

Jerzy Maćkowiak

Fluidodynamik von Füllkörpern und Packungen

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

Engineering  **ONLINE LIBRARY**

<http://www.springer.de/engine-de/>

Jerzy Maćkowiak

Fluiddynamik von Füllkörpern und Packungen

Grundlagen der Kolonnenauslegung

2., wesentlich erweiterte und aktualisierte Auflage
mit 135 Abbildungen



Springer

Dr.-Ing. habil. Jerzy Maćkowiak
ENVICON Engineering GmbH
Postfach 100637
46526 Dinslaken
e-mail: j.mackowiak@envicon.net

Die erste Auflage erschien 1991 im Verlag Salle + Sauerländer, Frankfurt am Main

ISBN 978-3-642-62449-0 ISBN 978-3-642-55575-6 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-642-55575-6

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

<http://www.springer.de>

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003
Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2003
Softcover reprint of the hardcover 2nd edition 2003

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen. Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Einbandgestaltung: Struve & Partner, Heidelberg
Satz: Fotosatz-Service Köhler GmbH, Würzburg

Gedruckt auf säurefreiem Papier 68/3020/M - 5 4 3 2 1 0

Geleitwort von Prof. Dr.-Ing. A. Mersmann, TU München

Packungskolonnen werden seit vielen Jahren in verschiedenen technischen Bereichen beispielsweise der thermischen Trenntechnik, der Umwelttechnik und der Biotechnologie eingesetzt, um Gase und Flüssigkeiten zur Stoffübertragung miteinander in Kontakt zu bringen. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Überlegungen haben in den letzten Jahrzehnten immer wieder zu neuen oft effizienten Packungen geführt. In der Industrie besteht das große Bedürfnis, auch moderne Packungen aus neuen Werkstoffen und neuartigen geometrischen Formen genau auslegen und zuverlässig betreiben zu können. Hierzu sind zunächst Messdaten und deren allgemeine Darstellung erforderlich. Dieser mühevollen und zeitraubenden Aufgabe hat sich der Autor seit vielen Jahren unterzogen.

Das vorliegende Werk stützt sich nun auf über 10.000 Messdaten zum Druckverlust, über 1100 Messwerte zum Flüssigkeitsinhalt und über 1200 Messpunkte zum Flutpunkt an rund 160 verschieden Füllkörpern und geordneten Packungen aus den verschiedenen in der Praxis vorkommenden Materialien. Die überwiegende Zahl dieser Daten dürfte der Autor in präziser und reproduzierbarer Weise am Lehrstuhl für Thermische Stofftrennverfahren der Ruhr-Universität Bochum bestimmt haben. Im Hinblick auf die Datenfülle ragt das Werk weltweit aus vergleichbaren Publikation heraus. Die Industrie wird für dieses Werk dem Autor ebenso wie dem Springer-Verlag dankbar sein.

So hoffe und wünsche ich, dass die umfangreichen und präzisen Ergebnisse und Aussagen dieses Werkes zum Nutzen der Menschheit dazu beitragen, Packungskolonnen besser als bisher auszulegen und zu betreiben.

A. Mersmann

Vorwort zur 2. Auflage

1991 erschien die erste Ausgabe des Buches „Fluiddynamik von Füllkörperkolonnen mit modernen Füllkörpern und Packungen für Gas/Flüssigkeitssysteme“. Bereits nach wenigen Jahren war diese Ausgabe vergriffen. Dieser Umstand sowie zahlreiche Anfragen vor allem aus der Industrie haben mich dazu bewegt, eine zweite, erweiterte Ausgabe herauszugeben.

Eine Packungskolonnen stellt nach wie vor das Herzstück jedes thermischen Trennprozesses dar. Es besteht daher Bedarf an Berechnungsgrundlagen für Packungskolonnen, die ein exaktes und zuverlässiges Auslegen ermöglichen.

Das in der ersten Ausgabe vorgestellte Tropfen-Schwebbett-Modell (TSB) wurde von der Fachwelt aufgenommen und wird in der Industrie aufgrund der damit möglichen zuverlässigen fluiddynamischen Auslegung von Füllkörperkolonnen von zahlreichen Firmen verwendet. Zur Erleichterung der Auslegung wurde das Modell in das Simulationsprogramm ChemCAD implementiert. Zur Verbreitung des TSB-Modells hat sicherlich das Rechenprogramm FDPACK beigetragen, die aktuelle Version ist auch für Windows erhältlich. Das Programm stellt die Rechenergebnisse anwenderfreundlich tabellarisch sowie graphisch, in Form von Belastungs-, Druckverlust- und Hold-up-Diagrammen, dar.

