibungskräfte sowohl zwischen den Partikeln (interpartikuläre Reibung) wie auch zwischen den Partikeln und dem umgebenden Fluid. Neben den Strömungskräften wirken auf die Partikel vor allem die Schwerkraft, aber auch elektrostatische, Kapillar- und besonders bei sehr kleinen Partikeln van-der-Waals-Kräfte, die indirekt über die Packungsdichte die Reibungskräfte beeinflussen können.

Haufwerke werden durch *granulometrische Kenngrößen* wie Partikelgröße, Partikelgrößenverteilung, Packungsdichte bzw. Porosität sowie durch geometrische Größen wie Schüttungshöhe charakterisiert. Die Strömung wird durch die (mittlere) Anströmgeschwindigkeit der Schüttung sowie die Dichte und Viskosität des strömenden Fluids bestimmt.

Wirkt das Eigengewicht der Partikel der Strömungskraft entgegen und liegt für die Packung kein Formschluss vor, wird die Packung bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten aufgelockert. Die Partikel schweben aufgrund des Gleichgewichts zwischen Druck- und Schwerkraft, es bildet sich eine *Wirbelschicht*<sup>1</sup>. Mit steigender Anströmgeschwindigkeit lockert die Wirbelschicht zunehmend auf, bis es schließlich zur Förderung oder bei partikelundurchlässigem Austritt zum Absetzen der Partikel an der Oberseite kommt. Das sich an der Oberseite bildende Festbett (Filter-schicht) ist dann jedoch nur bei genügend großen Anströmgeschwindigkeiten stabil. In der Bildungsphase dieses oberen Festbettes können teilweise drei klar voneinander getrennte Bereiche beobachtet werden: das obere Festbett, eine Zwischenschicht aus reiner Flüssigkeit sowie das untere Wirbelbett.

### **2.1. Druckverluste in Festbettschüttungen**

Im Festbett berühren sich die Partikel permanent, das Partikelhaufwerk liegt aufgrund des Eigengewichtes auf der Unterlage<sup>2</sup>. Es wirkt folglich wie ein Sieb oder Gitter. Das Fluid (Wasser,

---

<sup>1</sup> Wirbelschichten sind wegen der intensiven und effektiven Wärme- und Stoffaustauschvorgänge häufig erwünscht.

<sup>2</sup> Wir setzen voraus, dass die Partikeldichte größer als die Fluid-dichte ist ( $\rho_s > \rho_f$ ).

Luft) strömt durch die Poren der Schüttung. Der Druckverlust steigt mit der Durchflussgeschwindigkeit an (vgl. Abb. 1).

Bereits 1856 formulierte DARCY in Anlehnung an die laminare Rohrströmung den Zusammenhang zwischen mittlerer Durchflussgeschwindigkeit  $\bar{u} = 4\dot{V}/\pi D^2$  ( $\dot{V}$  ...Volumenstrom,  $D$ ...Innendurchmesser der Kolonnen) und Druckverlust  $\Delta p_V$ :

$$\bar{u} = \frac{B}{\eta_F} \frac{\Delta p_V}{H_0} \quad (1)$$

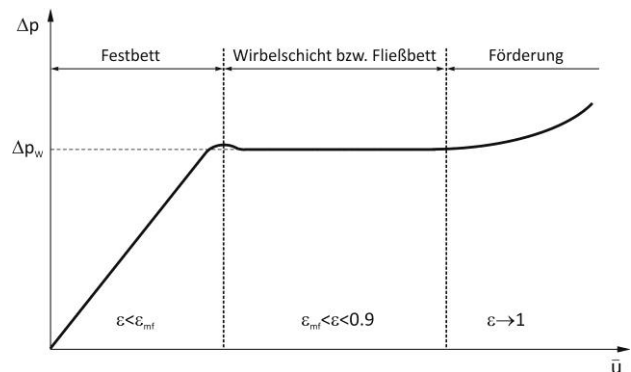


Abb. 1: Verlauf des Druckverlustes bei der Durchströmung von Schüttungen

Es bedeuten  $\eta_F$  die dynamische Viskosität des durchströmenden Fluids,  $\Delta p_V$  der Druckverlust in der Festbett-Schüttung mit der Höhe  $H_0$  und  $B$  die DARCYsche Filterkonstante. Gl. (1) gilt nur für laminare Strömungen, d. h. für kleine Partikel-REYNOLDS-Zahlen  $Re_p < 1$  (Gl. (4)). Die experimentell zu bestimmende "Filterkonstante" ist keine Stoffgröße, sondern von den granulometrischen Eigenschaften des Haufwerkes (Partikelgröße und Partikelform, Packungsdichte) und den Fluideigenschaften abhängig.

Dimensionsanalytische Betrachtungen führen zu einer Systematisierung und Reduzierung der Einflussparameter:

- die Porosität  $\varepsilon$  charakterisiert das Lückenvolumen bzw. die Packungsdichte der Partikel<sup>3</sup> ( $V_F$ ...Fluidvolumen,  $V_S$ ...Feststoffvolumen)

$$\varepsilon = \frac{V_F}{V_S + V_F} \quad (2)$$

- der Druckverlust, bezogen auf den hydrodynamischen oder Staudruck der mittleren Anströmgeschwindigkeit, wird als EULER-Zahl  $Eu$  bezeichnet<sup>4</sup>; sie ist dem bei Rohrströmungen eingeführten Reibungsbeiwert  $\zeta$  proportional ( $\Delta p_V$  ...Druckverlust der Schüttung,  $\rho_F$  ... Dichte des Fluids)

$$Eu = \frac{\Delta p_V}{\rho_F \bar{u}^2} \quad (3)$$

- Für die Widerstandskraft am umströmten Partikel ist die mit der Partikelabmessung gebildete Partikel-REYNOLDS-Zahl  $Re_p$  von Bedeutung ( $\bar{d}_p$  ...mittlerer Partikeldurchmesser,  $\nu_F$  ...kinematische Viskosität des Fluids ( $\nu_F = \eta_F / \rho_F$ ))

$$Re_p = \frac{\rho_F \bar{u} \bar{d}_p}{\eta_F} = \frac{\bar{u} \bar{d}_p}{\nu_F} \quad (4)$$

<sup>3</sup> Indizes: S...Solid (Feststoff), F...Fluid (Flüssigkeit)

<sup>4</sup> Der Faktor  $\frac{1}{2}$ , der beim Staudruck normalerweise auftritt, wird aufgrund der dimensionsanalytischen Betrachtung nicht wiedergegeben.

- Als charakteristisches Längenverhältnis wird unter der Voraussetzung eines vernachlässigbaren Wandeinflusses gewählt:

$$\delta = \frac{\bar{d}_p}{H_0} \quad (5)$$

Die Dimensionsanalyse führt unter der Voraussetzung einer gleichmäßigen, homogenen Schüttung der Höhe  $H_0$  zur Aussage, dass der dimensionslose Verlustbeiwert ( $Eu$ ) ähnlich wie bei der ausgebildeten Rohrströmung proportional dem Längenverhältnis ist. Die noch unbekannte Funktion der übrigen dimensionslosen Parameter muss jedoch experimentell bestimmt werden:

$$Eu = \frac{1}{\delta} f(Re_p, \varepsilon) \quad (6)$$

Als Beispiel für einen experimentell ermittelten Zusammenhang sei die Beziehung von Molerus, Pahl und Rumpf<sup>5</sup> angeführt:

$$Eu = K \cdot \frac{1}{\delta} \cdot \underbrace{\frac{22.4}{Re_p} (1 - \varepsilon) \varepsilon^{-4.55}}_{f(Re_p, \varepsilon)} \quad \text{mit} \quad K = 2 \quad (7)^6$$

Diese Beziehung gilt für monodisperse sphärische Partikel für  $Re_p \leq 1$  und  $0.35 < \varepsilon < 0.7$ . In der Literatur sind weitere experimentell ermittelte Gleichungen zu finden, die auch unterschiedlichen Partikelformen Rechnung tragen.

