

Yan Lu

Erweiterter Betriebsbereich von Naturumlaufverdampfern durch Drahtgestrickeinbauten

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2022

Zugl.: (TU) Braunschweig, Univ., Diss., 2022

Herausgeber:

Stephan Scholl, Wolfgang Augustin

ICTV – Institut für Chemische und Thermische Verfahrenstechnik

Langer Kamp 7

38106 Braunschweig

Telefon + 49 (0)531 391 2781

Telefax + 49 (0)531 391 2792

icvt@tu-braunschweig.de

www.icvt.tu-bs.de

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2022

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2022

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier
aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISSN 1860-1316

ISBN 978-3-7369-7678-8

eISBN 978-3-7369-6678-9



Erweiterter Betriebsbereich von Naturumlaufverdampfern durch Drahtgestrickeinbauten

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

einer Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Yan Lu

geboren in: Zhejiang, China

eingereicht am: 13.01.2022

mündliche Prüfung am: 11.04.2022

Vorsitz: Jun.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Römer

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Stephan Scholl

Prof. Dr.-Ing. habil. Andrea Luke

2022





Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Chemische und Thermische Verfahrenstechnik der Technischen Universität Braunschweig. Die Bearbeitung dieses Themas wurde im Rahmen eines dreijährigen Promotionsstipendienprogramms der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert.

An dieser Stelle möchte ich meinen besonderen Dank an nachstehenden Personen entgegenbringen, ohne deren Mithilfe diese Dissertation niemals zustande gekommen wäre.

Mein Dank gilt zunächst Herrn Prof. Dr.-Ing. Stephan Scholl für seine Anregungen und Unterstützung bei der Durchführung der gesamten Arbeit. Unsere Gespräche waren für mich stets inspirierend und motivierend. Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Andrea Luke danke ich für ihr Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Koreferats. Des Weiteren geht mein Dank an Jun.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Römer für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Mein außergewöhnlicher Dank gilt Karl Siebeneck, der alle meine studentischen Arbeiten während des Masterstudiums betreut hat und mich zu meiner eigenen Promotion ermutigt hat. Bei der Arbeitsgruppe Innovative Apparate- und Anlagenkonzept unter der Leitung von Christian, Friederike und Katharina bin ich stets in guten Händen gewesen. Ein großer Dank geht an die Werkstatt mit Karl, Sven, Jörg und allen Azubis, insbesondere für den Aufbau der Versuchsanlage, fürs das schnelle Problemlösen und für die Umsetzung meiner Änderungswünsche. Marion und das Office danke ich herzlich für die aktive Unterstützung von administrativen Angelegenheiten und CTAs bei der Unterstützung im Labor. Ich möchte mich bei meinen Bürokolleginnen und -kollegen Christoph, Friederike, Paul, Steffi und Sven bedanken, für die fachlichen und persönlichen Gespräche und auch für Eure Bereitschaft, mir in grammatikalischen Fragen stets behilflich gewesen zu sein. Für das tolle Arbeitsklima gebührt alle Kollegen und Kolleginnen des Institutes ein Dank.

Besonders möchte ich bei Herrn Peter Drögemüller für die Bereitstellung von Drahtgestrick-einbauten und die hilfreichen Ratschläge danken. Weiterhin konnte ich auf die Arbeit meines Vorgängers Jochen Hammerschmidt sehr gut aufbauen. Ich bedanke mich bei den studentischen Arbeitern und wissenschaftlichen Hilfskräften Adrian Waßmann, Alvaro Ferre, Baoyi Cai, Belal Trabelsi, Di Shen, Emitithel Trabelsi, Kim Rimpl, Kun Cao, Linfeng Li, Martine-Clare Nguezong Wonanke, Stephan Sanders, die insbesondere mit ihren Arbeiten an der Versuchsanlage einen großen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben. Für die Durchsicht meiner Arbeit möchte ich bei Christian Bradtmöller, Christoph Spiegel, Karl Siebeneck, Katharina Jasch und Sven Gutperl bedanken.