Die 1. Auflage beschränkt sich auf die Beschreibung der Fluiddynamik von Füllkörperkolonnen und strukturierten Packungen im Vakuum- und Normaldruckbereich bis ca. 2 bar und für spezifische Flüssigkeitsbelastungen von bis zu $100 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Dieser Anwendungsbereich deckt einen Großteil der Anwendungen und Aufgaben aus dem Bereich der Absorption und Desorption von gut bzw. mäßig löslichen Gasen und den Bereich der Vakuum- und Normaldruckrektifikation ab.

Die Bedeutung der Hochdruckabsorption und der Hochdruckrektifikation hat in den vergangenen 10 Jahren jedoch stetig zugenommen, so dass eine Erweiterung des bestehenden Modells wünschenswert war. Erfreulicherweise wurden im Laufe der 90er-Jahre neue Arbeiten publiziert, in denen Druckverlustdaten, Flutpunkt-daten und Hold-up-Daten für Hochdrucksysteme vorgestellt wurden. Dadurch war es möglich, die in der 1. Ausgabe abgeleitete Korrelation zur Bestimmung des Hold-up am Flutpunkt um den Bereich hoher Flüssigkeitsbelastungen und damit um den Bereich höherer Hold-up-Werte zu erweitern und mathematisch zu beschreiben (Kap. 2).

Mit Hilfe des TSB-Modells kann nun ein für die Praxis sehr bedeutsamer Bereich höherer Drücke beschrieben werden, in dem bekanntlich höhere Flüssigkeitsbelastungen und kleinere Gasgeschwindigkeiten zur Anwendung kommen.

Das TSB-Modell konnte anhand von Messdaten im Druckbereich bis 100 bar überprüft werden, einige Zahlenbeispiele aus der Praxis geben am Ende jedes Kapitels einen Einblick in die Anwendung des Modells.

In dieser Ausgabe wird ein zusätzliches Modell zur Berechnung des Druckverlustes berieselter Packungen und Schüttungen vorgestellt, welches auf der Kenntnis des Widerstandsgesetzes $\psi_{LV} = f(Re_L)$ für Zweiphasenströmungen und des Flüssigkeitsinhaltes h_L^0 im gesamten Belastungsbereich bis zum Flutpunkt aufbaut. Dieses Modell kann zweckmäßigerweise immer dann angewendet werden, wenn zur Bestimmung des Widerstandsgesetzes lediglich Messdaten der Druckverluste für ein Zweiphasengemisch vorliegen (keine Druckverluste der trockenen Schüttung), oder wenn der Druckverlust oberhalb der Staugrenze für viskose und niedrig viskose Gemische genauer bestimmt werden soll.

Anhand zahlreicher Messdaten zeigt sich, dass dieses Modell im Flutpunktbereich sowohl bei laminarer $Re_L < 2$ als auch bei turbulenter Flüssigkeitsströmung $Re_L > 2$ zufriedenstellende Ergebnisse liefert.

Die schon in der 1. Auflage vorgestellte Beziehung zur Bestimmung der Flutpunktgeschwindigkeit wurde weiter modifiziert und gilt nun auch für strukturierte Packungen beliebiger Ausführung, für Rohrkolonnen mit regelmäßig angeordneten Pallringen, Raschigringen und Białeckiringen und für geordnete Schichten von Pallringen, Raschigringen und Białeckiringen. Durch neue Erkenntnisse konnte die unterschiedliche Belastbarkeit von strukturierten Kolonneneinbauten vom Typ X und Y mit unterschiedlicher Neigung der Strömungskanäle mathematisch erfasst werden. Die erweiterte allgemeine Beziehung zur Berechnung der Flutpunktgeschwindigkeit berücksichtigt auch diesen Sachverhalt. Dadurch ist es möglich, diese Beziehung für beliebige Einbauten zu verwenden.