## 2.2. Druckverluste in Wirbelschichten

Steigen die Strömungskräfte mit zunehmendem Volumenstrom so an, dass sie das Eigengewicht der Partikel kompensieren, so lösen sich die Partikel von ihrer Unterlage ab (vgl. Versuch S1b: Kugelfall-Viskosimeter). Im Fall des Gleichgewichtes zwischen Strömungs-, Gewichts- und hydrostatischen Auftriebskräften schweben die Partikel am Ort, ohne von der Strömung mitgerissen zu werden<sup>7</sup>. Die Partikel bilden eine deutlich abgegrenzte Säule, die Wirbelschicht.

Mit steigender Anströmgeschwindigkeit lockert die Säule zunehmend auf, es können Porositäten bis  $\varepsilon = 0.9$  erreicht werden. Die lokale, für die Widerstandskraft

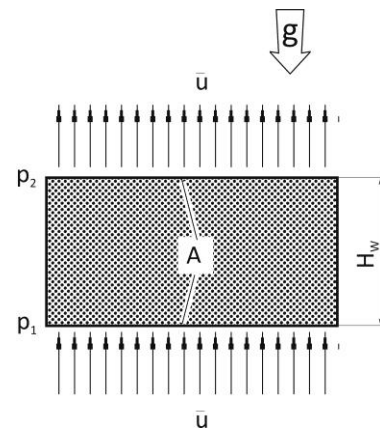


Abb. 2: Kontrollraum für Impulsbilanz

der Partikel verantwortliche Partikelanströmgeschwindigkeit steigt bis zur Förderung nicht wesentlich an. Aus diesem Grund bleibt der Schwebezustand über einen relativ weiten Bereich der Anströmgeschwindigkeit erhalten. Der Druckverlust ändert sich in diesem Bereich ebenfalls nicht. Dies lässt sich mit dem Impulssatz nachweisen. Angewandt auf eine aufgelockerte Parti-

<sup>5</sup>O. Molerus, M. H. Pahl, H. Rumpf *Die Porositätsfunktion in empirischen Gleichungen für den Durchströmungswiderstand im Bereich  $Re < 1$* , Chem.-Ing.-Tech. **43** (1971) 6, S. 376-378

<sup>6</sup>Der Faktor  $K$  ist ein Korrekturfaktor zur Anpassung an die konkreten experimentellen Daten.

<sup>7</sup>Bei turbulenter Strömung bewegen sich die Partikel natürlich nahezu mit der lokalen Geschwindigkeit des umgebenden Fluids, soweit die Partikelträgheit vernachlässigbar ist. Ein am Ort schwebendes Partikel würde nur unter laminarer Strömung auftreten.

kelsäule der Fläche  $A$  und der Höhe  $H_W$  erhalten wir mit  $m_s$  als Masse der Partikel bzw.  $m_f$  als Masse der Flüssigkeit in den interpartikulären Räumen der Wirbelschicht unter Vernachlässigung der Reibungskräfte an der Rohrwand und unter Annahme gleicher An- bzw. Abströmgeschwindigkeiten  $\bar{u}$  (vgl. Abb. 2)

$$(\rho_1 - \rho_2)A = (m_s + m_f)g \quad (8)$$

bzw.

$$(\rho_1 - \rho_2) = (1 - \varepsilon)\rho_s g H_W + \varepsilon \rho_f g H_W \quad (9)$$

Die Drücke  $p_1$  und  $p_2$  sind dabei die Absolutdrücke.

Der Anteil der hydrostatischen Druckdifferenz in der vertikalen Säule der Höhe  $H_W$  ergibt sich entsprechend Abb. 2 zu

$$\Delta p_H = \rho_f g H_W \quad (10)$$

Somit ist der Anteil des durch die Reibungsverluste in der Wirbelschicht verursachten Druckverlustes

$$\Delta p_V^* = p_1^* - p_2^* = (\rho_1 - \rho_2) - (\Delta p_H + \Delta p_K) \quad (11)$$

*Am Versuchsstand wird der hydrostatische Druck  $\Delta p_H$  aufgrund des Differenzdruckmessprinzips bereits kompensiert und muss nicht berücksichtigt werden!* Wichtig ist also nur noch eine Abschätzung der Reibungsverluste  $\Delta p_K$ , die durch die Durchströmung des leeren Kolonnenabschnittes oberhalb der Schüttung auftreten, denn es wird die Druckdifferenz (vgl. Abb. 7 auf Seite 11)

$$\Delta p_V^* = p_1^* - p_2^* = (\rho_1 - \rho_2) - \Delta p_K \quad (12)$$

gemessen (vgl. hierzu Abschnitt 2.3).

Unter Berücksichtigung einer aus der Inkompressibilität der Wirbelschicht ableitbaren Porositätsfunktion  $\varepsilon = f(\varepsilon_0, H_0/H_W)$  erhalten wir aus den Beziehungen (9), (10) und (11) den von der aktuellen Expansion der Wirbelschicht unabhängigen Druckverlust infolge Reibung in der Wirbelschicht

$$\Delta p_V = (1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho_f)gH_W = (1 - \varepsilon_0)(\rho_s - \rho_f)gH_0 \quad (13)$$

$\varepsilon_0$  ist hierbei die Porosität zu Beginn der Expansion, d. h. die Porosität des Festbettes.

Molerus, Pahl und Rumpf<sup>5</sup> stellten auch für das Wirbelschicht-Regime im Bereich  $1 < Re_p < 10$  eine Gleichung auf, mit der der Druckverlust der Wirbelschicht aus den strömungsmechanischen und granulometrischen Eigenschaften der Wirbelschicht berechnet werden kann. Diese Gleichung hat die gleiche mathematische Form wie Gl. (7), allerdings mit anderen Koeffizienten:

$$Eu = K \cdot \frac{1}{\delta_{WS}} \underbrace{\frac{21}{Re_p} (1 - \varepsilon) \varepsilon^{-4.65}}_{f(Re_p, \varepsilon)} \quad \text{mit } K = 2 \quad (14)$$

Da diese Gleichung für das Wirbelbett-Regime gilt, tritt hier statt der anfänglichen Schüttungshöhe  $H_0$  die durch die Expansion der Schüttung jeweils erreichte Höhe  $H_W$  bzw. das Längenverhältnis  $\delta_{WS}$  auf:

$$\delta_{WS} = \frac{\bar{d}_p}{H_W}. \quad (15)$$

### **2.3. Abschätzung der Druckverluste der Rohrströmung oberhalb der Schüttungen**

Durch die Durchströmung des leeren Kolonnenabschnittes oberhalb der Schüttung treten zusätzliche Druckverluste  $\Delta p_K$  auf, die die gemessene Druckdifferenz beeinflussen können (vgl. Abb. 7 auf Seite 11):

$$\Delta p_V^* = p_1^* - p_2^* = (p_1 - p_2) - \Delta p_{K,i} \quad (12)$$

Diese Rohrreibungsverluste ergeben sich für den Festbettbereich aus

$$\Delta p_{K,F} = \lambda(Re) \cdot \frac{h_2 - H_0}{D} \cdot \frac{\rho_F \bar{u}^2}{2} \quad (16)$$

bzw. für den Wirbelschichtbereich aus

$$\Delta p_{K,W} = \lambda(Re) \cdot \frac{h_2 - H_W}{D} \cdot \frac{\rho_F \bar{u}^2}{2}. \quad (17)$$

Der Rohrreibungsbeiwert  $\lambda(Re)$  kann dabei aus dem Rohrreibungsdiagramm (Abb. 10 auf S. 17) entnommen oder für laminare Strömungen ( $Re < 2320$ ) nach der einfachen Beziehung (dimensionsloses Hagen-Poiseuillesches Gesetz)

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (18)$$

berechnet werden. Die Rohr-Reynoldszahl hat für die durchströmte leere Kolonne die Form

$$Re = \frac{\rho_F \bar{u} D}{\eta_F} \quad (19)$$

### **2.4. Bestimmung von Dichten und Porositäten**

Für die Bestimmung der Dichten von Flüssigkeiten und Festkörpern und/oder Porositäten von Festkörpern und Schüttungen werden häufig gravimetrisch-volumetrische Methoden angewendet, bei denen Massen definierter Volumina ermittelt werden. Je nach Anwendungsfall werden verschiedene Geräte eingesetzt (z. B. Pyknometer oder für granulare Materialien Schüttdichte-Messgeräte).