Mein ganz persönlicher Dank gilt meinen Eltern, die mein Leben am meisten geprägt und insbesondere meinem Weg nach Deutschland geebnet haben. Meinem Ehemann Gangbo danke ich von ganzem Herzen für sein Verständnis, Aufmunterungen und seine Unterstützung in Tat und Wort bei der Anfertigung dieser Doktorarbeit und für unser Engelchen Luna.

Gifhorn, Juni 2022

Yan Lu





Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	III
Abstract	IV
Symbolverzeichnis	V
1. Einleitung	1
2. Stand des Wissens.....	3
2.1. Grundlagen zum Naturumlaufverdampfer.....	3
2.1.1. Prinzip des Naturumlaufverdampfers	4
2.1.2. Betriebsbereich und Bauformen des Naturumlaufverdampfers	6
2.1.3. Strömungsinstabilitäten in Naturumlaufverdampfern	10
2.2. Drahtgestrickeinbauten.....	15
2.3. Fluidodynamik und Wärmeübertragung im Naturumlaufverdampfer.....	17
2.3.1. Fluidodynamik einphasiger Strömung.....	18
2.3.2. Fluidodynamik zweiphasiger Strömung.....	19
2.3.3. Wärmeübertragung bei der Kondensation	26
2.3.4. Wärmeübertragung bei der einphasigen Konvektion	28
2.3.5. Wärmeübertragung beim Strömungssieden.....	31
2.4. Simulation von Naturumlaufverdampfern	35
2.5. Einordnung der eigenen Arbeit.....	36
3. Experimentelle Vorgehensweise.....	38
3.1. Versuchsaufbau.....	38
3.1.1. Versuchsanlage	38
3.1.2. Konstruktiver Aufbau	40
3.2. Verwendete Stoffe	44
3.3. Versuchsauswertung	46
3.3.1. Treibende Temperaturdifferenz	46
3.3.2. Geschwindigkeit und Reynolds-Zahl am Rohreintritt.....	47
3.3.3. Bestimmung der anliegenden Wärmestromdichte im Verdampfer	47
3.3.4. Umlaufzahl	50
3.4. Untersuchte Versuchsbedingungen.....	50
3.5. Unsicherheitsbetrachtung	51
4. Experimentelle Ergebnisse.....	55
4.1. Naturumlaufverdampfung von Wasser	55
4.1.1. Überfluteter Zustand.....	56
4.1.2. Nicht überfluteter Zustand	61
4.2. Naturumlaufverdampfung vom Wasser-Glycerin Gemisch	63
4.2.1. Überfluteter Zustand.....	64
4.2.2. Nicht überfluteter Zustand	68
4.3. Vergleich mit Literaturergebnissen	70



4.3.1.	Naturumlaufverdampfung im Vakuum	70
4.3.2.	Einsatz der Drahtgestrickeinbauten in Naturumlaufverdampfern.....	72
4.4.	Charakteristika von Naturumlaufverdampfern.....	74
4.4.1.	Umlaufzahl.....	74
4.4.2.	Hysterese-Effekt.....	78
4.4.3.	Instabilitätsphänomene.....	79
5.	Simulation	84
5.1.	Simulationsaufbau.....	84
5.2.	Vergleich zwischen Simulation und Experiment	87
5.2.1.	Wasser.....	88
5.2.2.	Wasser-Glycerin Gemisch	98
5.3.	Instabilitätsanalyse anhand der Simulation	103
6.	Zusammenfassung.....	106
7.	Ausblick.....	109
	Literaturverzeichnis.....	110
	Abbildungsverzeichnis	118
	Tabellenverzeichnis.....	122
	Anhang	123
A.1	Stoffdaten	123
A.1.1	Stoffdatenberechnung von Reinstoffen.....	123
A.1.2	Stoffdatenberechnung von Gemischen	127
A.2	Ergänzende Abbildungen	130
A.3	Ergänzende Tabellen	135
	Lebenslauf.....	137



