



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.



technische
**THERMO
DYNAMIK**

Experimentelle Untersuchungen zu Wärmeübergang und Filmstabilität von Propanfallfilmen in geneigten Rohren

Von der Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik
der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)

vorgelegt von **Simon Eichinger, M.Sc.**

geboren am 5. Dezember 1986 in Frankenberg/Sachsen

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Groß
Prof. Dr.-Ing. habil. Stephan Kabelac

Tag der Verleihung: Freiberg, den 26. November 2021

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XV
Tabellenverzeichnis	XVIII
Nomenklatur	XIX
1. Einleitung	1
2. Grundlagen und Stand des Wissens	3
2.1. Charakteristika von Fallfilmverdampfern	3
2.1.1. Merkmale und Funktionsweise	3
2.1.2. Anwendungen	4
2.1.3. Grenzen von Fallfilmverdampfern	4
2.2. Hydrodynamik und Aufriss von Fallfilmen	5
2.2.1. Hydrodynamik von Fallfilmen	6
2.2.2. Filmaufriss und Filmstärke	9
2.2.3. Kerbtransportvermögen	14
2.3. Wärmeübergang von Fallfilmen	20
2.3.1. Berechnung und Einflussfaktoren	20
2.3.2. Einfluss von Oberflächenstrukturen auf den Wärmeübergang bei Verdampfung	30
2.3.3. Einfluss von micro-regions auf den Wärmeübergang	34
2.3.4. Einfluss der Schubspannung auf den Wärmeübergang	35
2.4. Fazit und Motivation für vorliegende Arbeit	38
3. Durchführung und Auswertung der experimentellen Untersuchungen	43
3.1. Versuchsanlage zur Fallfilmverdampfung (FIVA)	43
3.1.1. Aufbau der Versuchsanlage	43
3.1.2. Messtechnik	48
3.2. Versuchsdurchführung	50
3.2.1. Dichtheit und Inbetriebnahme	50
3.2.2. Einstellparameter für Fallfilmversuche	51
3.2.3. Voruntersuchungen zum Wärmeübergangsverhalten	52
3.2.4. Überblick zu durchgeführten Hauptversuchen	53
3.3. Versuchsauswertung	55
3.3.1. Auswertung des Benetzungsgrades zur Bewertung der Filmstabilität	55
3.3.2. Auswertung zum Wärmeübergang	56

3.3.3. Abschätzung der Wärmeverluste/ -einträge	60
3.4. Messunsicherheitsbetrachtung	61
3.4.1. Allgemeine Erläuterungen zur Messunsicherheitsbetrachtung	62
3.4.2. Wärmeübergangskoeffizient im Temperiermantel	63
3.4.3. Wärmeübergangskoeffizient auf der Innenseite der Verdampferrohre	66
3.4.4. Übersicht der Messunsicherheiten für alle Verdampferrohre	68
4. Versuchsergebnisse	69
4.1. Ergebnisse für die Filmstabilität	69
4.1.1. Einfluss der Filmaufgabetemperatur	69
4.1.2. Einfluss der Filmlauflänge	73
4.1.3. Einfluss von Rohrstruktur und Neigungswinkel	78
4.1.4. Einfluss der treibenden Temperaturdifferenz	84
4.1.5. Untersuchung des Kerbtransportvermögens	86
4.2. Ergebnisse zum Wärmeübergang	90
4.2.1. Abhängigkeit vom Rohrneigungswinkel	90
4.2.2. Abhängigkeit von der Rohrstruktur	93
4.2.3. Abhängigkeit von der treibenden Temperaturdifferenz	97
4.3. Berechnung des Wärmeübergangs mittels Fallfilmkorrelation	103
4.4. Strukturempfehlung	104
5. Zusammenfassung	107
6. Ausblick	111
Literatur	113
Anhang	i
A. Berechnungsvorschriften	iii
A.1. Berechnung der Fläche eines strukturierten Rohres	iii
A.2. Berechnung des Wärmeübergangs im Temperiermantel	v
A.3. Berechnung der Poiseuille-Zahl	xiii
A.4. Sensitivitätskoeffizienten für Messunsicherheitsbetrachtung	xiv
A.4.1. Sensitivitätskoeffizienten für Wärmeübergangskoeffizienten im Temperiermantel	xiv
A.4.2. Sensitivitätskoeffizienten für Wärmeübergangskoeffizienten auf der Innenseite der Verdampferrohre	xvii
B. Berechnung der Schubspannung im Glattrohr	xxi
C. Zusätzliche Untersuchungsaspekte	xxv
D. Benetzungsgrad	xxvii

E. Zusätzliche Daten zum Wärmeübergang	xxxv
F. Stoffeigenschaften	xxxix
F.1. Propan	xxxix
F.2. Ethylenglykol-Wasser-Gemisch	xxxix
G. Untersuchungen zum Benetzungsverhalten	xli
G.1. Benetzung von Oberflächen	xli
G.1.1. Grundlagen zum Kontaktwinkel	xli
G.1.2. Bestimmung des statischen Kontaktwinkels	xliv
G.1.3. Transferierung von statischen in dynamischen Kontaktwinkel	xliv
G.2. Versuchsanlage zur Messung des statischen Kontaktwinkels von Propan	xlvi
G.2.1. Aufbau der Versuchsanlage (Autoklav)	xlvi
G.2.2. Messtechnik	xlix
G.3. Versuchsdurchführung	xlix
G.3.1. Oberflächenmaterialien und Bearbeitungszustände	xlix
G.3.2. Vorgehensweise	l
G.4. Ergebnisse zum Kontaktwinkel	li
G.4.1. Bestimmung des statischen Kontaktwinkels	li
G.4.2. Berechnung des Vorrückwinkels	liv
G.5. Fazit der Ergebnisse	liv
H. Numerische Simulation des Strömungsverhaltens im Temperiermantel	lvii
I. Rohrgeometrie - Vergleich Geometriesoll- und Istdaten	lxi
J. Details der Versuchsanlage	lxiii
J.1. Schemata der Versuchsanlage	lxiii
J.2. Anlagenparameter	lxv
J.3. Konstruktionszeichnungen	lxvi