#### **2.4.1. Dichte von Flüssigkeiten**

Pyknometer (siehe Abb. 3) dienen der genauen Bestimmung der Dichte von Flüssigkeiten und Festkörpern. Sie bestehen aus einem Hohlglaskörper und einem eingeschliffenen Stopfen mit einer Kapillare. Das Volumen eines Pyknometers  $V_{Pyk}$  nach Aufsetzen des Stopfens ist in der Regel aus Eichmessungen mit Flüssigkeiten bekannter Dichte bei 20°C bekannt und kann dem Kalibrierschein oder der Aufschrift auf dem Pyknometer entnommen werden. Aus der Wägung

des leeren ( $m_0$ ) und des vollständig gefüllten Pyknometers ( $m_1$ ), jeweils mit Stopfen gemessen, wird die Dichte ermittelt:

$$\rho_F = \frac{m_1 - m_0}{V_{Pyk}} \quad (20)$$

Sollte die Messtemperatur erheblich von der Eichtemperatur abweichen, muss die unbekannte Dichte einer Flüssigkeit auf der Grundlage der bekannten Dichte  $\rho_W$  einer Flüssigkeit (z. B. Wasser) bestimmt werden. Dazu wird das Pyknometer leer ( $m_0$ ) und mit Wasser ( $m_1$ ) gewogen und das Pyknometervolumen ermittelt:

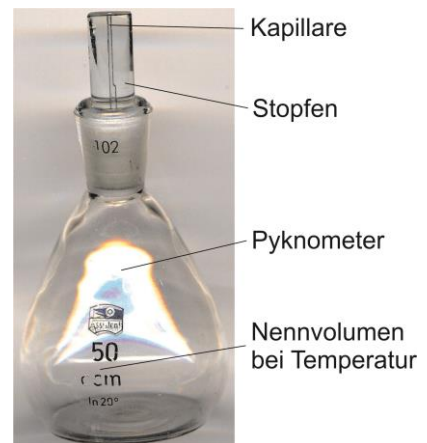


Abb. 3: Pyknometer [1]

$$V_{Pyk} = \frac{m_1 - m_0}{\rho_W} \quad (21)$$

Das Pyknometer wird entleert, getrocknet, mit der unbekanntes Flüssigkeit gefüllt und erneut gewogen ( $m_2$ ). Die Dichte der Flüssigkeit berechnet sich dann mit

$$\rho_F = \frac{m_2 - m_0}{V_{Pyk}} = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \rho_W \quad (22)$$

Es ist, falls notwendig, jeweils auf eine ausreichende Temperierzeit zu achten.

#### 2.4.2. Dichte von Festkörpern

Pyknometer können auch zur Bestimmung der Dichte von Festkörpern angewendet werden. Die Messung der Dichte von Festkörpern beruht auf deren Verdrängungswirkung von Flüssigkeit. Das trockene Pyknometer mit Stopfen wird leer gewogen ( $m_0$ ). Anschließend wird Feststoff (ca. 1/8 bis 1/4 des Pyknometervolumens) in das Pyknometer eingefüllt und dieses mit Stopfen gewogen ( $m_2$ ). Danach wird Wasser aufgefüllt, der Stopfen aufgesetzt, das überfließende Wasser entfernt und erneut gewogen ( $m_3$ ). Nun wird das Pyknometer entleert, mit Wasser gefüllt und gewogen ( $m_1$ )<sup>8</sup>. Die Dichte  $\rho_s$  des Festkörpers wird nun nach der Beziehung

$$\rho_s = \frac{m_2 - m_0}{(m_1 - m_0) - (m_3 - m_2)} \rho_F \quad (23)$$

#### 2.4.3. Schütt- bzw. Rütteldichte und Porosität von Partikelschüttungen

Schüttungen sind in der Regel mehrphasige Stoffsysteme. Sie bestehen aus einer festen granularen Phase (im Versuch: unporöse Glasstrahlperlen in Form von Vollglaskugeln), welche von einer fluiden Phase (Luft, Wasser) umschlossen wird. Liegen ausreichend viele Partikel in geordneter oder ungeordneter Weise in Form einer Schüttung übereinander, bilden sich zwischen den Partikeln Hohlräume (Poren). Die Form und Abmessungen der Poren hängen dabei von der Form der Partikel, deren Größenverteilung, deren Art der räumlichen Anordnung, den Wechselwirkungen zwischen einzelnen Partikeln sowie gegebenenfalls von den Strömungsverhältnissen bei gegeneinander beweglichen Partikeln ab.

<sup>8</sup> Dieser Schritt entspricht dem Vorgehen in Abschnitt 2.4.1. Wird das gleiche Pyknometer wie in Abschnitt 2.4.1 benutzt, kann die entsprechende Masse  $m_1$  benutzt werden.

Der Porenvolumenanteil, der für die Durchströmung der Schüttung relevant ist, kann relativ einfach mit Hilfe elementarer Messmethoden bestimmt werden. Eine Schüttung kann durch eine sogenannte Schüttdichte  $\rho_{Sch}$  charakterisiert werden. Für die Bestimmung der Schüttdichte, bei der in der Regel Luft als das die Partikel umgebende Fluid angenommen wird, werden genormte Schüttdichte-Messgeräte (Abb. 4 auf S. 8) verwendet. Eine definierte Menge des Schüttgutes wird aus einem genormten Trichter in ein zylindrisches Gefäß gefüllt, dessen Volumen und Leermasse bekannt sind. Überschüssige Probe wird abgestrichen und das gefüllte Gefäß wird gewogen, ohne dass die Schüttung weiter verdichtet wird. Anschließend kann die Schüttdichte berechnet werden<sup>9</sup>:



Abb. 4: Schüttdichte-Messgerät [2]

$$\rho_{Sch} = \frac{m_2 - m_0}{V_{Sch}} = \frac{m_{Sch}}{V_{Sch}} = \frac{m_S + m_F}{V_S + V_F} \quad (24)$$

Die Verhältnisse im durchzuführenden Experiment weichen jedoch von den Normbedingungen zur Ermittlung der Schüttdichte ab. Zum einen ist die fluide Phase in den Kolonnen 1 bis 3 Wasser, zum anderen werden die Schüttungen in den Kolonnen vor Beginn des Experimentes durch Klopfen verdichtet. Insbesondere wegen des Verdichtens der Schüttungen ist im Experiment nicht die Schüttdichte, sondern die sogenannte Stampf- oder Rütteldichte  $\rho_{Rü}$  von Bedeutung. Deren experimentelle Bestimmung erfolgt prinzipiell in Analogie zur Schüttdichte, allerdings wird das Schüttgut nach dem Einfüllen in das Gefäß durch definiertes Rütteln oder Stampfen verdichtet, der Porenanteil also verringert und somit die Schüttungsdichte vergrößert<sup>10</sup>. Aus der Masse des (verdichteten) Schüttgutes  $\tilde{m}_{Sch}$  und dem Volumen des zylindrischen Gefäßes  $V_{Sch}$  wird die Dichte der verdichteten Schüttung  $\tilde{\rho}_{Sch}$  bzw. die Rütteldichte  $\rho_{Rü}$  berechnet:

$$\tilde{\rho}_{Sch} = \rho_{Rü} = \frac{\tilde{m}_2 - m_0}{V_{Sch}} = \frac{\tilde{m}_{Sch}}{V_{Sch}} = \frac{\tilde{m}_S + \tilde{m}_F}{\tilde{V}_S + \tilde{V}_F} \quad (25)$$