Kurzfassung

Gegenstand dieser Dissertation ist die Untersuchung des Einflusses von Drahtgestrickeinbauten auf das fluiddynamische und wärmetechnische Betriebsverhalten bei der Naturumlaufverdampfung. Die untersuchten Einbauten wurden angesichts ihres Potenzials, das Betriebsverhalten von Naturumlaufverdampfern zu verbessern und den Betriebsbereich zu erweitern, bewertet. Eine Erweiterung des Betriebsbereichs in Richtung tiefer Betriebsdrücke, insbesondere bis ins Vakuum, befördert den Einsatz von Naturumlaufverdampfern als effiziente Wärmesenke bei der Wärmeintegration. Zudem ermöglicht eine Verringerung der treibenden Temperaturdifferenz bei gleicher Wärmestromdichte einen verminderten Exergieverlust und somit eine gesteigerte Energieeffizienz. Um das Betriebsverhalten von Naturumlaufverdampfern in diesem unteren Betriebsbereich zu charakterisieren, wurde eine breite Datenbasis durch die Variation von Betriebsdruck, treibender Temperaturdifferenz und scheinbarem Flüssigkeitsstand geschaffen, die unterhalb des üblichen Betriebsbereiches liegen. Die Experimente erfolgten an einem mit Wasserdampf beheizten Verdampfer mit drei Verdampferrohren der Geometrie $d_a \times s \times L = 20 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 1.500 \text{ mm}$. Die Einbauten befanden sich in den unteren 40 % der Verdampferrohre, dem Bereich, in dem in den meisten Fällen eine einphasige Konvektion stattfindet. Als Versuchsmedien dienten Wasser und ein Wasser-Glycerin Gemisch. Es hat sich gezeigt, dass der überflutete Zustand, bei dem sich der Verdampfer und die Brülenleitung unterhalb des Flüssigkeitsstandes befinden, sehr gute fluiddynamische Eigenschaften aufwies und für den unteren Betriebsbereich besonders vorteilhaft ist. Die experimentellen Untersuchungen geben einen vertieften Einblick in charakteristische Betriebszustände in Naturumlaufverdampfern, angefangen von der Initialisierung des Selbstumlaufs, über die Destabilisierung des Selbstumlaufs mit nicht linearem Betriebsverhalten, bis hin zum stabilen Selbstumlauf.

Die Drahtgestrickeinbauten führen durch ihre Wirkung der Turbulenzerzeugung im Allgemeinen zum erhöhten Wärmeübergang mit vergrößertem Druckverlust. Die Versuche mit Verdampfung von Wasser haben ergeben, dass ausschließlich unter laminaren Bedingungen die Wärmeübergangsverbesserung durch den Einsatz von Einbauten die Druckverlusterhöhung übersteigt. Größeres Potenzial bei Verwendung von Drahtgestrickeinbauten wurde für das Wasser-Glycerin Gemisch ermittelt, mit welchem aufgrund der erhöhten Viskosität in dem gesamten Messspektrum nur laminare Strömungsbedingungen vorlagen. Sowohl die Fluiddynamik als auch der Wärmeübergang wurden signifikant verbessert. Zum Erreichen der gleichen Leistung wurde eine geringere treibende Temperaturdifferenz als die bei den Referenzversuchen in Glattrohren benötigt. Es ist gelungen zu zeigen, dass Drahtgestrickeinbauten zur Betriebsbereichserweiterung und zur Energieeffizienzsteigerung von Naturumlaufverdampfern beitragen können.

Die experimentellen Ergebnisse wurden anschließend mit Daten eines iterativ, segmentweise und mit etablierten Korrelationen rechnenden Simulationsprogramms verglichen. Eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment wurde für die Verdampfung von Wasser in Glattrohren erzielt, womit auch das nicht lineare Betriebsverhalten wiedergegeben werden konnte. Die Wirkung der Einbauten konnte durch die Simulation qualitativ gezeigt werden. Bei Wasser-Glycerin reduziert sich die Rechengenauigkeit, und eine Verbesserung der Berechnungsgleichungen für Strömungssieden von Gemischen im Vakuum in fortführenden Arbeiten ist wünschenswert.



