

Felix van Holt

Optimierung und Erweiterung der  
Auslegung gepackter Kolonnen unter  
Berücksichtigung der Phasenverteilung

Optimierung und Erweiterung der Auslegung gepackter Kolonnen unter Berücksichtigung der  
Phasenverteilung

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

von

M. Sc. Felix van Holt

aus Duisburg

Bochum 2020

Dissertation eingereicht am: 04.03.2020

Tag der mündlichen Prüfung: 15.06.2020

Vorsitzender: Professor Dr.-Ing. V. Scherer

Erstgutachter: Professor Dr.-Ing. M. Grünwald

Zweitgutachter: Professor Dr.-Ing. G. Deerberg

Berichte aus der Verfahrenstechnik

**Felix van Holt**

**Optimierung und Erweiterung der Auslegung  
gepackter Kolonnen unter Berücksichtigung  
der Phasenverteilung**

Shaker Verlag  
Düren 2020

**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., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7722-3

ISSN 0945-1021

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Danksagung**

Großen Dank möchte ich Marcus Grünewald für die Bereitstellung des Themas und die langjährige fachliche sowie menschliche und kollegiale Unterstützung aussprechen. Unsere Gespräche haben mich stets fachlich und persönlich weiterentwickelt. Danke Marcus! Weiterhin danke ich Professor Görge Deerberg für die Übernahme des Zweitgutachtens, welches er in seiner Art sehr konstruktiv und freundlich gestaltet hat. Außerdem möchte ich Professor Michael Schultes danken für zahlreiche fachliche Gespräche auf Konferenzen, Projekttreffen und nicht zuletzt gemeinsamen Mittagspausen an der Ruhr-Universität Bochum.

Meinen ehemaligen Arbeitskollegen möchte ich durch die Bank danken. Wir haben die Zeit gemeinsam als Lehrstuhl stets in einer Art und Weise gestaltet, sodass wir füreinander da waren und aufeinander geachtet haben. Dabei sind zahlreiche Veranstaltungen wie das Kickerturnier, der Schockverein, die Laufgemeinschaft etc. entstanden, welche mich noch heute mit tiefer Freude erfüllen. Besonderen Dank möchte ich meinem Büropartner und engem Freund Mark Hapke aussprechen. Ich bin überaus glücklich im erwachsenen Alter noch so einen guten Freund gefunden zu haben. Das ist etwas Besonderes. Weiterhin möchte ich Philip Biessey besonders danken, du hast mir mit deiner Person eine unfassbare fachliche und menschliche Unterstützung gegeben, welche großen Anteil an dieser Promotion besitzt. Außerdem danke ich in zufälliger Reihenfolge: Johanna Pfaff, den Balkangirls, Benedikt Dercks, Stephan Müller, Stefan Lier, Anna Katharina Lesniak, Nils Abel, Carolin Stegehake, Corinna Hecht, Iris Rieth, Jost Brinkmann, Dominik Plate, Julia Riese, Julian Rutecki, Laura Sengen, Esther Cremer-Buraja, Tim Dettmer, Andrea Niederhagemann, Harun Alemyar, Wibke Leushacke, meinen zahlreichen Hiwis, Studenten und allen die ich vergessen habe.

Weiterhin danke ich meinen boyer Jungs, das war eine Jugend, die verbindet: Steffen Schmidt, Matthias Woort, Hannes Ten Eikelder, Tobias Kroll, Mats Kubiak und Andre Schmidt.

Einen großen Dank widme ich meiner Familie plus Anhang, welche mich stets unterstützt hat, auch wenn Sie nie verstanden hat, was ich eigentlich untersuche. Jenny, Flo und Jan, wir sind zusammen aufgewachsen und werden immer über unsere Kindheit verbunden sein. Ich hoffe, dass wir immer auf uns vertrauen können. Meinen Eltern Gudrun und Peter van Holt möchte ich besonders danken. Vier Kinder großzuziehen ist ein Lebenswerk und das wir alle die Möglichkeit erhalten haben zur Universität gehen zu können ist eine große Leistung von euch!!! Ich hoffe ihr seid stolz.

Einen weiteren Dank widme ich meiner Schwiegerfamilie den „Clever-Schmitzens“. Ich habe bezüglich Kommunikation viel gelernt und weiß euren Zusammenhalt zu schätzen! Danke für die Unterstützung Mechthild, Hannah, Kai und nicht zuletzt auch an Hans Ernst Schmitz. Du warst eine beeindruckende und inspirierende Person Hans!