Drückt man die Massen des Feststoffes  $\tilde{m}_S$  und des Fluids  $\tilde{m}_F$  bei bekannten Dichten  $\rho_S$  und  $\rho_F$  durch die Volumina aus, erhält man<sup>11</sup>

$$\rho_{Rü} = \frac{\rho_S \tilde{V}_S + \rho_F \tilde{V}_F}{\tilde{V}_S + \tilde{V}_F} = \rho_S \frac{\tilde{V}_S}{\tilde{V}_S + \tilde{V}_F} + \rho_F \frac{\tilde{V}_F}{\tilde{V}_S + \tilde{V}_F} \quad (26)$$

Mit der Definition einer Porosität  $\varepsilon$ , also des Porenvolumenanteils,

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{\tilde{V}_F}{\tilde{V}_S + \tilde{V}_F} \quad (27)$$

<sup>9</sup> Indizes: S...Solid (Feststoff), F...Fluid (Flüssigkeit)

<sup>10</sup> Das Verhältnis von Stampfdichte zu Schüttdichte ist der (dimensionslose) HAUSNER-Faktor:  $H_f = \rho_{Rü} / \rho_{Sch} \geq 1$

<sup>11</sup> Die folgenden Gleichungen gelten entsprechend auch für die Schüttdichte.



und durch Substitution des Feststoffvolumens  $\tilde{V}_S = V_{Sch} - \tilde{V}_F = \tilde{V}_S + \tilde{V}_F - \tilde{V}_F$  erhalten wir schließlich eine Gleichung zur Berechnung der Schütt- oder Rütteldichte bei bekannter Porosität oder, wie im Versuch relevant, der Porosität der ruhenden Schüttung bei bekannter Schütt- oder Rütteldichte mit den bekannten Dichten des Festkörpers und des Fluids:

$$\rho_{R\ddot{u}} = (1 - \tilde{\varepsilon})\rho_S + \tilde{\varepsilon}\rho_F \quad (28)$$

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{\rho_S - \rho_{R\ddot{u}}}{\rho_S - \rho_F} = \frac{1 - \frac{\rho_{R\ddot{u}}}{\rho_S}}{1 - \frac{\rho_F}{\rho_S}} \quad (29)$$

Gln. (28) bzw. (29) machen deutlich, dass die Schütt- oder Rütteldichte eines granularen Materials auch von der Dichte des Fluids in den Poren abhängen. Ist dieses Fluid ein Gas (z. B. Luft), so gilt unter der Voraussetzung  $\rho_F \ll \rho_S$

$$\tilde{\varepsilon} = 1 - \frac{\rho_{R\ddot{u}}}{\rho_S} \quad (30)$$

## 2.5. Differenzdruckmessung

Für die Differenzdruckmessung werden U-Rohr-Manometer verwendet, die sich allerdings in der Ausführung für die Versuche mit Wasser (umgekehrtes U-Rohrmanometer) und Luft (normales U-Rohr-Manometer nach Abb. 5) unterscheiden. Das Messprinzip ist jedoch das gleiche. Ein U-förmig gebogenes Rohr ist teilweise mit einer Sperrflüssigkeit der Dichte  $\rho_{sp}$  (z. B. Wasser) gefüllt. Werden an die Schenkel des Manometers verschiedene Drücke  $p_1$  und  $p_2$  eines Fluids mit der Dichte  $\rho_l$  (z. B. Luft) gelegt, wird die Flüssigkeitssäule, die sich für  $p_1 = p_2$  im ausgeglichenen Zustand befindetet, proportional zur Druckdifferenz ausgelenkt. Aus einer Kräftebilanz an der Flüssigkeitsoberfläche des linken Schenkels folgt sofort die Gleichung zur Berechnung der Druckdifferenz aus der Differenz der Spiegelhöhen  $h_1$  und  $h_2$

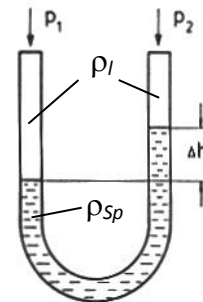


Abb. 5: U-Rohr-Manometer [3]

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (\rho_{sp} - \rho_l)g\Delta h \quad (31)^{12}$$

Die Differenzhöhe kann als Strecke unmittelbar am Manometer abgelesen (Kolonnen 1-3) oder bereits als Druckwert für eine konkrete Sperrflüssigkeit (Kolonne 4) entnommen werden. Im letzteren Fall sind die Teildrücke zu addieren, wenn die Nulllage des Manometers vor dem Versuch entsprechend eingestellt wurde.

## 2.6. Messung des Volumenstromes

Für die Messung des Volumenstroms werden robuste Schwebekörper-Durchflussmesser eingesetzt (Abb. 6). Diese bestehen aus einem konischen, sich nach oben erweiternden Glasrohr, das

<sup>12</sup> Die Querschnittsflächen beider Schenkel sind gleich groß.

entgegen der Schwerkraft durchströmt wird und in welchem sich ein speziell geformter Schwebekörper vertikal frei bewegen kann. In dem Zustand, in dem die Druck- bzw. Widerstandskraft, die Gewichtskraft und die Auftriebskraft des Schwebekörpers im Gleichgewicht stehen, erreicht der Schwebekörper eine feste, dem Volumenstrom proportionale Position  $h$ :

$$\Delta p \cdot \frac{\pi d^2}{4} = (\rho_K - \rho_F) V_K g \quad (32)$$

Hierbei sind  $d$ ,  $\rho_K$  und  $V_K$  der größte Durchmesser, die Dichte und das Volumen des Schwebekörpers,  $\Delta p$  ist der Staudruck bei Umströmung des Schwebekörpers. Die durchströmte Ringspaltfläche ist

$$A = \frac{\pi}{4} (D^2(h) - d^2) \quad (33)$$

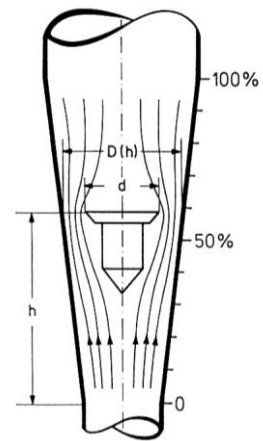


Abb. 6: Schwebekörper-Durchflussmesser [3]

Mit Hilfe der Bernoulli-Gleichung lässt sich dann eine Beziehung zwischen dem Volumenstrom  $\dot{V}$  und  $D(h)$  bzw.  $h$  (bei bekannter Funktion  $D(h)$ ) herstellen ( $k$ ...Kalibrierkonstante,  $K$ ...Gerätekonstante):

$$\dot{V} = k (D^2(h) - d^2) \sqrt{\frac{\pi (\rho_K - \rho_F) V_K g}{2 d^2 \rho_F}} = K (D^2(h) - d^2) \quad (34)$$

### 3. Versuchsstände

Die Versuchsstände bestehen im Wesentlichen aus

- den Kolonnen mit durch Siebe abgeschlossenen Räumen, die partiell mit dem Haufwerk gefüllt sind,
- Durchflussmessern zur Bestimmung des Volumenstromes des durch die Schüttung strömenden Fluids sowie
- einer Differenzdruckmesseinrichtung, mit der der Druckabfall beim Durchströmen der Schüttung gemessen wird.