Abstract

The object of this work is the influences of wire matrix inserts on the fluid dynamics and thermal performance of a thermosiphon reboiler. The potential of the investigated insert to improve the performance and to enlarge the operating range of thermosiphon reboilers was evaluated. An enlargement of the operating range towards low pressures, especially in a vacuum, supports the use of thermosiphon reboilers as efficient heat sinks in heat integration measures. In addition, a reduction in the driving temperature difference at the same heat flux enables a decreased exergy loss and therefore enhanced energy efficiency. To characterize the performance of thermosiphon reboilers in the lower operating range, a broad database was achieved through the variation of operating pressure, driving temperature difference, and submergence, which undercuts the typical operating range. The experiments were carried out in a steam-heated shell and tube heat exchanger comprising three reboiler tubes with the tube dimension of $d_o \times s \times L = 20 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm}$; the inserts were installed in the lower 40% length of each reboiler tube, where single-phase flow is expected in most cases. Water and a water/glycerol mixture were used as test media. It has been demonstrated that the submerged condition, where both the reboiler and the exit line were submerged, is beneficial for the lower operating range because of its excellent fluid dynamics performance. With increasing driving temperature differences, the reboiler has shown different performances from the incipience of the self-circulation, through unstable self-circulation with non-linear behavior, to the stable self-circulation.

In general, wire matrix inserts enhance the heat transfer due to the turbulence promotion at the cost of an enlarged pressure drop. Comparing boiling of water in inserted tubes to plain tubes, it revealed that the heat transfer enhancement only overcame the disadvantage cost by pressure drop enlargement under laminar flow conditions. A larger potential of the inserts was determined with the water/glycerol mixture; because of its physical properties, only the laminar flow was present within the measurement range. Both the fluid dynamics and thermal performance were improved significantly. To achieve the same performance, the reboiler required a smaller driving temperature difference compared to plain tubes. Thus, the investigation showed the contribution of the wire matrix inserts to the operating range enlargement and the energy efficiency enhancement of thermosiphon reboilers.

Experimental results were then compared to the calculated results based on an axial segmentation of the reboiler tube using established correlations for heat transfer and pressure drop. The simulation of water in plain tubes showed a very good agreement with experimental values and reproduced the non-linear behavior. The simulation showed the effects of inserts qualitatively. It demonstrated the advantages of inserted tubes by a shortened single-phase heating zone, which allowed an extended evaporation zone with a better heat transfer. For water-glycerol, the simulation underestimated the heat flux, once two-phase heat transfer models for mixture were applied. To reduce this uncertainty, a validation of the flow boiling correlations for mixture under vacuum conditions is necessary for future work.



Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

A	m^2	Fläche
B	-	Parameter
C	-	Parameter
C_F	-	Faktor
c_p	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	spezifische Wärmekapazität
d	m	Durchmesser
F	-	Faktor
f^*	-	erweiterter Reibungsbeiwert
f_M	-	Faktor
g	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	Erdbeschleunigung
G	-	Genauigkeit
h	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	Enthalpie
H	m	Abstand
h_s^*	-	scheinbarer Flüssigkeitsstand
h_v	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	Verdampfungsenthalpie
k	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	Wärmedurchgangskoeffizient
K	m	absolute Rauheit
K_I	-	Impuls-Korrekturfaktor
L	m	Länge
$\dot{m}$	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$	Massenstromdichte
$\tilde{M}$	$\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$	Molmasse
$\dot{M}$	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	Massenstrom
n	-	Parameter
N	-	Faktor
p	bar	Druck
p^*	$\text{bar} \cdot \text{bar}^{-1}$	reduzierter Druck
$\dot{q}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	Wärmestromdichte
$\dot{Q}$	W	Wärmestrom
r	m	Radius; Biegeradius
R	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Gaskonstante
R^2	-	Bestimmtheitsmaß der Regression
R_a	m	arithmetische Mittenrauwert
s	-; m	Schlupf; Wanddicke
t	s	Zeit
T	K	Temperatur
t_R	m	Rohrteilung
U	m	Umfang
UZ	-	Umlaufzahl
v	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	spezifisches Volumen
V_A	$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$	Querschnittsverhältnis
w	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Geschwindigkeit