Im Kapitel 7 finden sich zum ersten Male Grundlagen zur Berechnung der Fluidodynamik von Füllkörperkolonnen für die Flüssig/Flüssig-Extraktion. Das bereits erwähnte TSB-Modell für Gas/Flüssigkeits-Systeme ist auf Flüssig/Flüssig-Systeme übertragbar. Anhand einiger Zahlenbeispiele wird die Vorgehensweise bei der Berechnung der Flutpunktgeschwindigkeit der dispersen und der kontinuierlichen Phase erläutert.

Leitgedanke bei der Verfassung dieses Buches war, ein geschlossenes einheitliches Konzept zur Auslegung von Füllkörperkolonnen für Gas/Flüssig- und Flüssig/Flüssig-Systeme zu erstellen, um die Berechnung der einzelnen Parameter transparenter zu gestalten und objektive Vergleiche zwischen den einzelnen Einbauten zu ermöglichen. Der Unterschied zu anderen Arbeiten liegt in einer anderen Art der Erfassung der Vorgänge in Füllkörperkolonnen, die auf dem spezifischen Strömungsverhalten von Tropfensystemen aufbauen. Das Auftreten von Tropfensystemen in Füllkörperkolonnen wurde 1991 von Bornhütter und Mersmann bestätigt. Auf diese Weise ergeben sich trotz der sehr komplizierten Vorgänge bei vorliegender Zweiphasenströmung in Packungskolonnen für die Praxis unkomplizierte, anwenderfreundliche Beziehungen, die vor allem der Praktiker bei der Lösung verschiedener Aufgabenstellungen zu schätzen weiß. Besonders beim Vergleich zahlreicher Einbauten erweisen sich die einfachen Beziehungen von großem Vorteil. Auch für Wissenschaftler und Studenten dürfte diese Arbeit als Grundlage zum besseren Verständnis der Strömungsvorgänge in Gas/Flüssig- und Flüssig/Flüssig-Systemen dienen.

Im Gegensatz zu anderen Arbeiten werden hier die Publikationen anderer Autoren zur Absicherung und Erweiterung der Anwendungsbereiche des TSB-Modells verwendet, nicht aber zur Darstellung unterschiedlicher Berechnungsmethoden und ihrer Vergleiche. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt stützt sich diese Arbeit auf über 10.000 Messdaten zum Druckverlust, über 1200 Daten zum Flutpunkt und ca. 1100 zum Hold-up und auf fast 160 Füllkörpertypen. Dies entspricht in etwa einer Verdopplung der Daten im Vergleich zur ersten Ausgabe.

Von besonderer wissenschaftlicher Bedeutung ist die Erkenntnis, dass der Versuchsaufwand bei der Untersuchung und Entwicklung neuer Bauformen bis auf wenige Versuchsschritte reduziert werden kann, um die Modellparameter des TSB-Modells schnell und mit geringem, experimentellem Aufwand zu bestimmen. An dieser Stelle sollte betont werden, dass allein Versuche an Einphasenströmungen von Luft unter Umgebungsbedingungen ausreichend sind, um das systemunabhängige Widerstandsgesetz $\psi = f(\text{Re}_L)$ zu ermitteln. Somit ist es möglich, die gesamte Fluidodynamik von Füllkörperkolonnen eines Einbautentyps auf beliebige Anwendungsbereiche der thermischen Trenntechnik zu übertragen.

J. Maćkowiak

Zusammenfassung der Arbeit

Bei der Rektifikation, Absorption und Flüssig/Flüssig-Extraktion hält seit Jahren die Nachfrage nach druckverlustarmen Einbauten an. In der chemischen Industrie besteht der Trend, die mit Böden ausgerüsteten Kolonnen durch solche mit modernen Füllkörpern und strukturierten Packungen zu ersetzen. Deshalb ist es für die Projektierung von Packungskolonnen besonders wichtig, zuverlässige Methoden zur Vorhersage des Stoffaustausches und der Hydrodynamik der Zweiphasenströmung zu verwenden.

Diese Arbeit verfolgt daher das Ziel, die Grundlagen der fluiddynamischen Auslegung von modernen regellos geschütteten, geordneten Füllkörperkolonnen und Packungen anhand eines neuen, für beliebige Füllkörperformen geltenden Berechnungskonzeptes zu vermitteln.

Dem Autor war dabei die Anwendungsbezogenheit der Arbeit wichtig, da bekanntlich die Behandlung der Rektifizierertechnik, Absorption und Extraktion als Hauptgebiet der thermischen Verfahrenstechnik meist rein empirisch erfolgt.

