

Bewertung von mikrostrukturierten Trennapparaten für den Einsatz in modularen Chemiefabriken

Dissertation

zur

Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

der

Fakultät für Maschinenbau

der Ruhr-Universität Bochum

von

Benedikt Dercks

aus Iserlohn

Bochum 2015

Dissertation eingereicht am 26.05.2015

Tag der mündlichen Prüfung 29.06.2015

Erster Referent: Prof. Dr.-Ing Marcus Grünewald

Zweiter Referent: Prof. Dr.-Ing. Marcus Petermann

Berichte aus der Verfahrenstechnik

Benedikt Dercks

**Bewertung von mikrostrukturierten Trennapparaten
für den Einsatz in modularen Chemiefabriken**

Shaker Verlag
Aachen 2015

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3882-8

ISSN 0945-1021

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik an der Ruhr-Universität Bochum.

Mein Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Marcus Grünewald für das Vertrauen in meine Fähigkeiten, die Stöße in die richtige Richtung und die vielen Gespräche und Diskussionen privater und technischer Art. Ebenso danke ich Prof. Dr.-Ing. Marcus Petermann für die Übernahme des Koreferats und Prof. Dr.-Ing. Hermann Josef Wagner für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Zu den Ergebnissen und dem Gelingen der Arbeit haben natürlich auch die Studien-, Diplom- und Bachelorarbeiter beigetragen, denen ich an dieser Stelle aufs Herzlichste danken möchte. Auch an meinen Bürokollegen Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Stefan Lier geht ein großer Dank für die schöne Zeit und die Lehrstunden in Wirtschaftswissenschaften und Lebensplanung.

Ein ganz besonders Großer Dank geht an meine Eltern Annelie und Heiner dafür, dass sie mir das nötige Selbstvertrauen und das entsprechende Durchhaltevermögen mit auf den Weg gegeben haben, um diese Aufgabe zu meistern.

Ich werde die Zeit der Promotion immer als einen glücklichen und sehr wertvollen Abschnitt meines Lebens betrachten und sollte ich danach gefragt werden, antworte ich sicherlich: „Es war wie folgt...“. Allen Freunden die in dieser Geschichte vorkommen danke ich von ganzem Herzen, ganz besonders meinem Lieblingsmenschen.

Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit ist es, die in der Literatur beschriebenen mikrostrukturierten Trennapparate auf ihre Einsatzmöglichkeiten in der chemischen Produktion hin zu untersuchen, um Potentiale und noch ungelöste Fragestellungen aufzuzeigen. Bei der Arbeit in diesem Themengebiet zeigt sich schnell, dass mikrostrukturierte Apparate besonders in dem Konzept der modularen Chemiefabrik, die eine Möglichkeit ist um zukünftigen Produktionsherausforderungen zu begegnen, Vorteile besitzen. Deshalb erfolgt die Definition der Bewertungskriterien auf Grundlage der derzeit vorherrschenden Idee einer modularen Chemiefabrik.

In einer umfassenden Analyse werden zunächst die Idee der modularen Produktion und anschließend mikrostrukturierte bzw. weitere intensivierte Apparatekonzepten vorgestellt, die in dieser Produktionsumgebung zum Einsatz kommen können. Aus den vorgestellten mikrostrukturierten Optionen werden zwei Apparateklassen mit Hilfe eines mathematischen Modells abgebildet, um weiterführende Analysen der Konzepte bei Destillations- bzw. Absorptionsanwendungen zu ermöglichen. Zur Abschätzung des Potentials werden die Apparate an Beispiel-Trennaufgaben mit den anderen intensivierten Konzepten verglichen. Darüber hinaus erfolgt eine Abschätzung des möglichen Potentials in einer modularen Fabrik unter Berücksichtigung der Scale-Up-Methode. Neben dem Potential sind für eine umfassende Bewertung die Risiken der neuen Konzepte entscheidend, deshalb werden die Auswirkungen von typischen, in der Mikroverfahrenstechnik diskutierten Problemen, wie Flüssigkeits- oder Temperaturfehlverteilung analysiert.

Auf Grundlage der generierten Ergebnisse erfolgt eine abschließende Bewertung der Eignung der beiden untersuchten Apparatekonzepte für den Einsatz in einer modularen Produktionsumgebung. Insbesondere offene Fragestellungen und mögliche Lösungen werden dabei diskutiert.