Symbolverzeichnis

x	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Massenanteil in flüssiger Phase
X	-	Parameter
$\dot{x}$	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Dampfmassenanteil
$\tilde{x}$	$\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$	Molanteil in flüssiger Phase
y	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Massenanteil in Dampfphase
$\tilde{y}$	$\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$	Molanteil in Dampfphase

Griechische Buchstaben

α	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	Wärmeübergangskoeffizient
β	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Stoffübergangskoeffizient
γ	-	Parameter
Γ	-	Parameter
Δ	-	Differenz; Unsicherheit
ε	-	Dampfanteil
η	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	dynamische Viskosität
θ	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
λ	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit
ν	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	kinetische Viskosität
ζ	-	Druckverlustbeiwert
ρ	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Dichte
σ	$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	Oberflächenspannung
Φ	-	Zweiphasen-Multiplikator

Indizes

0	Referenzzustand
1ph	einphasig
2ph	zweiphasig
a	außen
aus	austretend
B	Rohrbogen
BA	Brüdenabscheider
BS	Blasensieden
char	charakteristisch
D	Dampf
dyn	dynamisch
eff	effektiv
ein	eintretend
Erw	Querschnittserweiterung
F	Film
g	gasförmig
ges	gesamt
Gly	Glycerin
GO	wenn die gesamte Strömung als Gas vorliegen würde
HD	Heizdampf
HDK	Heizdampfkondensat



horizR	horizontales Rohr
i	innen
id	ideal
int	integral
k	Kernströmung
K	Kopfprodukt
Kon	Querschnittsverengung
krit	kritisch
KS	konvektives Sieden
l	flüssig
lam	laminar
LO	wenn die gesamte Strömung flüssig vorliegen würde
log	logarithmisch
ONB	Blasenentstehungspunkt
p	Druck
pch	Phasenwechsel
Prod	Produktseite
R	Reibung
s	Siedezustand
seg	Segment
sim	Simulation
stat	statisch
sub	Unterkühlung
turb	turbulent
U	Umlauf
V	Verlust
vertR	vertikales Rohr
VR	Verdampferrohr
W	Wand
Wa	Wasser
Wa-Gly	Wasser-Glycerin Gemisch
well	Welligkeit
WÜT	Wärmeübertragung
x	lokal

Abkürzungen

DWO	Dichtewellenoszillation
NVG	Nettodampfentwicklung, engl. <i>net vapor generation</i>
ONB	Blasenentstehungspunkt, engl. <i>onset of nucleate boiling</i>

