

RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM
Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik
Prof. Dr.-Ing. M. Grünewald

Hydrodynamische Untersuchungen in einer Packungskolonne

Fachlabor UTRM
SS 2017

Felix van Holt, M. Sc.

Mark Hapke, M. Sc.

Raum: IC 3/111

Tel.: 0234/32 - 26398

Fachlaborraum: IBN 02/40

Halle 8

Formelzeichen

A	$[m^2]$	Querschnittsfläche
a	$\left[\frac{m^3}{m^2}\right]$	Spezifische Austauschfläche
d	$[m]$	Durchmesser
H	$[m]$	Höhe
K	$[-]$	Wandfaktor
h	$[-]$	spezifischer Hold-Up
P	$[bar]$	Druck
T	$[^\circ C]$	Temperatur
u	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Geschwindigkeit
u^*	$\left[\frac{m^3}{m^2 h}\right]$	spez. Flüssigkeitsbelastung
V	$[m^3]$	Volumen
\dot{V}	$\left[\frac{m^3}{h}\right]$	Volumenstrom
ΔP	$[mmWS]$	Druckverlust
ν	$\left[\frac{m^2}{s}\right]$	Kinematische Viskosität

tiefgestellt

G	Gas (Betriebszustand)
GA	Gasaustritt
GE	Gaseintritt
L	Flüssigkeit
m	mittlere
N	Normzustand
O	Kolonnenkopf
S	Leersäule
U	Kolonnensumpf
u	Umgebung

1. Einleitung und Zielsetzung

Das Hauptanwendungsgebiet der Absorption ist die Reinigung von Gasen und die Trennung von Gasgemischen. Dabei wird die zu lösende Gaskomponente (Absorbend) in einer Waschflüssigkeit (Absorbens) gebunden. Die beladene Waschflüssigkeit wird thermisch regeneriert und so für die Absorption wieder verwendbar gemacht. Die Regeneration ist ein der Absorption entgegengesetzter Vorgang und wird als Desorption bezeichnet.

Absorption wird auf Grund der verschiedenen Bindungskräfte in die physikalische Absorption (Physisorption) und die chemische (Chemisorption) unterteilt. Der Einfluss der Reaktion besteht prinzipiell in einer Erhöhung der Absorptionsgeschwindigkeit, indem die Konzentration an der übergehenden Gaskomponente der Flüssigphase herabgesetzt wird und die treibende Konzentrationsdifferenz steigt.

Hierbei werden u.a. folgende Anforderungen an die Waschflüssigkeit gestellt:

- möglichst hohes und selektives Lösungsvermögen für eine bestimmte Gaskomponente (Kapazität und Selektivität)
- geringer Dampfdruck
- niedrige Viskosität
- keine korrosive Wirkung auf die Anlagenteile
- keine Toxizität

Die Selektivität ist ein entscheidendes Kriterium für die Wahl der Waschflüssigkeit. Je mehr Komponenten von dieser gelöst werden können desto höher ist der Trennaufwand bei der Desorption. Da die Desorption bevorzugt bei hohen Temperaturen und niedrigen Drücken stattfindet, muss der Dampfdruck der Waschflüssigkeit möglichst gering sein, um das Verdampfen und somit den Verlust des Absorbens zu verhindern. Eine gute Rieselfähigkeit der Waschflüssigkeit wird durch eine niedrige Viskosität gewährleistet. Die letzten beiden Punkte sind erforderlich für eine hohe Lebensdauer der Anlage und die Gefahrminderung bei Leckagen und Betriebsunfällen.

Für einen intensiven Stoffaustausch zwischen Gasphase und Waschflüssigkeit, der für eine hohe Reinheit des zu reinigenden Gases benötigt wird, werden in der Praxis Kolonnen eingesetzt, die eine große Berührungsfläche für die beiden Phasen bereitstellen, also eine hohe Phasengrenzfläche. Zur Vergrößerung der Kontaktfläche dienen Kolonneneinbauten wie Füllkörper oder Packungen, als sogenannte trennwirksame Einbauten. Während Füllkörper künstlich erzeugte Körper regelmäßiger Form sind, die sich in regelloser oder geregelter Schüttung in der Kolonne befinden, bestehen Packungen meist aus strukturierten Einzelblechen, die zu einem Verbund aneinandergereiht werden. „Gepackt“ zu einzelnen Elementen lassen sich Kolonnen damit füllen.