In der vorliegenden Ausgabe sind Auslegungsunterlagen für Gas/Flüssigkeitssysteme und Flüssig/Flüssig-Systeme vorgestellt, die miteinander stark verflochten sind und beide auf dem TSB-Modell aufbauen.

Das Auslegungsverfahren für Gas/Flüssigkeitssysteme basiert auf Beziehungen, deren Herleitung und Verifizierung durch das Experiment viel Platz eingeräumt wird. Das Verfahren gestattet die Berechnung der Flutgrenze, des Druckverlustes und des Flüssigkeitsinhaltes für Gas/Flüssigkeitssysteme praktisch im gesamten Betriebsbereich bis zum Flutpunkt. Folgende Eigenschaften des Verfahrens sind besonders zu erwähnen:

Die Modellparameter werden für eine gewählte Schüttungsdichte mit dem Stoffpaar Luft/Wasser unter Normalbedingungen ermittelt. Es wird experimentell nachgewiesen, dass diese Modellparameter für die Trennung der Gemische in der Rektifizierertechnik bei Normaldruck, Vakuum und Hochdruck im ganzen Belastungsbereich gelten. Somit kann der Versuchsaufwand bis auf wenige Versuchsreihen unter Verwendung des Systems Luft/Wasser reduziert werden.

Das Verfahren gestattet auch die Berechnung der Flutgrenze und des Flüssigkeitsinhaltes für Flüssig/Flüssig-Systeme praktisch im gesamten Betriebsbereich bis zum Flutpunkt.

Gliederung

Der Inhalt dieser Arbeit ist in sieben Kapitel gegliedert; die Reihenfolge der ersten fünf Kapitel entspricht weitgehend den Berechnungsschritten, die bei der fluidodynamischen Auslegung von Füllkörperkolonnen für Gas-Flüssigkeitssysteme abgearbeitet werden. Die ersten sechs Kapitel behandeln die Gas-Flüssigkeitssysteme, Kap. 7 ist der Flüssig/Flüssig-Extraktion gewidmet.

In Kap. 1 wird auf den Aufbau von Füllkörperkolonnen und auf ihre Bedeutung bei der Trennung von Gemischen unter Vakuum, bei der Absorption und Desorption kurz eingegangen sowie ein Überblick über die heute gebräuchlichen Auslegungsverfahren gegeben. Anschließend wird das hydraulische Verhalten von Füllkörperkolonnen mit den dazugehörigen Parametern behandelt. Die Bestimmung der Flutgrenze und des unteren Belastungsbereiches erfolgt hierbei in Kap. 2, die Bestimmung des Druckverlustes der unberieselten Schüttung in Kap. 3. Dem Druckverlust der berieselten Schüttung und dem Flüssigkeitsinhalt sind Kap. 4 und Kap. 5 gewidmet.

Die abgeleiteten Beziehungen der Kap. 2, 3 und 4 ermöglichen die Festlegung des Apparatedurchmessers und die Bestimmung des Druckverlustes sowie des Flüssigkeitsinhaltes im gewählten Betriebsbereich und am Flutpunkt.

Zur Verdeutlichung der Problematik wird zu Beginn eines jeden Kapitels kurz auf die wichtigsten Arbeiten zu diesem Thema aus der Sicht des Autors eingegangen und anschließend der gewählte Lösungsansatz vorgestellt.

Die Zusammenfassung der Ergebnisse dieser Arbeit erfolgt in Kap. 6. In den Sammeltabellen 6-1 a-c werden die geometrischen Füllkörperdaten wie Schüttungsdichte N_0 , geometrische Füllkörperoberfläche a_0 , Lückenvolumen e_0 , Gewicht von 1 m^3 nach Herstellerangaben aufgeführt. Zusätzlich sind sämtliche Zahlenwerte der für die fluiddynamische Auslegung benötigten Größen für ca. 160 Füllkörper und geordnete Füllkörperschichten sowie Rohrkolonnen und strukturierte Packungen angegeben.