Meinem Sohn Wim danke ich, dass er mir jeden Tag zeigt was wirklich im Leben zählt. Rike, jetzt bleibst nur noch du über. Ich liebe dich und eigentlich müsstest du in meinem Lebenslauf mit aufgeführt werden am 28. August 2006. Danke für alles, du komplementierst mich und hilfst mir im Alltag da, wo ein Doktor dann an den alltäglichen Sachen scheitert...



## Lebenslauf des Autors

- Seit 11/2020 **Max-Born-Berufskolleg, Recklinghausen**  
Studienrat für Maschinenbau- und Versorgungstechnik
- 11/2018 – 11/2020 **Max-Born-Berufskolleg, Recklinghausen**  
Berufsbegleitende Ausbildung von Seiteneinsteigern zur Lehrkraft mit der Fachrichtung Maschinenbautechnik
- 10/2014 - 04/2018 **Ruhr-Universität, Bochum**  
Promotion im Bereich Verfahrenstechnik zum Doktor der Ingenieurwissenschaften am Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik
- 10/2012 - 10/2014 **Ruhr-Universität, Bochum**  
Studium von “*Umwelttechnik und Ressourcenmanagement*”  
Abschluss als Master of Science
- 10/2009 - 10/2012 **Ruhr-Universität, Bochum**  
Studium von “Umwelttechnik und Ressourcenmanagement”  
Abschluss als Bachelor of Science
- 08/1998 - 07/2008 **Riesener-Gymnasium, Gladbeck**  
Erwerb der allgemeinen Hochschulreife
- 08/1994 - 07/1998 **Fürstenbergschule, Bottrop**  
Besuch der Primarstufe
- 01.09.1987 **Geburt in Duisburg**



## **Kurzfassung**

Gepackte Kolonnen nehmen eine Schlüsselrolle in der chemisch produzierenden Industrie ein. Zur Auslegung dieser Kolonnen werden Referenzdaten verwendet, welche meist aus Experimenten in einem deutlich geringeren Technikumsmaßstab stammen. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Einflüsse der Technikumsmessungen in Bezug auf Messaufbau und Messdurchführung besprochen. Ziel ist ein Beitrag zur gleichmäßigen Messwertaufnahme im Bereich gepackter Absorptionskolonnen, welche die Grundlage für weitere Messaufnahmen wie die der Phasenverteilung ist.

Die Phasenverteilung im Querschnitt der Kolonne stellt dabei eine Schlüsselkomponente zu einem besseren Verständnis der Auslegung gepackter Kolonnen dar. Zwar sind die einzelnen physikalischen Phänomene in einer Absorptionskolonne hinreichend bekannt, um die Überlagerung und das Zusammenspiel zu verstehen und zu berücksichtigen, muss jedoch die Kenntnis der Phasenverteilung vorliegen.

Die vorliegende Arbeit bestätigt die sinnvolle Anwendung von sogenannten Zwei-Kolonnen-Modellen sowie für die gängigen Auslegungsstrategien für gepackte Kolonnen zur Beschreibung der Trennwirksamkeit unter Berücksichtigung der Phasenverteilung im Querschnitt. Hierzu muss die Ausprägung der Phasenverteilung jedoch bekannt sein, wobei dies zumeist nur für den sogenannten Gleichgewichtsfall zutrifft, welcher den Zustand der Verteilung beschreibt, der sich nach einer gewissen Lauflänge der Phasen konstant einstellt. Bis zum Gleichgewichtszustand treten Einlaufeffekte auf. Es wird gezeigt, dass die Modellstruktur des Zwei-Kolonnen-Modells auch mit diversen Erweiterungen nicht in der Lage ist, diesen Effekt abbilden zu können.

Daher wird ein strukturell neuartiges Zellenmodell entwickelt, dessen Vorteile in einer klaren Unterscheidung zwischen Wand- und Kernbereich, der Berücksichtigung lokaler Strömungsbedingungen, einem lokalen Betriebsverhalten und dimensionsunabhängigen Anpassungsparametern liegen. Die Ergebnisse des Modells zeigen Vorteile in der Beschreibung der Verteilung über die axiale Kolonnenhöhe, des Wandbereiches und in der Extrapolation im Kolonnendurchmesser sowie der Kolonnenhöhe.