Die wichtigsten Forderungen an solche Einbauten sind:

- großes Verhältnis von Oberfläche zu Volumen
- gute Benetzbarkeit
- geringer Reibungswiderstand für die Flüssigkeit
- ausreichende Festigkeit gegen Bruch bei geringem Materialaufwand
- einfache und kostengünstige Herstellung

Die ersten drei dieser Forderungen sind wesentlich, da die Oberfläche der Einbauten Rieselfläche für die Flüssigkeit ist. Eine große Rieselfläche in der Kolonne führt zu einer großen Phasengrenzfläche zwischen den beiden Fluiden. Bei schlechter Benetzung verringert sich die Phasengrenzfläche, worunter der Stoffaustausch zwischen der flüssigen und der gasförmigen Phase leidet. Ein hoher Reibungswiderstand verursacht einen hohen Druckverlust des Gases über die Kolonnenhöhe. Durch die ständige Weiterentwicklung der Füllkörper und Packungen entwickelten sich Einbauten verschiedenster Geometrie (siehe Abbildung 1 und 2).

Ausreichende mechanische Festigkeit ist von Bedeutung, weil der Bruch von Einbauten während des Betriebs das strömungstechnische Verhalten der Fluide in der Kolonne wesentlich beeinflusst.

Trennwirksame Einbauten werden für einen optimalen Einsatz in großen Mengen und in den verschiedensten Formen, Größen und Werkstoffen benötigt. Hier sind eine einfache Herstellung und ein niedriger Preis aus wirtschaftlichen Gründen unerlässlich.

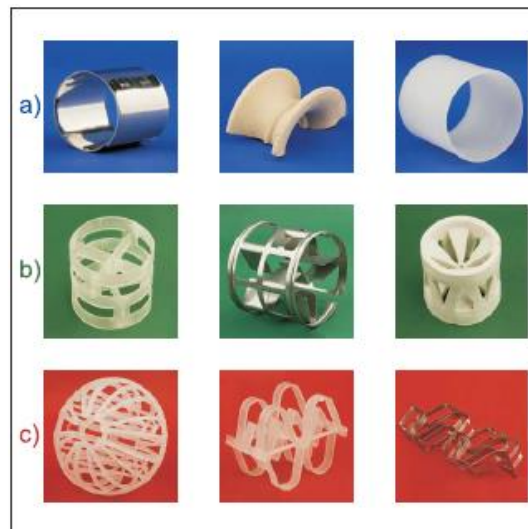


Abbildung 1: Entwicklungsschritte von Füllkörpern a) der 1. Generation, b) der zweiten Generation und c) der dritten Generation

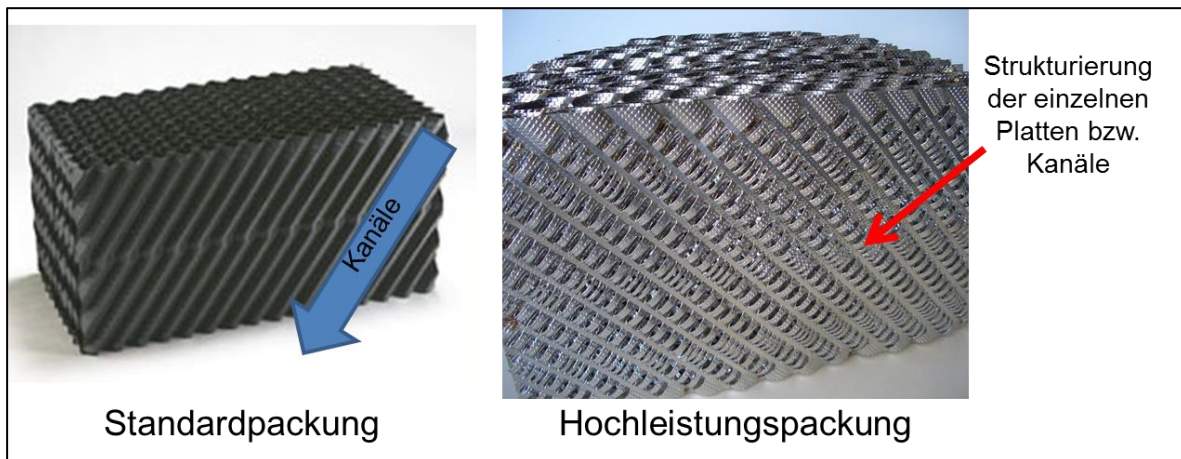


Abbildung 2: Strukturen verschiedener Standard- und Hochleistungspackungen (Fa. Raschig)