Dimensionslose Kennzahlen

Re	Reynolds-Zahl
Nu	Nußelt-Zahl
Pr	Prandtl-Zahl
We	Weber-Zahl



1. Einleitung

Die Energieeffizienzsteigerung energieintensiver Grundoperationen, wie bspw. Verdampfung, Destillation oder Desorption, gewinnt immer mehr an Bedeutung. Für derartige Operationen dient der Naturumlaufverdampfer als einer der am häufigsten verwendeten Verdampfertypen [Sloley, 1997]. Dies liegt insbesondere daran, dass ein sehr guter Wärmeübergang bei geringen Investitionen und Betriebskosten erzielt werden kann. Weitere Vorteile des Naturumlaufverdampfers sind der pumpenlose Betrieb, der einfache Aufbau, eine geringe mechanische Beanspruchung und eine tendenziell verminderte Neigung zum Fouling. Die Vorteile beruhen auf dem Selbstumlauf, welcher durch den Dichteunterschied zwischen der unterkühlten Flüssigkeit am Verdampfereintritt und dem Dampf-Flüssigkeits-Gemisch am Austritt induziert wird. Der Dichteunterschied ist vom Dampfmassenanteil abhängig, welcher wiederum durch den Wärmeübergang bestimmt wird. Daher besteht bei diesem Verdampfertyp eine enge Kopplung zwischen dem Wärmeübergang und der Fluidodynamik. Diese Kopplung führt zur Beschränkung des Betriebsbereiches sowie zum aufwendigen Auslegungsverfahren mit eingeschränkter Genauigkeit. Dies erfordert eine höhere minimale treibende Temperaturdifferenz zwischen der Heiz- und Produktseite im Vergleich zu anderen Verdampfertypen. Außerdem können tiefe Betriebsdrücke das Betriebsverhalten insbesondere bei einer zweiphasigen Strömung beeinträchtigen und zur Strömungsinstabilität führen. Die untere Betriebsgrenze von Naturumlaufverdampfern liegt typischerweise bei treibenden Temperaturdifferenzen zwischen 10 K und 15 K und einem Betriebsdruck von 300 mbar [Scholl und Rinner, 2006]. Die publizierten Simulationsprogramme liefern keine zuverlässigen Ergebnisse für den unteren Betriebsbereich. Dabei wurden Modelle verwendet, die für Atmosphären- und Überdrücke unter Annahme des thermischen Gleichgewichtszustandes entwickelt wurden. Diese Auslegungsverfahren führen zur signifikanten Überschätzung des Selbstumlafs im unteren Betriebsbereich [Arneth, 1999; Dialer, 1983; Fair, 1960; Hammerschmidt, 2013]. Dieser Betriebsbereich wurde bislang nicht in den Fokus gestellt, gewinnt jedoch mit dem Ziel der Energieeffizienzsteigerung zunehmend an Bedeutung.

Die Energieeffizienz der Naturumlaufverdampfung kann einerseits durch eine Optimierung der Betriebsbedingungen und andererseits durch wärmeübergangsteigernde Maßnahmen erhöht werden. Die erste Option kann durch eine Erweiterung des Betriebsbereiches in Richtung des tiefen Betriebsdrucks und geringer treibender Temperaturdifferenz erzielt werden. Eine verringerte treibende Temperaturdifferenz reduziert den Exergieverlust und erhöht somit die Energieeffizienz des Prozesses. Außerdem ist dies aus prozesstechnischer Sicht vorteilhaft, da durch den Betrieb bei tiefen Drücken auch niedrige Heiztemperaturen eingestellt werden können. Der Prozess verläuft somit thermisch schonend, wodurch eine thermische Degradierung der Produkte vermieden werden kann. Die Anforderungen an das Heizmedium und die Baumaterialien, wie bspw. derer Temperatur- und Druckbeständigkeit, können dadurch reduziert werden. Zudem können die Aufheizzeit gekürzt, weniger Korrosionsprobleme verursacht und eine erhöhte Betriebssicherheit erzielt werden [Alane und Heggs, 2006]. Des Weiteren bieten im unteren Betriebsbereich betriebene Naturumlaufverdampfer mehr Potenzial zur Prozessintegration. Auch die angeschlossene Trennungseinheit tendiert zum Vakuumbetrieb, deren Vorteilhaftigkeit in [Agunlejika et al., 2016b] beschrieben wurde. Darüber hinaus ist der Flüssigkeitsstand im angeschlossenen Brüdenabscheider bzw. der angeschlossenen Kolonne ein wichtiger Betriebsparameter. Ein hoher

Flüssigkeitsstand fördert und stabilisiert den Selbstumlauf [Alane und Heggs, 2011; Hammerschmidt, 2013], führt aber zu einem erhöhten Holdup und einer verlängerten Verweilzeit, was die Produktqualität beeinträchtigen können. [Alane und Heggs, 2011] empfehlen die Inbetriebnahme von Naturumlaufverdampfern mit einem Flüssigkeitsstand oberhalb der Brüdenleitung, wodurch die Instabilität gemildert wurde. Zudem bietet der Betrieb bei einem scheinbaren Flüssigkeitsstand mit einem guten Umlaufverhalten mehr Freiheit bei der Auswahl weiterer Betriebsbedingungen, wie bspw. Systemdruck und treibender Temperaturdifferenz. Der Betrieb im unteren Betriebsbereich ist aufgrund des erhöhten Risikos vom unzureichenden oder instabilen Umlauf jedoch nur in Kombination mit wärmeübergangssteigernden Technologien, wie im Folgenden beschrieben, realisierbar.