Zur experimentellen Charakterisierung von Einbauten wird die Gittersensormesstechnik für den Einsatz in gepackten Kolonnen mit flüssigdisperser Phase angewendet und validiert. Eckpfeiler bilden die Bestimmung des Wandvolumenstromes, der radialen Verteilungseigenschaft eines Spurstoffes im Wand- und Kernbereich, sowie die zeitliche Strömungscharakteristik der flüssigen Phase. Das Modell bietet eine gute Basis zur Erweiterung von Stofftransporteffekten.

**Schlagwörter:** Absorption, Füllkörper, Gittersensor, Phasenverteilung, Zellenmodell



# Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung</b> .....	<b>i</b>
<b>Lebenslauf des Autors</b> .....	<b>ii</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>iii</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>iv</b>
<b>Verzeichnisse</b> .....	<b>v</b>
<b>1 Einführung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	1
1.2 Ableitung der Forschungsfragen .....	2
<b>2 Standardisierung der experimentellen Charakterisierung von Packungen und Füllkörpern</b> .....	<b>7</b>
2.1 Stand des Wissens .....	7
2.2 Experimentelle Versuchsdurchführung .....	9
2.3 Experimentelle Bestimmung der spezifischen hydrodynamischen Kenngrößen .....	11
2.3.1 Untersuchung der Zu- und Ablaufregelung bei der Aufnahme des Flüssigkeitsinhaltes mittels volumetrischen Ausliterns.....	12
2.3.2 Untersuchung der optischen Ablesung des Sumpfstandes bei der Aufnahme des Flüssigkeitsinhaltes mittels volumetrischen Ausliterns .....	14
2.4 Experimentelle Bestimmung der spezifischen Kenngrößen bezüglich der Trennwirksamkeit.....	16
2.4.1 Auswirkung des Konzentrationsbereiches und der Vorbenetzung bei der experimentellen Bestimmung der Trenneffizienz .....	16
<b>3 Erweiterung der konventionellen Methodik durch Berücksichtigung der Maldistribution der Phasen</b> .....	<b>19</b>
3.1 Stand des Wissens .....	19
3.2 Arbeitshypothese .....	21
3.3 Modellbildung .....	22
3.4 Experimentelle Arbeit .....	26
3.4.1 Versuchsaufbau .....	26
3.4.2 Versuchsdurchführung .....	29
3.5 Ergebnisse.....	30
3.5.1 Randgängigkeit einer Schüttung des <i>Pall Ring 50 Metall</i> .....	30
3.5.2 Lokale Trennwirksamkeit einer Schüttung des <i>Pall Ring 50 Metall</i> .....	31
3.5.3 Scale-up im Durchmesser mittels Zwei-Kolonnen-Modell bei variierenden Modelltiefen .....	35
3.6 Bewertung des Ansatzes der Zwei-Kolonnen-Modellierung .....	38
<b>4 Abbildung der Phasenverteilung in gepackten Kolonnen mithilfe eines neuartigen Zellenmodells</b> .....	<b>39</b>
4.1 Stand des Wissens .....	39