Wie in Abbildung 1 und 2 zu erkennen ist, werden Füllkörper und Packungselemente in einer Vielzahl von Größen, Geometrien und Materialien hergestellt. Besonders Füllkörper können bereits auf eine lange Entwicklungsphase zurückblicken, mit der Folge, dass eine Vielzahl an Einbautypen zur Verfügung stehen abhängig vom jeweiligen Einsatzfall. Weitere wichtiger Parameter, den sowohl Füllkörper als auch Packungen besitzen, ist die spezifische Oberfläche [m^2/m^3] der Einbauten, die je nach Anwendungsfall variiert werden kann.

Füllkörper- und Packungskolonnen werden nicht nur im Labormaßstab sondern auch in großtechnischen Prozessen, z.B. zur Rauchgasentstickung und -schwefelung, CO_2 Abscheidung, als Biowäscher oder Mehrphasenreaktoren eingesetzt und müssen mit großen Gas- und Flüssigkeitsdurchsätzen betrieben werden können.

Beim Betrieb solcher mehrphasigen Apparate nimmt überwiegend die Fluidodynamik ein hohes Interesse ein. Für den funktionalen Betrieb eines solchen

verfahrenstechnischen Apparates ist vor allem die gleichmäßige Verteilung der Phasen, die sog. Distribution, notwendig. Fehlverteilungen, die sog. Maldistribution, der flüssigen oder gasförmigen Phase innerhalb der Kolonne führen zu Verlusten hinsichtlich der Stofftrennleistung aufgrund der reduzierten Phasengrenzfläche. Neben dem Einbau der trennwirksamen Einbauten wird durch den Gebrauch von nicht trennwirksamen Einbauten versucht positiv auf die Distribution der Phasen Einfluss zu nehmen.

Zur Charakterisierung des fluiddynamischen Verhaltens einer Packungs- bzw. Füllkörperkolonne sind zwei entscheidende Parameter zu nennen. Der Druckverlust ΔP des strömenden Gases nimmt mit steigendem Gasvolumenstrom über die Höhe H der Kolonne zu, da das strömende Gas die Gravitationskraft und den Reibungswiderstand, der zum Einen an der Oberfläche der Einbauten und zum Anderen durch den Kontakt der Fluide an der Phasengrenzfläche entsteht, überwinden muss.

Als Maß für die Höhe des Gasdruckverlustes bei gleichzeitiger Flüssigkeitsströmung erweist sich der Flüssigkeitsinhalt h_L (Hold-Up) als eine kennzeichnende Größe. Dieser Parameter repräsentiert hierbei die Flüssigkeitsmenge innerhalb der Kolonne, die durch die Interaktion der Phasenströme und Kolonneneinbauten miteinander in der Kolonne gehalten wird. Er hat außerdem Einfluss auf den Stoff- und Wärmeaustausch in der Füllkörperkolonne.

Zielsetzung

Das Ziel des Laborversuches ist die experimentelle Untersuchung der hydrodynamischen Eigenschaften einer Packungskolonne am Testsystem Wasser/Luft. Als Einbauten dient hierbei die Packung Raschig© Super-Pak 150. Im Rahmen der hydrodynamischen Untersuchung soll die Abhängigkeit des Druckverlustes und des Flüssigkeitsinhaltes (s. 2.2) von der Gasgeschwindigkeit u_G mit der Berieselungsdichte u_L^* als Parameter ermittelt werden. Dabei werden Temperatur und Druck am Kolonnenein- und -austritt bestimmt, sowie die Flüssigkeitsmenge in der Kolonne. Aus den aufgezeichneten Daten lassen sich die Stau- und Flutgrenze der Kolonne ermitteln. Zusätzlich soll eine Auswertung der experimentellen Ergebnisse durch die spezifischen C-Konstanten nach dem Modell von Billet erfolgen. Durch die Anwendung der Korrelation soll die Anwendbarkeit des Modells für den gegebenen Fall aufgezeigt und diskutiert werden.

2. Grundlagen

2.1 Druckverlust

Die Beschreibung der Strömungsdruckverluste in einer von Gas und Flüssigkeit im Gegenstrom durchströmten Füllkörperkolonne soll in einem Diagramm veranschaulicht werden. In Abbildung 3 ist exemplarisch die Abhängigkeit des auf die Füllkörperschüttungshöhe H_0 bezogenen Druckverlustes ΔP_0 von der Gasgeschwindigkeit u_G und der spezifischen Flüssigkeitsbelastung u_L^* dargestellt [1]. Zu beachten ist die doppeltlogarithmische Auftragung.