Zur Verbesserung des Wärmeübergangs von Naturumlaufverdampfern wird die grundsätzliche Eignung von Drahtgestrickeinbauten in [Hammerschmidt, 2013; Nasr und Tahmasbi, 2006; Reddy et al., 1997; Scholl und Brahim, 2005] gezeigt. Diese Einbauten werden typischerweise zur Verbesserung des einphasigen Wärmeübergangs von laminarer Strömung und Strömung im Übergangsbereich verwendet [Drögemüller, 2018]. Verbesserungspotenzial bei der Naturumlaufverdampfung wird insbesondere für den unteren Betriebsbereich erkannt, wodurch neben einem verbesserten Betriebsverhalten eine Erweiterung der unteren Betriebsgrenze erzielt wird [Hammerschmidt, 2013]. Die Verbesserung erfolgt durch eine verkürzte und intensiviertere einphasige Aufheizzone mit einer verlängerten Verdampfungszone. Im Vergleich dazu wird das Betriebsverhalten im oberen Betriebsbereich nicht oder nur eingeschränkt verbessert, da hierbei die erzielbare Verbesserung des einphasigen Wärmeübergangs limitiert ist und sich der erhöhte Druckverlust von Drahtgestrickeinbauten signifikant auf die Fluidynamik auswirkt [Scholl und Brahim, 2005]. Aufgrund dessen ist eine systematische Untersuchung des vorteilhaften Einsatzbereiches von Drahtgestrickeinbauten notwendig. Überdies ist die Bestückungslänge eine Designvariable. Experimentell hat [Hammerschmidt, 2013] einen verstärkten Wärmeübergang sowohl in der einphasigen Aufheizzone als auch in der Verdampfungszone eines komplett bestückten Verdampferrohrs ermittelt, während [Scholl und Brahim, 2005] zum Teil eine signifikantere Verbesserung durch den in der unteren Hälfte des Verdampfers bestückten Einbau erzielt haben. Die Simulationen von [Nasr und Tahmasbi, 2006] und [Reddy et al., 1997] rechneten mit der Bestückungslänge, die der Länge der Aufheizzone des Referenzfalls ohne Einbauten entsprach. Das Ziel hierbei war es, ein großes Verbesserungspotenzial bezüglich des Wärmeübergangs mit einer möglichst geringen Druckverlust-erhöhung zu erzielen. Naturumlaufverdampfer mit teilbestückten Verdampferrohren werden bislang unzureichend untersucht, um mit dem komplett bestückten Naturumlaufverdampfer verglichen werden zu können.

Insgesamt besteht Forschungsbedarf bei der Naturumlaufverdampfung im unteren Betriebsbereich und dessen Verbesserungspotenzial durch den Einsatz von Drahtgestrickeinbauten. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird das fluiddynamische und wärmetechnische Betriebsverhalten von einem Dreirohr-Naturumlaufverdampfer mit Drahtgestrickeinbauten in den unteren 40 % der Verdampferrohrlänge untersucht und mit Referenzmessungen ohne Einbauten verglichen. Dabei liegt der Fokus insbesondere auf dem unteren Betriebsbereich im Vakuum mit mäßigen treibenden Temperaturdifferenzen. Die dabei auftretenden Strömungsinstabilitäten werden analysiert. Darüber hinaus wird die Naturumlaufverdampfung im unteren Betriebsbereich mit etablierten Modellgleichungen vorausgerechnet und mit Messdaten verglichen.