The research leading to these results has received funding from the European Community's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) under grant agreement n° 228867.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ziel und Aufbau der Arbeit	8
2	Stand der Technik.....	10
2.1	Modulare chemische Fabriken	10
2.2	Die Mikroverfahrenstechnik	14
2.3	Mikrostrukturierte Trennapparate	19
2.3.1	Gravitationsgetriebene Apparate (Fallfilm-Apparat)	20
2.3.2	Apparate mit geförderten, parallelen Phasen (Mikro-Wärmerohr)	23
2.3.3	Apparate mit geförderten Phasen und stabilisierter Phasengrenze (Mikrosieb-Kontaktor)	28
2.3.4	Durchsatzsteigerung in mikrostrukturierten Apparaten	33
2.4	Nicht mikrostrukturierte Trennapparate	40
2.4.1	Kolonnen	41
2.4.2	Hohlfasermodule	43
2.4.3	Rotated packed bed.....	44
2.5	Ansätze zur Steigerung des Stofftransportes	45
2.6	Fazit zum Stand der Technik.....	51
3	Theoretische Grundlagen.....	52
3.1	Modelle zur Beschreibung mikrostrukturierter Phänomene	52
3.2	Modelle zur Beschreibung der Trennleistung	67
4	Modellierung und Auslegung von mikrostrukturierten Gas-Flüssig- Kontaktapparaten.....	71
4.1	Modellierung des Mikrosieb-Kontaktors	71
4.1.1	Modellansatz.....	73
4.1.2	Verschaltung von Mikrosieb-Kontaktoren zu einer Destillationskolonne	75
4.1.3	Verwendete Stoffdatensätze	79
4.1.4	Modellparameter.....	80
4.2	Modellierung des Mikro-Wärmerohrs	83
4.2.1	Modellansatz.....	84
4.2.2	Verschaltung des Mikro-Wärmerohrs zu einer Destillationskolonne	88

4.2.3	Verwendete Stoffdatensätze	89
4.2.4	Modellparameter.....	91
4.3	Vergleich der Auslegungsmethoden von Packungskolonnen und modularen Apparaten	92
4.3.1	Auslegung einer Packungskolonne.....	92
4.3.2	Auslegung eines mikrostrukturierten Apparates	94
5	Anwendungsgebiet Absorption.....	101
5.1	Validierung des Apparatemodells	101
5.1.1	Chemisorption von Kohlendioxid in Natronlauge	102
5.1.2	Desorption von Toluol aus Wasser.....	106
5.1.3	Fazit der Validierung	110
5.2	Potentialanalyse für die Absorption in intensivierten Apparaten.....	111
5.3	Potentialprognose für die Absorption mit mikrostrukturierten Apparaten im Produktionsmaßstab	115
5.3.1	Limitierungen bei der Durchsatzsteigerung	115
5.3.2	Auswirkungen der verschiedenen Methoden zur Durchsatzsteigerung auf die Effizienz.....	116
5.4	Fazit.....	119
6	Anwendungsgebiet Destillation	120
6.1	Validierung der Apparatemodelle	120
6.1.1	Der Mikrosieb-Kontaktor	121
6.1.2	Das mikrostrukturierte Wärmerohr	124
6.1.3	Fazit der Validierung	128
6.2	Potentialanalyse für die Destillation in mikrostrukturierten Apparaten.....	129
6.3	Potentialprognose für die Destillation in mikrostrukturierten Apparaten im Produktionsmaßstab	133
6.3.1	Limitierungen bei der Steigerung des Durchsatzes	133
6.3.2	Auswirkungen der verschiedenen Methoden zur Durchsatzsteigerung auf die Effizienz.....	134
6.4	Fazit.....	138
7	Bewertung von Mikro-Trennapparaten für den Einsatz in modularen Produktionskonzepten.....	139
7.1	Auswirkung von Fehlverteilungen	139
7.1.1	Auswirkung der von Verteilern verursachten Fehlverteilung	140
7.1.2	Auswirkung der Fehlverteilung durch Verunreinigungen.....	142

7.2	Auswirkungen von Temperaturgradienten	144
7.2.1	Zusätzliche Temperierung	145
7.2.2	Veränderte Siebstruktur	147
7.3	Vorteile von mikrostrukturierten Trennapparaten in modularen Produktionskonzepten	148
7.4	Bewertung des Mikrosieb-Kontaktors als Trennapparat in modularen Produktionskonzepten	150
7.5	Bewertung des mikrostrukturierten Wärmerohrs als Trennapparat in modularen Produktionskonzepten	152
7.6	Fazit	152
8	Fazit und Ausblick	154
8.1	Fazit	154
8.2	Ausblick	156
9	Literaturverzeichnis	159

Anhang

Lebenslauf