4.1.1	Phänomene und Mechanismen der Entstehung und Ausbildung von Fehlverteilungen der Phasen.....	39
4.1.2	Modellgestützte Abbildung der Phasenverteilung in gepackten Kolonnen .	50
4.2	Einsatz der Gittersensormesstechnik in gepackten Kolonnen.....	55
4.2.1	Einführung in die Gittersensormesstechnik.....	55
4.2.2	Experimentelle Versuchsdurchführung zum Einsatz der Gittersensormesstechnik.....	56
4.2.3	Auswertung der Gittersensordaten .....	58
4.2.4	Validierung der Gittersensormesstechnik in gepackten Gegenstromkolonnen mit flüssigdispenser Phase .....	59
4.3	Experimentelle Ergebnisse .....	68
4.3.1	Zeitliche Verteilung des Spurstoffes .....	68
4.3.2	Radiale Verteilungseigenschaften im Kernbereich .....	72
4.3.3	Radiale Verteilungseigenschaften im Wandbereich.....	75
4.3.4	Randgängigkeit der flüssigen Phase .....	77
4.4	Abbildung der Phasenverteilung .....	79
4.4.1	Modellbildung .....	79
4.4.2	Modellverifizierung.....	87
4.4.3	Modellvalidierung .....	95
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>109</b>
<b>6</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>113</b>
6.1	Daten zu Kapitel 3 für den Füllkörper <i>Pall Ring 50 Metall</i> .....	113
6.1.1	Experimentelle Daten Versuchsanlage ( $d_{K,i} = 288$ mm) bei einer Schüttungshöhe $H$ von 1 m.....	113
6.1.2	Experimentelle Daten Versuchsanlage ( $d_{K,i} = 288$ mm) bei einer Schüttungshöhe $H$ von 1,75 m.....	114
6.1.3	Experimentelle Daten der Versuchsanlage ( $d_{K,i} = 440$ mm) bei einer Schüttungshöhe $H$ von 1,00 m.....	114
6.1.4	Experimentelle Daten Versuchsanlage ( $d_{K,i} = 440$ mm) bei einer Schüttungshöhe $H$ von 1,75 m.....	115
6.1.5	Ergebnisse verschiedener methodischer Ansätze zur Vorhersage der Trennwirksamkeit auf einer Schüttungshöhe $H$ von 1,00 m für einen $d_{K,i} = 440$ mm .....	115
6.1.6	Modellierungsergebnisse auf einer Schüttungshöhe $H$ von 1,00 bis 1,75 m für einen $d_{K,i} = 440$ mm .....	116
6.2	Literatur .....	117

## Verzeichnisse

### Formelzeichen

$A$ / m <sup>2</sup>	Fläche
$a$ / m <sup>2</sup> ·m <sup>-3</sup>	spezifische Oberfläche trennwirksamer Einbauten
$B$ / m <sup>3</sup> ·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup>	Berieselungsdichte
$C$ / F	Elektrische Kapazität
$c$ / mol·m <sup>-3</sup>	Konzentration
$D$ / m	Verteilungskoeffizient
$d$ / m	Kolonndurchmesser
$F$ / Pa <sup>0,5</sup>	Gasfaktor
$H$ / m	Schüttungshöhe
$H_L$ / m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	Spezifischer Holdup
$h$ / m	Vertikale Koordinate
$I$ / A	Elektrische Stromstärke
$k$ / -	Verteilungskoeffizient
$L$ / m <sup>3</sup> ·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>	Lokale mittlere Flüssigkeitsgeschwindigkeit
$M$ /g·mol <sup>-1</sup>	Molare Masse
$n$ / -	Anzahl
$q$ / -	Verteilungsfaktor Zwei-Kolonnen-Modell
$R$ / V·A <sup>-1</sup>	Elektrischer Widerstand
$r$ / m	Radiale Koordinate
$t$ / s	Zeit
$U$ / V	Elektrische Spannung
$\dot{V}$ / m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Volumenstrom
$v$ / m·s <sup>-1</sup>	Geschwindigkeit

## Indizes

a	axial
bulk	Kernbereich
cell	Bezugsgröße: Zelle
down	axial abwärtsgerichtet
FK	Füllkörper
Fl	Flutpunkt
flux	Bezugsgröße: Phasenstrom
i	Zählvariable, allgemein
in	eintretend
K	Kolonne
L	Flüssigphase
out	austretend
packing	Bezugsgröße: einzelner Füllkörper
pot	potenziell
r	radial
r-	radial abnehmende Richtung
r+	radial zunehmende Richtung
side	Bezeichnung einer Seitenfläche
spez	spezifisch
St	Staupunkt
t	tangential
t+	tangential zunehmende Richtung
t-	tangential abnehmende Richtung
Tot	Total
v	Gasphase
wall	Wandbereich

### **Abkürzungsverzeichnis**

CFD	Computational Fluid Dynamics
HETP	Höhenäquivalent eines theoretischen Bodens
HTU	Höhe einer Übertragungseinheit
NTU	Anzahl der Übertragungseinheiten
Ppm	Parts per Million

### **Chemische Verbindungen**

CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
H <sub>2</sub> O	Wasser
NaCl	Natriumchlorid
NH <sub>3</sub>	Ammoniak

### **Griechische Symbole**

$\beta$	Stoffübergangparameter
$\Phi$	Schwerpunkt der Stoffmenge im radialen Querschnitt
$\tau$	Mittlere Verweilzeit
$\Psi$	Phasenschwerpunkt der abwärts gerichteten Strömung
$\sigma$	Standardabweichung
$\omega$	Anteil des Wandflusses