Die Stoffwerte der verwendeten Fluide sind in Tabelle 1 auf S. 18 zusammengefasst bzw. werden im Versuch ermittelt. Die Schüttungen unterscheiden sich durch die Schütthöhe, die mittleren Durchmesser und die Größenverteilung der verwendeten Partikel (Vollglaskugeln, vgl. Tabelle 2 auf S. 18).

#### 3.1. Versuchsstand Wasser (Abb. 8)

Aus einem Vorratsbehälter (1) wird Wasser mit einer einstufigen Kreiselpumpe (2) gefördert. Die Wasserzufuhr zur Anlage lässt sich mit dem Vorlaufventil (3) unterbrechen. Der geförderte Volumenstrom wird mit Schwebekörper-Durchflussmessern verschiedener Messbereiche (5) gemessen, die jeweils durch Absperrhähne (4) zu- oder abgeschaltet werden können. Über Absperrhähne (6) lassen sich die verschiedenen Kolonnen (7/1 bis 7/3), die sich durch die Füllhöhe und die granulometrischen Eigenschaften der Partikel unterscheiden, in den Wasserkreislauf bringen.

An den unteren und oberen Enden der Kolonnen befinden sich Druckmessstellen. Der Differenzdruck zwischen beiden Messstellen wird mit einem Differenzdruckmesser (9, umgekehrtes U-Rohr-Manometer) gemessen. Die Zuleitungen zu den Differenzdruckmessern müssen vor Beginn der Messungen mit den Entlüftungsventilen (8) und (10) sorgfältig entlüftet werden. Dazu kann der Rücklauf des Kreislaufes mit dem Rücklaufventil (11) geschlossen werden, so dass bei geöffneten Entlüftungsventilen (8) und (10) der gesamte Volumenstrom über die Druckmessleitungen fließt. Über die Rücklaufleitung wird der Wasserkreislauf geschlossen. Die Anlage kann durch Ziehen des Netzsteckers der Pumpe außer Betrieb gesetzt werden.

### 3.2. Versuchsstand Luft (Abb. 9)

Der Aufbau entspricht im Wesentlichen dem der Versuchsanlage für Wasser. Aus dem zentralen Druckluftnetz der Labors wird über ein Absperrventil (1) die Druckluft entnommen. Mit dem Reduzier- und Regelventil (2) kann der Volumenstrom der Luft durch Änderung des Eingangsdruckes der Anlage eingestellt werden. Mit den Absperrventilen (3) kann der Volumenstrom der Luft mit zwei Schwebekörper-Durchflussmessern (4) gemessen werden. Die Angaben auf den Skalen entsprechen dabei dem Luft-Volumenstrom unter Normbedingungen ( $p_u = 1013 \text{ hPa}$ ,  $T_u = 20^\circ\text{C}$ ). Für das Experiment mit Luft steht nur eine Kolonne (7/4) zur Verfügung, deren Schüttung die gleichen Parameter hat wie die der Kolonne (7/3) des Versuchsaufbaus Wasser. Die Messung des Differenzdruckes erfolgt mit U-Rohrmanometern (6), die mit destilliertem Wasser gefüllt sind und aufgrund der unterschiedlichen Schenkellängen für verschiedene Druckbereiche angewendet werden. Über einen Dreiwegehahn (5) können die Manometer abgeschaltet, auf null gesetzt oder zur Messung mit den Druckmessstellen verbunden werden. Über einen Ausströmer (8) strömt die entweichende Luft ins Freie.

### 3.3. Geometrische Kenngrößen der Kolonnen und Stoffwerte

Die Kolonnen der Versuchsanlage unterscheiden sich durch ihre geometrischen Abmessungen (Abb. 7) und durch die Daten der Schüttungen. Die Stoffwerte der benutzten Fluide (Tabelle 1, S. 18) und die geometrischen Daten der Kolonnen und die granulometrischen Daten der verwendeten Schüttungen (Tabelle 2, S. 18) finden Sie im Anhang. Es bedeuten

- $D$ ..... Innendurchmesser der Kolonnen
- $h_1$ ..... Abstand unteres Sieb - untere Druckmessbohrung
- $h_2$ ..... Abstand unteres Sieb - obere Druckmessbohrung
- $H_S$  ..... Abstand der Siebe
- $H_0$  ..... Höhe der Schüttung im Ruhezustand (Festbett nach leichtem Klopfen an die Kolonnenwand zur Verdichtung der Schüttung)
- $H_W$  ..... Höhe der expandierten Schüttung

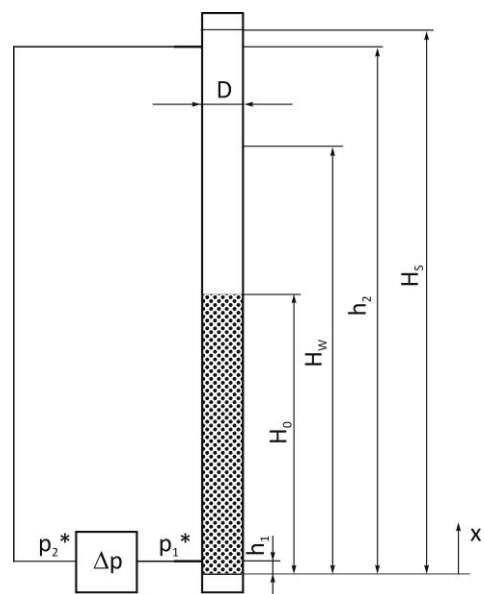


Abb. 7: Geometrische Kenngrößen der Kolonnen

Es ist zu beachten, dass sich die unteren Druckmessbohrungen konstruktiv bedingt nicht am unteren Rand der Schüttung, sondern an der Position  $x=h_1$  befinden. Aus diesem Grund kann auch nur der Druckverlust über einer Schüttungshöhe  $H_w - h_1$ , und nicht über  $H_w$  gemessen werden. Um den Gesamtdruckverlust über  $H_w$  zu ermitteln, ist eine Extrapolation notwendig, wobei von einem linearen Zusammenhang  $\Delta p_v = f(x)$  mit  $x$  als Koordinate in axialer Richtung ausgegangen werden kann und somit für den Festbett- bzw. Wirbelschichtbereich gilt:

$$\Delta p_v = \Delta p_v^* \frac{H_0}{H_0 - h_1} \quad \text{bzw.} \quad \Delta p_v = \Delta p_v^* \frac{H_w}{H_w - h_1} \quad (35)$$

#### **4. Versuchsdurchführung**

Nutzen Sie die Mustertabellen im Anhang.

##### **4.1. Dichte von Wasser**

① *Benutzen Sie für die Arbeit mit dem Pyknometer unbedingt Schutzhandschuhe!*

Bestimmen Sie die Dichte von entgastem Wasser bei der herrschenden Raumtemperatur mit einem kalibrierten Pyknometer. Wiegen Sie dazu ein sauberes leeres Pyknometer einschließlich des Stopfens (Masse  $m_0$ ). Füllen Sie Wasser ein und setzen Sie vorsichtig den Stopfen auf. Entfernen Sie überschüssiges Wasser und wiegen Sie das gefüllte Pyknometer (Masse  $m_1$ ).