Durch die Herleitung von für jeden Parameter allgemein geltende Berechnungsgleichungen gelang es, das umfangreiche Forschungsmaterial in komprimierter Form darzustellen, worüber in der zusammenfassenden Darstellung der Ergebnisse dieser Arbeit in Kap. 6 berichtet wird. Am Schluss jedes Kapitels werden Rechenbeispiele angegeben, anhand welcher sich die einzelnen Beziehungen zur Bestimmung des Dampfbelastungsfaktors am Flutpunkt des Flüssigkeitsinhaltes und des Druckverlustes der berieselten und unberieselten Schüttungen nachvollziehen lassen. Die Zahlenbeispiele sind praxisbezogen orientiert und zur

Vertiefung der vorgestellten Zusammenhänge gedacht. Dabei kommen unterschiedliche Packungen zum Einsatz.

Literaturnachweise zu den einzelnen Kapiteln sind am Schluss des jeweiligen Kapitels zusammengestellt.

Im Buch werden umfangreiche Tabellen und Bilder mit Angaben zu den Messdaten und zu den Versuchsbedingungen zusammengestellt, die den enormen Versuchsumfang und die Anwendungsmöglichkeiten des Verfahrens eindrucksvoll aufzeigen. Die Beschreibung des bereits bekannten und in der Praxis vielfach eingesetzten Programms FDPACK zur fluiddynamischen Auslegung von Füllkörperkolonnen befindet sich im Anschluss an das Kap. 6.

Die gebräuchlichsten Bezeichnungen, die in der Arbeit verwendet werden, sind am Anfang der Arbeit im gesondert erstellten Symbolverzeichnis zusammengestellt und erläutert.

Diese erste Auflage der Arbeit entstand in den Jahren 1988–1990, die zweite in den Jahren 1997–2002 und basiert auf Messungen, die an über 160 vorwiegend modernen Füllkörpern und Packungen sowie geordneten Füllkörperperschichten in der Zeit von 1965 bis 2002 erhalten wurden.

Die Versuche sind größtenteils vom Autor selbst an Rektifizieranlagen mit Durchmessern d_s von 0,15/0,22/0,5 m sowie an Absorptionsanlagen mit Durchmessern von 0,15/0,22/0,3 m und 0,45/0,6 m sowie an industriellen Anlagen der Firma Envicon Engineering GmbH mit Durchmesser von 0,8/1,2/1,6/1,8 m durchgeführt worden. Eine ganze Reihe von Versuchsdaten zur Rektifikation ($d_s = 0,5$ m) und Absorption ($d_s = 0,3$ m) stammt aus der Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verfahrenstechnik der TU-Wrocław/Polen (1972–1976). Durch die Zusammenarbeit mit Dr. Ing. St. Filip, Dr. Ing. Z. Ługowski, Dr. Ing. St. Suder und Dr. Ing. habil. A. Koziol von der TU-Wrocław entstanden in der Zeit von 1978 bis 1986 zahlreiche Arbeiten über Untersuchungen moderner Füllkörper an großtechnischen Anlagen, die ebenfalls in dieser Monographie Berücksichtigung fanden. Ein Teil der Versuchsergebnisse, vorwiegend die Rektifizierdaten für metallische 15- bis 80-mm Pallringe stammt aus der Sammlung von Prof. Billet. Ein weiterer Teil von Versuchsdaten zur Rektifizierertechnik und Extraktionsdaten stammt aus zahlreichen Studien- und Diplomarbeiten, die im Zeitraum 1978–1989 am Lehrstuhl für Thermische Stofftrennverfahren der Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhlinhaber o. Prof. Dr. Ing. R. Billet, vom Autor persönlich konzipiert und betreut wurden.

Zur Auswertung aller Messdaten, einschließlich der Literaturdaten, wurde 1990 eine Datenbank angelegt, die zur Zeit über 1200 Messpunkte zum Flutpunkt, über 1100 Messpunkte zum Flüssigkeitsinhalt und über 10.000 Messpunkte zum Druckverlust von berieselten Schüttungen und Packungen beinhaltet. Die Zahl der Test-Gemische liegt bei 32. Es entstand somit eine umfangreiche Datensammlung, die laufend durch neue Messdaten weiter vervollständigt wird.

Der Fortschritt bei der Genauigkeit der Auslegung von Packungskolonnen für Gas-Flüssig- und Flüssig/Flüssig-Systeme ist enorm. Aufgrund der Ergebnisse dieser Arbeit ist man in der Lage, lediglich bei Kenntnis der geometrischen Form eines Füllkörperelementes, präzise Aussagen über das zu erwartende fluiddynamische Verhalten der Füllkörperperschüttung zu treffen, ohne irgendwelche verfahrenstechnischen Versuche durchführen zu müssen.