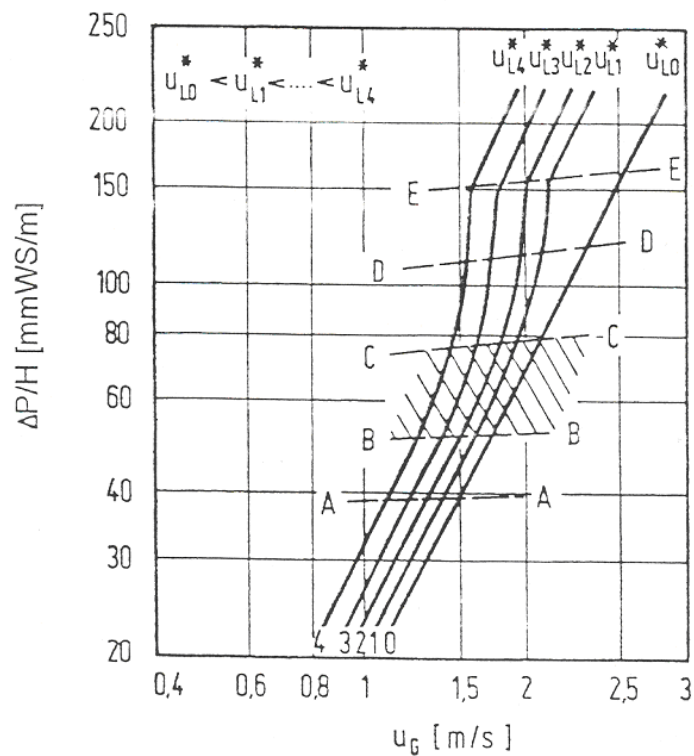



Abbildung 3: Abhängigkeit des Druckverlustes ΔP_0 von u_G und u_L^*

\overline{AA} Staugrenze

\overline{BB}  \overline{CC} Arbeitsbereich der Kolonne (50-80% der Flutgrenze)

\overline{DD} Flutgrenze

\overline{EE} Flüssigkeitsaustragsgrenze

Die auf der Abszisse aufgetragene Geschwindigkeit u_G ist die druck- und temperaturkorrigierte Gasgeschwindigkeit, die sich mit Hilfe von Gleichung (1)

berechnen lässt [2].

$$u_G = \frac{\dot{V}_G}{3600 \left[\frac{s}{h} \right] \cdot A_S} \cdot \sqrt{\frac{P_G}{P_N}} \cdot \sqrt{\frac{T_N}{T_G}} \quad (1)$$

Unter der spezifischen Flüssigkeitsbelastung u_L^* wird der auf den Querschnitt A_S der leeren Füllkörpersäule bezogene Flüssigkeitsstrom \dot{V}_L verstanden:

$$u_L^* = \frac{\dot{V}_L}{A_S} \quad (2)$$

In Abbildung 3 stellt die Kurve 0 den Druckverlust für eine unberieselte Schüttung, die Kurven 1 bis 4 den Druckverlust für eine berieselte Schüttung bei unterschiedlicher spezifischer Flüssigkeitsbelastung u_L^* dar. Während sich der Druckverlust ohne Berieselung (u_{L0}^*) in der doppeltlogarithmischen Auftragung nahezu linear ändert, weist jede Druckverlustkurve für eine konstante Berieselung mit Erhöhung der Gasgeschwindigkeit vier Knickpunkte auf, die im Folgenden erläutert werden.

Bis zur Grenze \overline{AA} verlaufen die Kurven 1 bis 4 mit steigender Gasgeschwindigkeit parallel zu Kurve 0. Ab dieser Grenze laufen die Kurven für die berieselte Strömung noch parallel zueinander, doch ist ihre Steigung etwas größer als die der Druckverlustkurve 0. Nach Überschreiten der Grenze \overline{BB} werden die Wechselwirkungen zwischen Gas und Flüssigkeit sichtbar: Die Flüssigkeit beginnt sich in der Kolonne aufzustauen.

