

# Verfahrenstechnik

Corinna Hecht

## **Experimentelle Untersuchungen zum Einsatz neuartig strukturierter Einbauten in Blasensäulen- und Rieselphasenreaktoren**

**SHAKER  
VERLAG**

# Experimentelle Untersuchungen zum Einsatz neuartig strukturierter Einbauten in Blasensäulen- und Rieselphasenreaktoren

Dissertation  
zur  
Erlangung des Grades  
Doktor-Ingenieurin  
  
der  
Fakultät für Maschinenbau  
der Ruhr-Universität Bochum

von

Corinna Hecht

aus Hagen

Bochum 2017

Dissertation eingereicht am: 06.03.2017

Tag der mündlichen Prüfung: 20.07.2017

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Marcus Grünewald

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Michael Schlüter

Berichte aus der Verfahrenstechnik

**Corinna Hecht**

**Experimentelle Untersuchungen zum Einsatz  
neuartig strukturierter Einbauten in Blasensäulen-  
und Rieselphasenreaktoren**

Shaker Verlag  
Aachen 2018

**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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6023-2

ISSN 0945-1021

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen  
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Marcus Grünewald für die interessante und herausfordernde Themenstellung. Er hat durch seine Bereitschaft zur Diskussion und der außerordentlich guten Zusammenarbeit nicht nur zu meiner wissenschaftlichen sondern auch persönlichen Entwicklung beigetragen.

Ich möchte mich auch sehr bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Schlüter für die Übernahme des Korreferats und für die Möglichkeit eines Gastaufenthaltes am Institut für Mehrphasenströmung bedanken. Ich habe in Hamburg eine sehr schöne und lehrreiche Zeit gehabt und konnte viele neue wissenschaftliche Reize aufnehmen.

Mein Dank gilt ebenfalls meinen Arbeitskollegen an der RUB für eine unvergessliche Zeit, die guten Diskussionen und fantastische Stimmung. Besonders den Kollegen im Bereich Blasensäulen (Linda Schlusemann, Nils Abel und Katharina Lesniak) danke ich für die guten fachlichen, aber auch persönlichen Gespräche.

Für die liebevolle und herzliche Aufnahme als Gastwissenschaftlerin möchte ich mich bei den Kollegen der TU Hamburg-Harburg bedanken.

Bei meinen Bürokolleginnen (Ana Radnjanski, Johanna Pfaff, Carolin Stegehake und Andrea Niederhagemann) bedanke ich mich für eure gute Stimmung und dem stets offenem Ohr. Ihr habt meine Arbeitstage bereichert.

Den Mitarbeitern der Fakultätswerkstatt Maschinenbau danke ich für die brillante und prompte Umsetzung meiner Ideen.

Ein großen Dank an alle Studenten, die mit ihrem Engagement zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Ich bedanke mich bei Ann-Kathrin Prange für die gute Zusammenarbeit und ihr stets hohes Engagement als wissenschaftliche Hilfskraft.

Meine Freunde haben mich immer unterstützt und stets motiviert. Daher gehört auch euch mein aufrichtiger Dank.

Am Schluss gilt mein größter Dank meiner Familie, die mich immer unterstützt, motiviert und gefördert hat. Die stets an mich geglaubt haben und jeden meiner Schritte liebevoll begleiten.



# Inhaltsverzeichnis

## Experimentelle Untersuchungen zum Einsatz neuartig strukturierter Einbauten in Blasensäulen- und Rieselphasenreaktoren

Inhaltsverzeichnis .....	I
Abkürzungsverzeichnis .....	III
Abbildungsverzeichnis .....	IV
Tabellenverzeichnis .....	XI
Symbolverzeichnis .....	XII
1 Einleitung .....	1
2 Strukturierungskonzepte in Rieselströmungs- und Blasensäulenreaktoren .....	7
2.1 Vertikale Strukturierung in mehrphasigen Reaktoren .....	7
2.1.1 Leitbleche und Schlaufenreaktoren .....	8
2.1.2 Packungen und Drahtgestricke .....	13
2.1.3 Monolith .....	19
2.2 Horizontale Strukturierung in mehrphasigen Reaktoren .....	23
2.2.1 Siebböden .....	23
2.2.2 Wiederverteiler .....	25
2.3 Mikro- und Millistrukturierung .....	27
2.4 Zeitliche Strukturierung .....	31
2.5 Schwammkeramiken als Strukturierungen .....	33
2.6 Periodisch offen-zellige Strukturen .....	39
2.7 Fazit zu den bekannten Strukturierungskonzepten .....	41
3 Untersuchung zu strukturierten Rieselströmungsreaktoren .....	45
3.1 Eigenschaften der verwendeten Schwammstrukturen .....	51
3.1.1 Herstellungsverfahren .....	51
3.1.2 Morphologie der eingesetzten Schwämme .....	51
3.2 Experimenteller Aufbau .....	55
3.3 Hydrodynamische Charakterisierung .....	59
3.3.1 Experimentelle Vorgehensweise .....	59
3.3.2 Bestimmung des statischen Holdups .....	65