Danksagung

Mein Dank gilt besonders Herrn o. Prof. Dr.-Ing. A. Mersmann, TU München, für viele fruchtbare Diskussionen und wertvolle Anregungen bei der Erstellung der ersten Auflage sowie meinem Freund Prof. Dr.-Ing. habil. A. Koziół, TU-Wrocław, für die aufmerksame Durchsicht der ersten Auflage der Arbeit sowie als Mitarbeiter der Firma Envicon Engineering GmbH für die Mitarbeit bei der Entwicklung des FDPÄK-Programms.

Bei der Bearbeitung der Flutpunktdaten der zweiten Auflage war mir mein Freund Dr.-Ing. J. Szust eine wertvolle Hilfe.

Mein Sohn cand.-Ing. Jan Maćkowiak hat die zweite Auflage aufmerksam korrigiert und für den Druck entsprechend formatiert.

Frau Dipl.-Ing. A. Ługowska hat die sehr aufwändigen Diagramme zum Flutpunkt und Druckverlust mit dem PC-Rechner erstellt, um die Streuung der Messdaten aufzuzeigen.

Meine Frau Nathalie hat die erste Fassung geschrieben und die Korrektur der Arbeit sowohl bei der ersten als auch bei der zweiten Auflage übernommen, wofür ich mich bedanke.

Ich möchte an dieser Stelle meiner Familie für Ihre Geduld herzlich danken, sowie allen denen, die hier nicht erwähnt sind.

Frühjahr 2003

Jerzy Maćkowiak

Inhaltsverzeichnis

Teil 1

Grundlagen der Auslegung von Packungskolonnen für Gas/Flüssigkeitssysteme

Symbolverzeichnis zu Teil 1	3
1 Einleitung	11
1.1 Allgemeines über Füllkörperkolonnen	11
1.2 Anmerkungen zur Entwicklung von Packungskolonnen und ihre Bedeutung beim Einsatz bei der Rektifikation und Absorption	14
1.3 Kurzer Überblick über erschienene Monographien bzw. komplexe Übersichtsarbeiten zur Auslegung von Füllkörperkolonnen	17
1.4 Schlussbetrachtungen zu Kapitel 1	21
2 Zweiphasendurchfluss und Belastungsbereich	25
2.1 Beschreibung der hydraulischen Vorgänge in Füllkörperkolonnen	25
2.2 Flutgrenze	28
2.2.1 Flutmechanismen	28
2.2.2 Überlegungen zur Tropfenbildung in Füllkörperkolonnen	30
2.2.3 Literaturüberblick – Stand des Wissens	34
2.2.4 Eigener Ansatz zur Bestimmung der Dampfgeschwindigkeit $u_{v,Fl}$ am Flutpunkt	41
2.3 Bestimmung des Kolonnendurchmessers	90
2.4 Untere Belastungsgrenze	90
2.4.1 Schlussbetrachtungen zu Kapitel 2.4	93
3 Druckverlust von unberieselten Packungskolonnen	115
3.1 Einführung	115
3.2 Widerstandsgesetz für die Einphasenströmung in Packungskolonnen	115
3.2.1 Ermittlung des Widerstandsbeiwertes ψ für Pallringe	119
3.2.2 Ermittlung des Widerstandsbeiwertes ψ für andere untersuchte Füllkörperschüttungen	123
3.2.3 Ermittlung des Widerstandsbeiwertes ψ für strukturierte Packungen	124
3.3 Schlussbetrachtungen zu Kapitel 3	133