Durch weitere Steigerung der Gasgeschwindigkeit staut sich die Flüssigkeit in der ganzen Füllkörperschicht an bis die Kolonne schließlich flutet. Das Einsetzen des Flutens ist im Druckverlustdiagramm durch die Flutgrenze \overline{DD} gekennzeichnet, welche die obere Belastungsgrenze markiert. Oberhalb dieses Punktes ist der Gegenstrombetrieb der Kolonne für die Absorption nicht mehr möglich. Die am Kolonnenkopf aufgegebene Flüssigkeit wird durch das aufwärtsströmende Gas am Durchströmen der Füllkörperschüttung gehindert. Die Druckverlustkurven steigen fast senkrecht nach oben an und verlaufen erst ab der Austragsgrenze \overline{EE} , ab welcher die aufgegebene Flüssigkeit schließlich mit dem Gasstrom aus der Kolonne ausgetragen wird, wieder parallel zur Kurve 0.

In der Praxis liegt der Arbeitsbereich für Füllkörperkolonnen zwischen der unteren und der oberen Belastungsgrenze. Die Gasgeschwindigkeit im Arbeitsbereich liegt oft zwischen 50 und 80 % der am Flutpunkt (\overline{DD}) erreichten Gasgeschwindigkeit, in Abbildung 2 zwischen den Grenzen \overline{BB} und \overline{CC} .

Abgesehen von der Abschätzung des Arbeitsbereichs der Kolonne kann im Diagramm die Erhöhung des Druckverlustes bei konstanter Gasgeschwindigkeit u_G abgelesen werden. Diese wird durch den kleiner werdenden freien Strömungsquerschnitt, welcher dem Gas zur Verfügung steht, bei höheren Flüssigkeitsbelastungen verursacht.

2.2 Flüssigkeitsinhalt (Hold-Up)

Mit dem Rieseln der Waschflüssigkeit durch die Füllkörperschüttung ergibt sich eine zusätzliche Volumenverringerng für das entgegenströmende Gas. Der Flüssigkeitsinhalt h_L ist die Ursache für die Verengung des freien Strömungsquerschnitts im Vergleich zur trockenen Füllkörperschüttung und somit eine wichtige Größe zur Beschreibung der Strömungsvorgänge in der Füllkörperkolonne. Bezogen auf die Stoffaustauschleistung der Kolonne zeichnet sich ein höherer Hold-Up, sowohl durch längere Verweilzeiten des Lösungsmittels, als auch einer größeren Kontaktfläche zwischen Gas und Flüssigkeit, aus.

Er berechnet sich aus dem Flüssigkeitsvolumen V_L , das sich im stationären Betriebszustand in der Schüttung befindet, bezogen auf das Volumen der Leersäule V_S und wird als Hold-Up bezeichnet (Abb. 4).

$$h_L = \frac{V_L}{V_S} \quad (3)$$

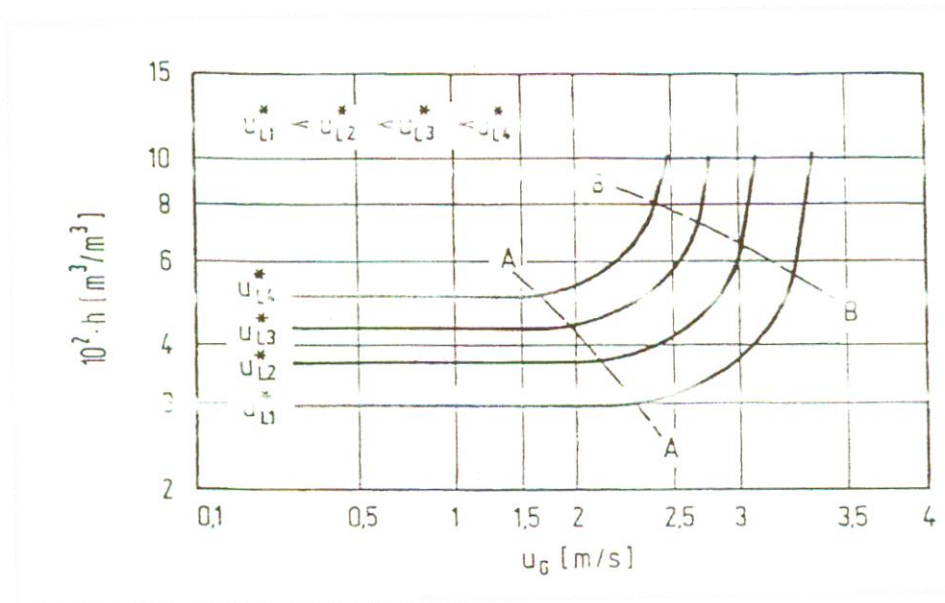


Abbildung 4: Abhängigkeit des Flüssigkeitsinhalts h_L von u_G und u_L^* [4]

Der Flüssigkeitsinhalt h_L ist (für konstante u_L^*) bei niedrigen Gasgeschwindigkeiten bis zum Staupunkt (hier Grenze \overline{AA}) konstant. Er nimmt ab dem Staupunkt mit wachsender Gasgeschwindigkeit u_G zu und steigt bei Erreichen des Flutpunktes (Grenze \overline{BB}) senkrecht an. Der stationäre Kolonnenbetrieb findet zwischen den Grenzen \overline{AA} und \overline{BB} statt.

3. Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 5 skizziert.

Mit dem Gebläse 1 wird Luft aus der Umgebung gefördert. Der über das Ventil 13 eingestellte Luft-Volumenstrom wird über das Rotameter 8 erfasst und in die Füllkörperkolonne 9 geleitet. Nach Durchströmen der Füllkörperschicht verlässt die Luft am Kopf der Kolonne die Anlage.

Die Waschflüssigkeit wird aus dem Vorratsbehälter 2 über die Zulaufpumpe 5 zum Kopf der Kolonne gepumpt. Über das Rotameter 7 wird der Volumenstrom an Waschflüssigkeit angezeigt, welcher über das Ventil 11 eingestellt wird. Die Flüssigkeit wird oberhalb der Füllkörperschüttung mittels eines Flüssigkeitsverteilers gleichmäßig aufgegeben. Am Sumpf der Kolonne wird die Flüssigkeit mit Hilfe der Rücklaufpumpe 4 abgezogen und über das Rotameter 6 in den Sammelbehälter 3 gepumpt.

Die Temperatur wird an den Stellen Ein- bzw. Austritt für jeweils die Flüssig- und die Gasphase gemessen und an einem PC angezeigt. An U-Rohr-Manometern kann der Druckverlust über die Füllkörperschüttung ΔP abgelesen werden.

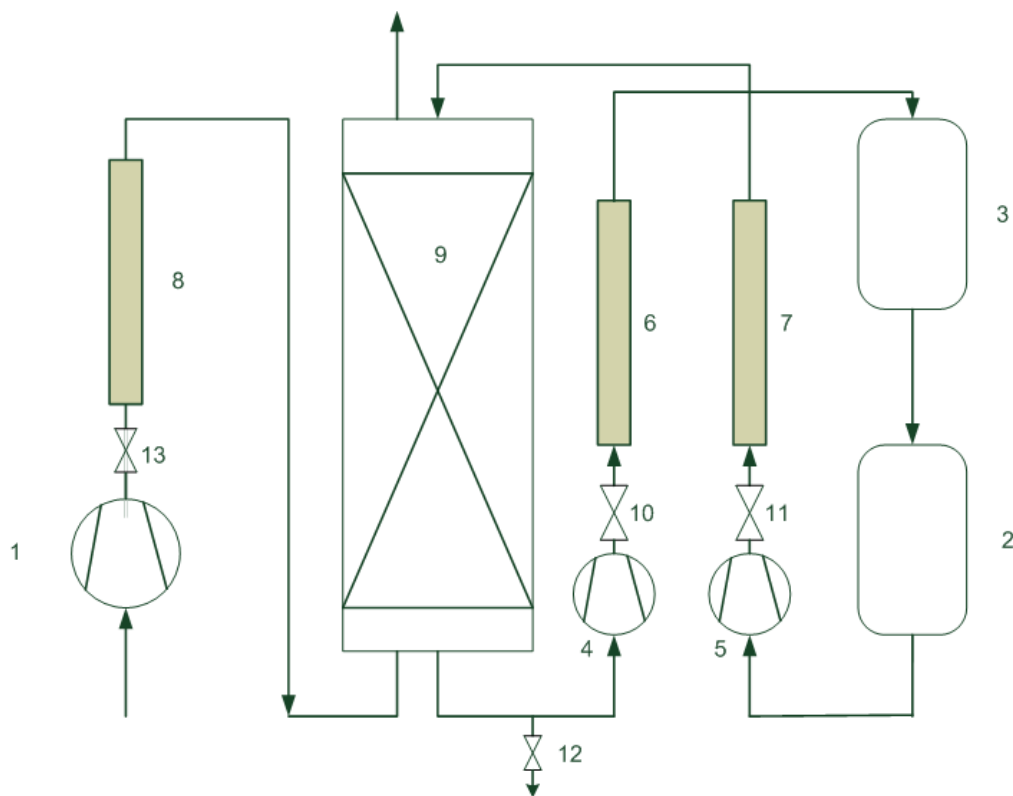


Abbildung 5: Versuchsaufbau

4. Anleitung zur Versuchsdurchführung

- Bestimmen Sie 5 bis 7 Werte für den Druckverlust der unberieselten Kolonne.