##### **4.2. Schüttungsparameter**

###### **4.2.1. Porosität der Schüttung in Luft**

Bestimmen Sie die Anfangsporositäten der Schüttungen in der Luftkolonne über die Ermittlung der Schütt- bzw. Rütteldichten in Luft. Nutzen Sie hierfür den Messzylinder A (50 ml). Wiegen Sie den leeren Messzylinder (Masse  $m_0$ ). Füllen Sie ein bestimmtes Volumen  $V_0$  der Kugelschüttung ein, verdichten Sie die Schüttung durch leichtes Klopfen an die Wand des Messzylinders, lesen Sie das Volumen erneut ab ( $V_{sch}$ ) und wiegen Sie erneut ( $\tilde{m}_2$ ). Aus der Massendifferenz  $\tilde{m}_2 - m_0$  und dem Volumen  $V_{sch}$  können die Rütteldichte in Luft nach Gl. (25) und anschließend die Anfangsporosität der partiell verdichteten Schüttung nach Gl. (30) berechnet werden.

###### **4.2.2. Porosität der Schüttung in Wasser**

Wiegen Sie den leeren Messzylinder B (Masse  $m_0$ ). Füllen Sie maximal 18 ml entgastes Wasser ein und wiegen Sie erneut ( $m_2$ ). Füllen Sie schrittweise und mit Vorsicht die Schüttung aus Messzylinder A in den Messzylinder B genau bis zur Oberkante des Wassers ein (eventuell muss noch etwas Schüttung aus dem Vorratsgefäß hinzugefügt werden). Verdichten Sie die eingefüllte Schüttung nach jedem Zugabeschritt durch leichtes Klopfen des Messzylinders und vermeiden Sie eine Überfüllung oberhalb des Wasserspiegels. Lesen Sie das Volumen ( $V_{sch}$ ) ab und wiegen Sie den mit Wasser und Schüttung gefüllten Messzylinder ( $\tilde{m}_2$ ). Aus der Massendifferenz  $\tilde{m}_2 - m_0$  und dem erneut abgelesenen Volumen können die Rütteldichte in Wasser nach Gl. (25) und daraus anschließend mit Gl. (29) bei bekannter Feststoffdichte  $\rho_s$  und mit der in Abschnitt 4.1 ermittelten Wasserdichte  $\rho_f$  die Anfangsporosität berechnet werden. *Hinweis: Es wird angenommen, dass die Anfangsporositäten der Schüttungen in den Kolonnen 7/1 bis 7/3 identisch sind.*

### **4.3. Wasserdurchströmte Schüttungen**

1. Machen Sie sich mit dem Aufbau des Versuchstandes anhand von Abb. 8 vertraut. Identifizieren Sie insbesondere die Bedienelemente (3), (4), (6), (8) und (11). Lesen Sie die Schüttungshöhen in den einzelnen Kolonnen ab.
2. Vergewissern Sie sich, dass Vorlauf- und Rücklaufventil (3) und (11) geschlossen sind. Schalten Sie die Pumpe (2) ein. Entlüften Sie die Druckmessleitungen. Öffnen Sie dazu das Vorlaufventil (3) mit  $\frac{1}{2}$  Umdrehung sowie das Ventil (4) unterhalb des zweitgrößten Schwebekörper-Durchflussmessers. Öffnen Sie anschließend die Entlüftungsventile (10) am Differenzdruckmesser und dann nacheinander die entsprechenden Entlüftungshähne (8). Anschließend ist das Ventil (6) unterhalb der jeweiligen Kolonne zu öffnen. Sobald sich in den Druckmessleitungen keine Luft mehr befindet, werden die geöffneten Ventile (3), (4) und (6) und anschließend (!) die Entlüftungsventile (10) geschlossen. *In den Druckmessleitungen darf sich keine Luft mehr befinden!*
3. Öffnen Sie das Rücklaufventil (11). Die Anlage ist nun betriebsbereit und es können nacheinander die drei Kolonnen untersucht werden.
4. Öffnen Sie die Entlüftungshähne (8) der zu untersuchenden Kolonne. Regulieren Sie mit den Absperrventilen (4), beginnend mit dem kleinsten Schwebekörper-Durchflussmesser, den Volumenstrom. Nehmen Sie den Volumenstrom, die zugehörige Druckdifferenz  $p_1^* - p_2^*$  sowie die Höhe der Schüttung  $H_w$  auf. Erhöhen Sie schrittweise den Volumenstrom entsprechend den vorgegebenen Richtwerten, bis sich an der Oberseite der Kolonne eine Filterschicht bildet. *Hinweis: Bei einem Wechsel zum nächst größeren Schwebekörper-Durchflussmesser ist zunächst das Absperrventil für den größeren Durchflussmesser zu öffnen und erst danach das Absperrventil des kleineren Durchflussmessers zu schließen, um Druckstöße zu vermeiden.*
5. Wiederholen Sie Punkt 4. für jede Kolonne.
6. Schließen Sie am Ende des Versuches alle Ventile und Hähne und schalten Sie die Pumpe aus.

### **4.4. Luftdurchströmte Schüttung**

1. Machen Sie sich mit dem Aufbau des Versuchstandes anhand von Abb. 9 vertraut. Lesen Sie die Schüttungshöhe ab.
2. Setzen Sie das rechte U-Rohr-Manometer mit dem 3-Wege-Hahn auf null (die Flüssigkeitssäulen in beiden Schenkeln müssen die gleiche Höhe haben) und stellen Sie den Hahn anschließend in Messstellung.
3. Öffnen Sie das Ventil (1) und das Ventil (3) unter dem kleineren Schwebekörper-Durchflussmesser.
4. Regulieren Sie mit dem Regelventil (2) den Volumenstrom der Luft entsprechend den vorgegebenen Richtwerten. Nehmen Sie den Volumenstrom, die Differenzhöhe am U-Rohr-Manometer und die Höhe der Schüttung  $H_w$  auf.
5. Wiederholen Sie Punkt 4, bis sich an der Oberseite der Kolonne (7/4) ein Festbett gebildet hat.

## **5. Versuchsauswertung**

### **5.1. Dichte von Wasser und Schüttungsparameter**

1. Berechnen Sie die Dichte von entgastem Wasser bei der herrschenden Raumtemperatur aus den Messungen mit dem kalibrierten Pyknometer in Abschnitt 4.1.
2. Ermitteln Sie die Schütt- bzw. Rütteldichte der Partikelschüttung in Luft (siehe Abschnitte 2.4.3. und 4.2.1).
3. Ermitteln Sie die Schütt- bzw. Rütteldichte der Partikelschüttung in Wasser (siehe Abschnitte 2.4.3. und 4.2.2).
4. Berechnen Sie aus den Schütt- bzw. Rütteldichten der Schüttungen in Luft und Wasser die entsprechenden Anfangsporositäten  $\varepsilon_0$  der Schüttungen.

### **5.2. Kolonnen: Druckverluste und Porositäten**

1. Schätzen Sie die Rohrreibungsverluste des reinen Fluids (Wasser, Luft) in den Kolonnen für die Länge  $h_2 - H_0$  ab. Vergleichen Sie diesen Wert mit dem Gesamtdruckverlust zu Beginn der Messungen, wo noch keine Auflockerung der Schüttung zu verzeichnen war. Treffen Sie eine Aussage zur Relevanz.
2. Bestimmen Sie das Feststoffpartikelvolumen für die einzelnen Kolonnen.
3. Bestimmen Sie für alle Messreihen die Druckverluste  $\Delta p_v$  über der Schütthöhe  $H_w$  aus den gemessenen Druckdifferenzen  $p_1^* - p_2^*$  bzw. aus den Höhendifferenzen  $\Delta h$  am U-Rohrmanometer. Nehmen Sie dabei einen linearen Zusammenhang zwischen Druckverlust und Schütthöhe an.
4. Stellen Sie die experimentell ermittelten Funktionen  $\Delta p_v = f(\bar{u})$  für alle Kolonnen (Kolonnen 1 bis 3 in einem Diagramm) grafisch dar. Interpretieren Sie die Kurven unter Berücksichtigung der geometrischen und granulometrischen Verhältnisse in den Kolonnen.
5. Berechnen Sie die Porosität  $\varepsilon$  aus den gemessenen Expansionen  $H_w = H_0 + \Delta H_w$ . Stellen die Funktion  $\varepsilon = f(\bar{u})$  für alle Kolonnen (Kolonnen 1 bis 3 in einem Diagramm) grafisch dar. Interpretieren Sie die Kurven unter Berücksichtigung der geometrischen und granulometrischen Verhältnisse in den Kolonnen.
6. Ermitteln Sie die Partikel-REYNOLDS-Zahlen  $Re_p$  für alle Schüttungen zu Beginn der Wirbelschichtbildung.
7. Ermitteln Sie die Filterkonstanten  $B$  nach DARCY für die Festbettschüttung in den Kolonnen 7/1 bis 7/3.
8. Vergleichen Sie die experimentell ermittelten Druckverluste an der Kolonne 7/4 für das Festbett und die Wirbelschicht mit den Berechnungen nach den theoretischen Beziehungen von MOLERUS, PAHL und RUMPF (Gln. (7) und (14)) in tabellarischer und grafischer Form.