---

3.3.3	Ermittlung des dynamischen Holdups .....	69
3.3.4	Ermittlung der radialen Holdup Profile .....	71
3.3.5	Verteilung über den Reaktorquerschnitt .....	77
3.3.6	Clustering des Holdupverhaltens einzelner Kanäle.....	85
3.4	Wiederverteilungskonzepte zur Erhaltung der Phasenverteilung über die Reaktorlänge.....	91
3.5	Schlussfolgerungen zum Potential von Schwammstrukturen als alternativer Katalysatorsupport in Rieselbettreaktoren .....	95
4	Untersuchungen zu strukturierten Blasensäulenreaktoren .....	97
4.1	Eigenschaften der verwendeten POCS.....	101
4.1.1	Morphologie der eingesetzten POCS.....	101
4.1.2	Freier Blasenauftstieg.....	103
4.2	Experimenteller Aufbau.....	107
4.2.1	Stoffsysteme .....	109
4.2.2	Gasverteiler in Blasensäulen .....	109
4.3	Hydrodynamische Charakterisierung .....	113
4.3.1	Experimentelle Vorgehensweise .....	113
4.3.2	Bestimmung des integralen Gasgehaltes .....	127
4.3.3	Radialer Gasgehalt .....	134
4.3.4	Blasengröße .....	141
4.3.5	Stofftransport .....	145
4.3.6	Einfluss von POCS auf die Flüssigkeitsströmung.....	149
4.4	Schlussfolgerungen zum Potential von POCS als Strukturierungsmethode in Blasensäulenreaktoren .....	153
5	Schlussteil.....	155
5.1	Fazit.....	155
5.2	Anschließende Forschungsfragen .....	156
6	Literaturverzeichnis .....	159

Lebenslauf

---

## Abkürzungsverzeichnis

$\alpha$ -MS	Alphamethylstyrol
BET	Brunauer, Emmett, Teller
CCFS	Closed cross flow structure
CFD	Computational fluid dynamics
CPSI	Cells per square inch (Zellen pro Quadratinch)
CT	Computertomografie
EGLY	Ethylenglykol
GLG	Gasleerrohrgeschwindigkeit
GVP	Gewebeverbundplatte
HZDR	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf
MRT	Magnet Resonanz Tomografie
NMR	Nuclear Magnetic Resonance (Kernspinresonanzspektroskopie)
OCFS	Open cross flow structure
PET	Positronen-Emissions-Tomographie
POCS	Periodic open cell structure (Periodisch offen-zellige Struktur)
PPI	Pores per Inch (Zellen pro Inch)
RCT	Röntgentomographie
SiSiC	Siliciuminfiltriertes Siliciumcarbit
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
WMS	Wire mesh sensor (Gittersensor)



## Symbolverzeichnis

$a$	Phasengrenzfläche	$m^2$
$A_{Blase}$	Blasenoberfläche	$m^2$
A, B, C	Faktoren der Verteilungsbewertung	-
$\beta_{L,a}, k_{L,a}$	Stofftransportkoeffizient	1/s
$c$	Konzentration	$kmol/m^3$
$c^*$	Sättigungskonzentration	$kmol/m^3$
$d_{Blase}$	Blasendurchmesser	m
$d_{B,max}$	Maximaler Blasendurchmesser	m
$d_{Fenster}$	Fensterdurchmesser	m
$d_p$	Partikeldurchmesser	m
$d_L$	Lochdurchmesser	m
$d_h$	Hydraulischer Durchmesser	m
$d_{Steg}$	Stegdurchmesser	m
$d_{Sprüh}$	Abstand der Sprühdüse zur Struktur	m
$d_{S32}$	Sauterdurchmesser	m
$d_W$	Strukturdurchmesser beim 3D-Druck	m
$d_R$	Reaktordurchmesser	m
$d_L$	Lochdurchmesser	mm
$d_N$	Nozzeldurchmesser	m, mm
$D_0$	Verteilungsqualität nach Moore und Rukovena	%
$D_i$	Liquid Distribution Factor	-
$\Delta p / \Delta L$	Druckverlust	bar/m
$E(t)$	Verweilzeitdichtefunktion	s
$\varepsilon_G$	Gasgehalt	-
$\varepsilon_L$	Flüssigkeitsgehalt	-
$\varepsilon_{L,x}$	Lokaler Flüssigkeitsgehalt an der Stelle x	-
$\varepsilon_0$	Offene Porosität eines Schwammes	-
$\varepsilon_S$	Feststoffanteil	-
$F_A$	Auftriebskraft	N
$F_1$	Fehler	-
$g$	Erdbeschleunigung	$m/s^2$
$G$	Gini-Koeffizient	-
$H$	Höhe	m
$H_0$	Unbegaste Höhe	m
$H_G$	Begaste Höhe	m

---

$\frac{H}{d_R}$	Höhen-zu-Durchmesser-Verhältnis	-
$M_f$	Maldistributionsfaktor	-
$\nu$	Kinematische Viskosität	m <sup>2</sup> /s
$n$	Zählwert	-
$N_p$	Anzahl der Messstellen	-
$N_L$	Anzahl an Löchern im Lochboden	-
$\eta$	Dynamische Viskosität	Pas
OA	Offene Fläche	%
$p$	Druck	bar
$\psi$	Porosität	-
$\pi$	Kreiszahl	-
$\rho$	Dichte	kg/m <sup>3</sup>
$r_1$	Radius	m
$r_2$	Radius	m
$r/R$	Radiale Position	-
$\sigma$	Oberflächenspannung	N/m
$S_M$	Verteilungsfaktor	-
$S_V$	Spezifische Oberfläche	m <sup>2</sup>
$t$	Zeit	s
$u_{Blase}$	Blasenaufstiegsgeschwindigkeit	m/s
$u_L$	Flüssigkeitsgeschwindigkeit	m/s
$u_G$	Gasleerrohrgeschwindigkeit	m/s
$V\%$	Volumenanteil	%
$V_L$	Flüssigkeitsvolumen	m <sup>3</sup>
$V_R$	Reaktorvolumen	m <sup>3</sup>
$x_i$	Lokaler Messwert	-

#### Dimensionslose Kennzahlen

$Fr^*$	Froudezahl
Re	Reynoldszahl
Sh	Sherwoodzahl
We	Weberzahl