- Schalten Sie die Pumpe für den Flüssigkeitszulauf ein. Sobald sich Flüssigkeit im Sumpf der Kolonne sichtbar anstaut, schalten Sie die Pumpe für den Flüssigkeitsablauf ein.
(Der Ablaufstrom muss manuell so geregelt werden, dass die Flüssigkeitsmenge im Sumpf der Kolonne möglichst konstant bleibt.)

- Vermessen Sie nun drei verschiedene Flüssigkeitsströme mit jeweils 4 bzw. 5 verschiedenen Gasbelastungen. Es ist der Druckverlust über die Füllkörperschüttung aufzunehmen und der Hold-up zu bestimmen.

- Zur Bestimmung des Hold-ups:
Der Flüssigkeitspegel im Sumpf wird markiert. Dann werden sofort und gleichzeitig die Pumpen und das Gebläse abgeschaltet und der Flüssigkeitsablauf (Ventil 10) geschlossen. Der nun aus der Füllkörperschüttung in den Sumpf fließende Flüssigkeitsinhalt wird gemessen, indem über das Ventil 12 soviel Flüssigkeit in einen Messbecher entnommen wird, bis der Pegel wieder an der zuvor markierten Stelle liegt. Die entnommene Menge entspricht dem Flüssigkeitsinhalt.

- Beobachten Sie zu jedem Messpunkt das Strömungsregime in der Füllkörperschüttung, sodass Sie es später beschreiben können.

5. Versuchsauswertung

Das hydrodynamische Verhalten von Fluiden in Packungskolonnen kann mit den Korrelationen von Billet [3] beschrieben werden.

Für den Druckverlust der unberieselten Kolonne ($u_L^*=0$) stellt Billet folgende Gleichung auf:

$$\frac{\Delta P_o}{H} = \Psi_o \frac{a}{\epsilon^3} \frac{F_v^2}{2} \frac{1}{K} \quad (4.1)$$

Mit:

$$\frac{1}{K} = 1 + \frac{2}{3} \frac{1}{1 - \epsilon} \frac{d_p}{d_s} \quad (4.2)$$

$$\Psi_o = C_{p,o} \left(\frac{64}{Re_v} + \frac{1,8}{Re_v^{0,08}} \right) \quad (4.3)$$

$$Re_v = \frac{u_v d_p}{(1 - \epsilon)} K \cdot \frac{1}{\nu} \quad (4.4)$$

$$d_p = 6 \frac{1 - \epsilon}{a} \quad (4.5)$$

Die kinematische Viskosität der Luft können Sie für die Berechnung der Reynoldszahl über Gl. 4.4 konstant als $1 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$ annehmen.

Der Druckverlust der berieselten Kolonne ($u_L^*>0$), kann mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$\frac{\Delta P}{H} = \Psi_L \frac{a}{(\epsilon - h_L)^3} \frac{F_v^2}{2} \frac{1}{K} \quad (4.6)$$

Mit:

$$\Psi_L = C_{p,0} \left(\frac{64}{Re_v} + \frac{1,8}{Re_v^{0,08}} \right) \left(\frac{\epsilon - h_L}{\epsilon} \right)^{1,5} \left(\frac{h_L}{h_{L,S}} \right)^{0,3} \exp(C_1 \sqrt{Fr}) \quad (4.7)$$

F_V bezeichnet den Gasbelastungsfaktor : $F_V = u_G \cdot \sqrt{\rho_G}$

$h_{L,S}$ bezeichnet den Flüssigkeitsinhalt am Staupunkt, der auch von der Flüssigkeitsbelastung abhängt. Für Betriebsbedingungen unterhalb des Staupunktes,

also wenn $h_L < h_{L,s}$ wird $h_L = h_{L,s}$ angenommen, wodurch der Quotient in Gl. 4.7 dann zu 1 wird.

Die in Formel 2.1 verwendete Froudezahl ist definiert als:

$$Fr = \frac{u_L^2 a}{g} \quad (4.8)$$

Sie entspricht dem Verhältnis der Trägheits- zu den Schwerkraften [3]

Die Konstante C_1 in Gleichung (4.7) berechnet sich durch $C_1 = 13300/a^{1,5}$.