4 Druckverlust von berieselten Schüttungen und strukturierten Packungen	157
4.1 Einführung und Literaturüberblick	157
4.1.1 Bedeutung des Druckverlustes für die Auslegung von Füllkörperkolonnen	157
4.1.2 Literaturüberblick	158
4.2 Flüssigkeitsinhalt	165
4.2.1 Grundbegriffe	166
4.2.2 Der statische Flüssigkeitsinhalt	166
4.2.3 Der dynamische Flüssigkeitsinhalt im Strömungsbereich unterhalb der Staugrenze	167
4.2.4 Diskussion des Einflusses verschiedener Parameter auf den Flüssigkeitsinhalt basierend auf Literaturdaten	170
4.2.5 Messmethode, untersuchte Systeme und Füllkörper	171
4.2.6 Messergebnisse	172
4.2.7 Schlussbetrachtungen zu Kapitel 4.2	186
4.3 Ansatz zur Bestimmung des Druckverlustes von berieselten Schüttungen und strukturierten Packungen bei Kenntnis des Widerstandsbeiwertes ψ für Einphasenströmung und des dimensionslosen Druckverlustes $\Delta p/\Delta p_0$	188
4.3.1 Herleitung des Ansatzes	188
4.3.2 Vergleich der Messwerte mit dem Experiment im Bereich der laminaren Flüssigkeitsströmung	191
4.3.3 Bestimmung der Größe C_B für turbulente Flüssigkeitsströmung	192
4.3.4 Vergleich zwischen Rechnung und Experiment für turbulente Flüssigkeitsströmung	195
4.3.5 Schlussfolgerungen zu Kapitel 4.3	209
5 Druckverlust von berieselten Schüttungen und strukturierten Packungen bei Kenntnis des Widerstandsgesetzes für die Zweiphasenströmung	231
5.1 Einleitung	231
5.2 Herleitung des Ansatzes zur Bestimmung des Druckverlustes von berieselten Schüttungen und strukturierten Packungen	231
5.3 Das Widerstandsgesetz $\psi_{VL} = f(\text{Re}_L)$ bei vorliegender Zweiphasenströmung in Packungskolonnen-Ableitung des Ansatzes	232
5.4 Herleitung der Berechnungsgleichung für den Druckverlust berieselter Schüttungen	233
5.5 Vergleich der Messwerte mit dem Experiment im gesamten Betriebsbereich von Packungskolonnen	234
5.6 Bewertung der Ergebnisse	248

6 Fluidodynamik von Packungskolonnen für Gas/Flüssigkeitssysteme – Zusammenfassung der Ergebnisse 263

6.1 Allgemeines 263

6.2 Flutpunktbestimmung 267

6.3 Flüssigkeitsinhalt am Flutpunkt 269

6.4 Druckverlust und Flüssigkeitsinhalt 270

6.4.1 Druckverlust unterhalb der Staugrenze 271

6.4.2 Flüssigkeitsinhalt unterhalb der Staugrenze 271

6.4.3 Druckverlust und Flüssigkeitsinhalt im Bereich zwischen der Stau- und Flutgrenze 273

6.4.4 Druckverlust am Flutpunkt 273

6.5 Druckverlustberechnung nach dem Ansatz gemäß Kapitel 5 274

6.6 Hinweise zu den Tabellen mit den technischen Daten der Füllkörper und Packungen sowie den Modellparametern $\psi_{Fl}/\psi_{Fl,m}$ zur Flutpunkt- und Druckverlustbestimmung 275

6.7 Gültigkeitsbereich der aufgestellten Beziehungen 276

6.8 Programm FDPK zur fluidodynamischen Auslegung von Kolonnen mit modernen Füllkörpern und Packungen 277

6.8.1 Programmerklärung 277

6.8.2 Schlussfolgerungen 279

**Teil 2
Grundlagen der Auslegung von Packungskolonnen für Flüssig/Flüssig-Systeme**

Symbolverzeichnis zu Teil 2 299

7 Grundlagen der Auslegung von Packungskolonnen für Flüssig/Flüssig-Systeme 301

7.1 Einleitung 301

7.2 Zweiphasendurchfluss und Belastungsbereiche 303

7.2.1 Dispersphasenanteil (Hold-up) in Füllkörperkolonnen mit regellosen Schüttungen und strukturierten Packungen 304

7.2.2 Tropfendurchmesser 309

7.3 Flutpunktbestimmung 312

7.3.1 Einleitung 312

7.3.2 Steig- und Sinkgeschwindigkeit von Tropfen in Packungen – eigener Ansatz 315

7.3.3 Modifiziertes Flutpunkt-Diagramm [15] 318

7.3.4 Ansatz zur Bestimmung der Flutpunktgeschwindigkeit für Flüssig/Flüssig-Systeme 320

7.4 Schlussbetrachtungen 323

Sachverzeichnis 335