9. Bestimmen Sie die theoretische Abhängigkeit  $\varepsilon = f(\varepsilon_0, H_w/H_0)$  für die Wirbelschicht und zeigen Sie anhand der Beziehung  $\Delta p_v = (1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho_f)gH_w$ , dass der Druckverlust in der Wirbelschicht theoretisch konstant bleiben muss. Vergleichen Sie die theoretischen Aussagen nach Gl. (13) mit den experimentellen Befunden.

## **6. Literaturempfehlungen und verwendete Literatur**

Albring, W. *Angewandte Strömungslehre*, Akademie-Verlag Berlin 1998

Naue, G. u. a. *Technische Strömungsmechanik I* (Lehrwerk Verfahrenstechnik), Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1979

Vauck, W. R. A.; Müller, H. A. *Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik*, Verlag Theodor Steinkopff, Dresden 1974

### Quellen der Abbildungen

- [1] <http://de.wikipedia.org/wiki/Pyknometer>, 4.4.2012, Beschreibungen wurden ergänzt.
- [2] <http://www.hll.de/productimages50100/223/son026632.jpg>, 5.4.2012 (mit freundlicher Genehmigung der Landgraf Laborsysteme HLL GmbH)
- [3] Eckelmann, H. *Einführung in die Strömungsmesstechnik* Teubner, Stuttgart 1997
- [4] Naue, G. u. a. *Technische Strömungsmechanik II* (Lehrwerk Verfahrenstechnik), S. 133, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1978

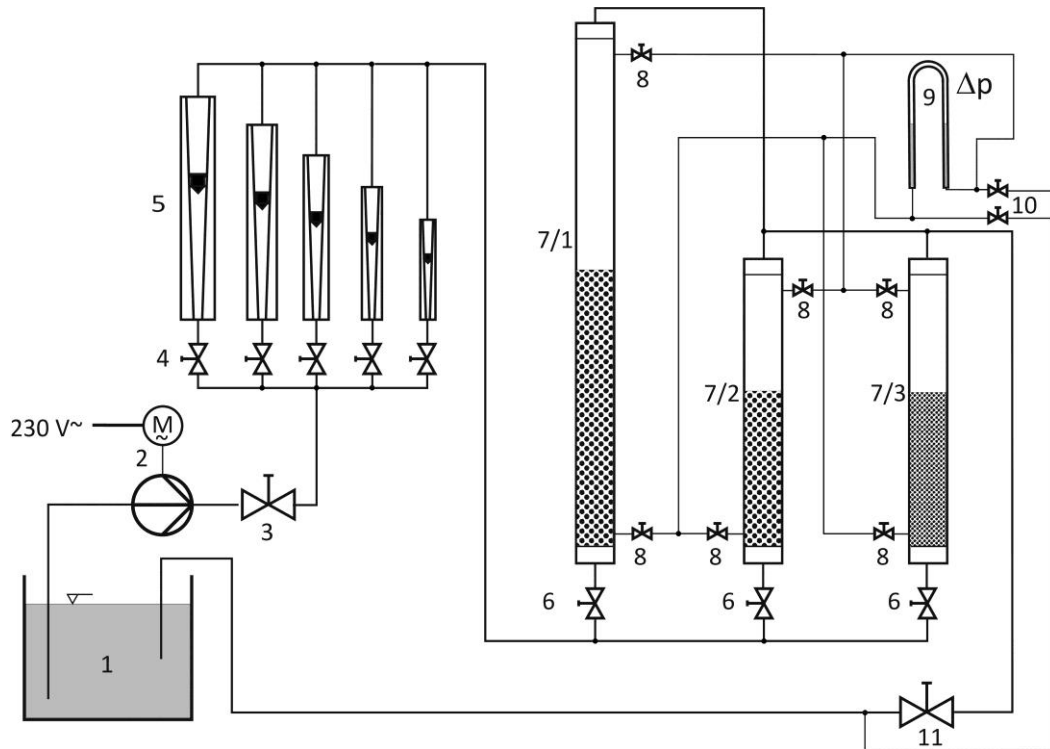


Abb. 8: Schematischer Aufbau des Versuchsstandes "Wasserdurchströmte Schüttung"

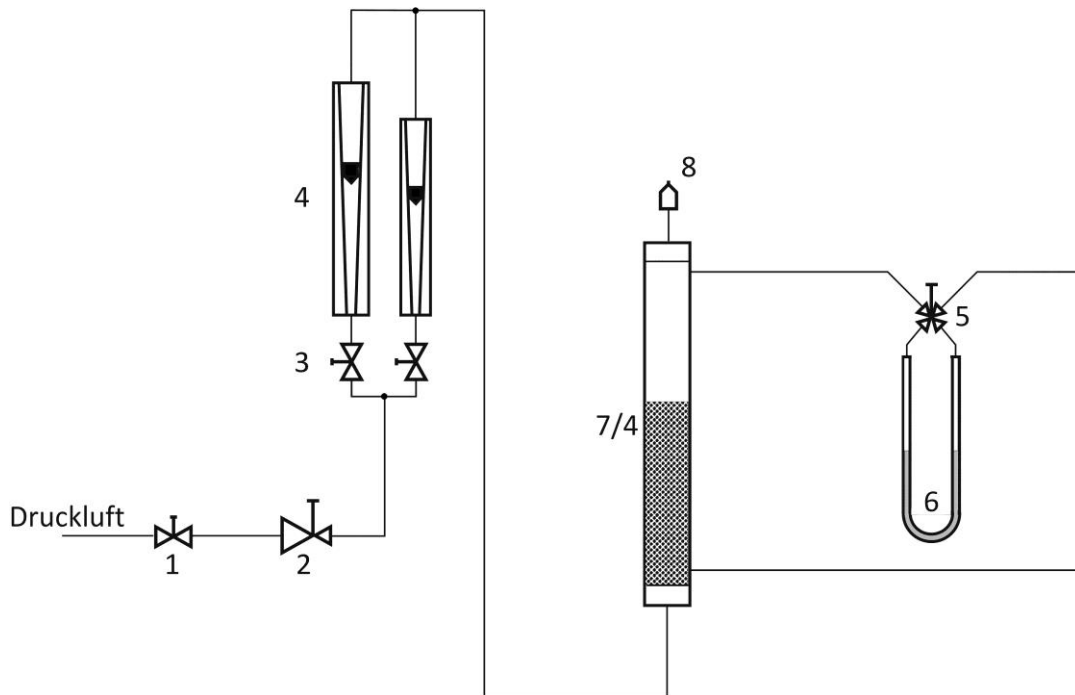


Abb. 9: Schematischer Aufbau des Versuchsstandes "Luftdurchströmte Schüttung"