Die im Fachlaborversuch eingesetzten Füllkörper weisen eine Porosität $\epsilon = 0,98$ [-] und eine spezifische Austauschfläche $a = 150$ [m^2/m^3] auf. Für die Dichte der Gasphase können Sie in diesem Versuch einen konstanten Wert von $1,18$ kg/m^3 annehmen.

Eine wesentliche Idee hinter dieser hier verwendeten Korrelation ist, dass die füllkörperspezifische Konstante C_{P0} , durch Messungen an der trockenen Kolonne bestimmt werden kann. Mit dieser soll dann für den gesamten Betriebsbereich der berieselten Kolonne der auf die Höhe der Füllkörperschüttung bezogene Druckverlust berechnet werden können.

6. Aufgabenstellung

- Stellen Sie den Druckverlust $\frac{\Delta P_0}{H_0}$ der unberieselten Kolonne und die auf die Höhe der Füllkörperschüttung bezogenen Druckverluste der berieselten Kolonne in Abhängigkeit von der korrigierten Gasgeschwindigkeit u_G mit der spezifischen Flüssigkeitsbelastung u_L^* als Parameter in einem doppeltlogarithmischen Diagramm dar.
- Tragen Sie den Hold-Up h_L in Abhängigkeit von der Gasgeschwindigkeit u_G für die spezifische Flüssigkeitsbelastung u_L^* in einem doppeltlogarithmischen Diagramm auf.
- Kennzeichnen Sie die Stau- und Flutgrenze der Kolonne in beiden Diagrammen.
- Berechnen Sie alle $C_{p,0}$ Werte für die gemessenen bezogenen Druckverlustwerte der unberieselten Kolonne und bilden Sie den Mittelwert. Berechnen Sie nun mit diesem mittleren $C_{p,0}$ und den Gleichungen 4.6 und 4.7 die theoretischen Druckverlustkurven für Ihre Messreihen. Vergleichen Sie diese mit den gemessenen Kurven.
- Diskutieren Sie alle Ergebnisse. Wie beurteilen Sie die von Ihnen ermittelten Werte für C_P ?
- Überlegen Sie sich mögliche Vor- und Nachteile der hier vorgestellten Korrelation.
- Stellen Sie alle gemessenen und ausgewerteten Ergebnisse und Beobachtungen in einem maximal 10-seitigen Bericht zusammen.

7. Kurzfragen

1. Welche Anforderungen sollten trennwirksame Einbauten erfüllen?
2. Welche Kolonnentypen gibt es für Abtrennungsanwendung wie Absorption und Destillation?
3. Nennen Sie zwei großtechnische Prozesse, bei denen Füllkörperkolonnen eingesetzt werden.
4. Nennen sie drei Punkte die eine Kolonne bei Erhöhung der Gasgeschwindigkeit durchläuft.
5. Kann sich der Druckverlust bei konstanter Gasgeschwindigkeit ändern?
6. Warum werden die Druckverlust Diagramme doppeltlogarithmisch aufgetragen?
7. Was beschreibt der Hold-Up und was ist seine trenntechnische Bedeutung?
8. Welche Grenzen findet man im Hold-Up-Diagramm und wie erkennt man sie?
9. Von welchen Größen ist der Hold-Up abhängig?
10. Welche Anforderungen muss eine Waschflüssigkeit erfüllen?
11. Warum wird die Luft vor Eintritt in die Absorptionskolonne normalerweise befeuchtet?
12. Wenn Flüssigkeit auf der Kolonnenwand fließt, ist es ein Vor- oder Nachteil?
13. Was wird mit einem U-Rohr-Manometer gemessen?
14. Warum ist Gasdruckverlust ein wichtiger Parameter für Füllkörper?

8. Literatur

[1] R. Billet, Packed Towers, VCH, 1995

[2] P.Kramer, Durchflussvolumen mit Schwebekörpern bestimmen,
Prozessautomation & Messtechnik März 2008, S.40-4, 2008

[3] R. Billet, M. Schultes, Prediction of mass transfer columns with dumped and arranged packings: Updated summary of the calculation method of Billet and Schultes, Chemical Engineering Research and Design, 77 (6), S. 498-504, 1999

[4] J. Mackowiak, *Fluidynamik von Füllkörpern und Packungen*,
Springer Verlag Berlin, 2003, 2. Auflage