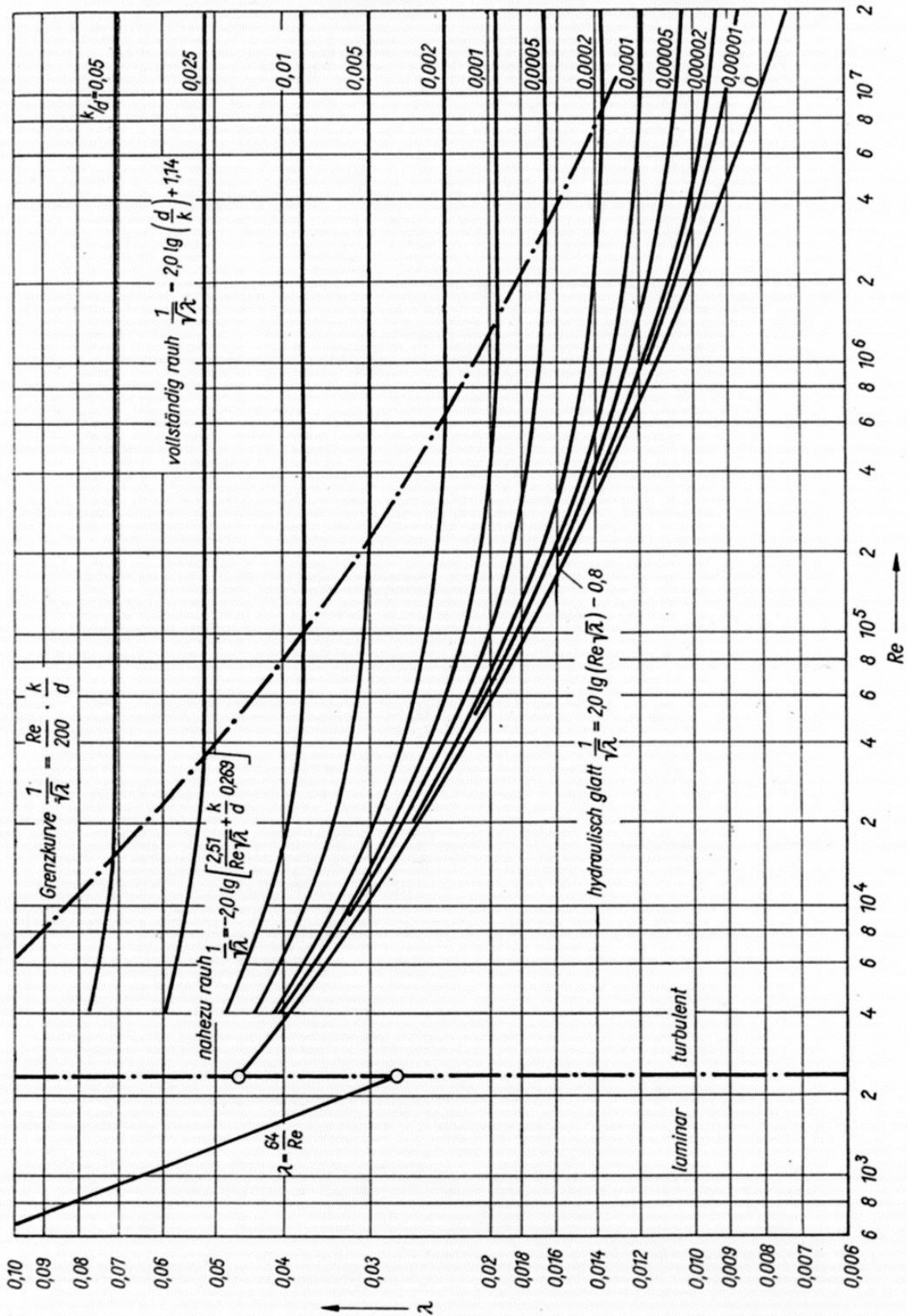


Abb. 10: Rohrreibungsdiagramm  $\lambda = f(Re, k/d)$  [4]

Tabelle 1: Stoffwerte der Fluide

Fluid	dynamische Viskosität	Dichte
Wasser	$\eta_{F,20^\circ\text{C}} = 1.002 \cdot 10^{-3} \text{ Pas}$	<i>mittels Pyknometer zu bestimmen</i>
Luft	$\eta_{F,20^\circ\text{C}} = 1.818 \cdot 10^{-5} \text{ Pas}$	$\rho_{F,20^\circ\text{C}} = 1.17 \text{ kg/m}^3$ (mittlere lokale Luftdichte in Bayreuth)

Diese Werte können auch bei der am Versuchstag herrschenden Raumtemperatur verwendet werden.

Tabelle 2: Geometrische und granulometrische Kenngrößen der Kolonnen

Kolonne		7/1	7/2	7/3	7/4
Geometrie	D (mm)	60	60	60	60
	$h_1$ (mm)	37.5	37.5	37.5	37.5
	$H_0$	<i>vor Versuchsbeginn abzulesen</i>			
	$h_2$ (mm)	1165	365	365	365
	$H_s$ (mm)	1200	400	400	400
Schüttung	mittlerer Partikeldurchmesser $\bar{d}_p$ ( $\mu\text{m}$ )	606.6	606.6	294.7	294.7
	$\rho_s$ ( $\text{kg/m}^3$ )	2470	2470	2470	2470
	Anfangsporosität $\varepsilon_0$	<i>aus den Messungen mit Messzylindern, Pyknometern und Waage zu berechnen</i>			

Tabelle 3: Mustertabelle für Messwerte zur Bestimmung der Fluid- und Schüttungsparameter

<b><u>1. Dichte von Wasser</u></b>		
Nennvolumen des Pyknometers bei 20°C		cm <sup>3</sup>
Masse $m_0$ des leeren Pyknometers		g
Masse $m_1$ des gefüllten Pyknometers		g
<b><u>2. Anfangsporosität in Luft</u></b>		
Masse $m_0$ des leeren Messzylinders A		g
Masse $\tilde{m}_2$ des mit verdichteten Partikeln gefüllten Messzylinders A		g
Volumen $V_{Sch}$ der verdichteten Schüttung		ml
<b><u>2. Anfangsporosität in Wasser</u></b>		
Masse $m_0$ des leeren Messzylinders B		g
Volumen des eingefüllten Wassers		ml
Masse $m_1$ des mit Wasser gefüllten Messzylinders B		g
Masse $\tilde{m}_2$ des mit verdichteten Partikeln und Wasser gefüllten Messzylinders B		g
Volumen $V_{Sch}$ der verdichteten Schüttung in Wasser		ml

Tabelle 4: Mustertabelle für die Untersuchung der wasserdurchströmten Schüttung

Richtvolumen- strom	Kolonne 7/___ $H_0 = \text{_____} \text{ mm}$		
$\dot{V} [l/h]$	$\dot{V} [l/h]$	$\Delta h [mm]$	$H_w [mm]$
2.0			
4.0			
6.0			
8.0			
10.0			
12.5			
15.0			
17.5			
20.0			
22.5			
25.0			
27.5			
30.0			
40.0			
50.0			
60.0			
70.0			
80.0			
100.0			
120.0			
140.0			
160.0			
180.0			
200.0			
220.0			

Tabelle 5: Mustertabelle für die Untersuchung der luftdurchströmten Schüttung in Kolonne 7/4

Richtvolumenstrom	Messwerte ( $H_0 = \text{_____} \text{ mm}$ )		
$\dot{V}$ [ $\text{m}^3 / \text{h}$ ]	$\dot{V}$ [ $\text{m}^3 / \text{h}$ ]	$p_1^* - p_2^*$ [ $\text{mbar}$ ]	$H_w$ [ $\text{mm}$ ]
0.10			
0.15			
0.20			
0.30			
0.40			
0.50			
0.60			
0.80			
1.0			
1.2			
1.4			
1.6			
1.8			
2.0			