



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG

Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.

Verbesserung der Filmverteilung auf Fallfilmverdampferoberflächen am Beispiel geothermischer Phasenwechselsonden

Von der Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)

vorgelegt von **Dipl.-Ing. Thomas Grab**

geboren am 10. August 1981 in Gera

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Groß
Dr.-Ing. habil. Matthias Buschmann

Tag der Verleihung: Freiberg, den 19. Dezember 2014

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik der TU Bergakademie Freiberg. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. U. Groß für seine Unterstützung und das entgegengebrachte Vertrauen. Herrn Dr.-Ing. habil. M. Buschmann danke ich für die Übernahme des zweiten Gutachtens.

Ferner danke ich allen Kolleginnen und Kollegen, der Werkstatt sowie der Messtechnik, welche einen wesentlichen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben. Herrn T. Storch möchte ich für die vielfältigen fachlichen Diskussionen, die ständige Hilfsbereitschaft und die langjährige freundschaftliche Zusammenarbeit danken. Den Herren S. Braune, M. Kupka, A. Riefer, S. Schreiter, T. Weickert, A. Köhler, S. Werner, R. Büttner, R. Oertel, F. Jais, S. Höhlelein sowie Frau E. Graetz möchte ich für die wertvolle Arbeit danken, die sie bei Messungen und Auswertungen im Rahmen von studentischen Arbeiten geleistet haben.

Besonders möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken, die mich in jeglicher Hinsicht gefördert und unterstützt haben. Meiner Freundin Nadja sowie meiner Tochter Helena möchte ich insbesondere für die liebevolle Unterstützung, die jahrelange Geduld und den Zuspruch danken. Ohne dies wäre die Arbeit sicherlich nicht in dieser Form zustande gekommen.

Zusammenfassung

Neben einer Vielzahl industrieller Anwendungen zum Transport von Wärme und Stoff kommt die Fallfilmverdampfung auch bei der Gewinnung von geothermischer Energie zum Einsatz. Anhand visueller Untersuchungen innerhalb einer geothermischen Phasenwechselsonde wurde eine unvollständig benetzte Oberfläche über einen Großteil der Sondenlänge beobachtet, was zu einer Verringerung der Effizienz führt. Mit Hilfe numerischer Berechnungen wurde der Einfluss des Benetzungsgrades auf den übertragbaren Wärmestrom untersucht. In Abhängigkeit von der Geometrie und den Stoffparametern sinkt der Wärmestrom mit abnehmendem Benetzungsgrad zum Teil drastisch.

Kernpunkt dieser Arbeit sind daher Untersuchungen zur Fallfilmverteilung und Fallfilmstabilisierung durch strukturierte Oberflächen. Anhand einer Vielzahl experimenteller Versuche mit ebenen und geneigten strukturierten Platten sowie Rohren wurde der Einfluss einzelner Strukturen auf die Filmausbreitung untersucht. Für eine effektive Filmverteilung muss die Flüssigkeit aufgrund von Kapillarkräften in die Strukturen eindringen sowie schwerkraftgetrieben durch diese transportiert werden. Dabei sollte das Transportvermögen jedoch möglichst gering sein, sowie die Strukturgeometrie in Abhängigkeit von der Rohrneigung ausgelegt werden. Die vorliegende Arbeit bietet Möglichkeiten für die Auslegung geeigneter Strukturen.

Zur Vorhersage der Benetzung einer Oberfläche durch eine Flüssigkeit bzw. zur Auslegung geeigneter Strukturen ist der Kontaktwinkel von großer Bedeutung, welcher von Propan erstmalig auf unterschiedlichen Materialien bestimmt wurde. Für unterschiedliche Flüssigkeiten wurde die Tropfenaufsitzmethode, die OWRK-Methode sowie die ADSA-CD Methode zur Bestimmung des Kontaktwinkels verwendet. Eine Vorhersage des Kontaktwinkels mit Hilfe von Benetzungshüllkurven (Wetting Envelopes) kann zur groben Abschätzung dienen.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	7
1. Einleitung	11
1.1. Gewinnung von geothermischer Energie mittels Phasenwechsellsonden	14
1.2. Zielsetzung und Lösungsansätze	17
2. Grundlagen und Stand der Forschung	19
2.1. Einfluss verschiedener Parameter auf den Rieselfilm	19
2.1.1. Film - Parameter	20
2.1.2. Benetzung von Oberflächen	22
2.1.3. Ermittlung des Kontaktwinkels bzw. Vorhersage des Benetzungs- verhaltens	24
2.1.4. Einfluss von Tensiden auf die Benetzung	28
2.1.5. Mechanismen zur Bildung von Trockenstellen und Strähnen in Rieselfilmen	29
2.1.6. Einfluss des Neigungswinkels auf die Filmbildung und den Wärmeübergang	33
2.2. Einfluss von Einbauten und Oberflächenstrukturen auf die Filmströmung	34
2.2.1. Kapillarität von Strukturen	34
2.2.2. Flüssigkeitstransportvermögen von Strukturen	37
2.2.3. Einfluss von Strukturen auf die Stabilität, die Verteilung sowie den Wärmeübergang von Flüssigkeitsfilmen	40
3. Versuchsaufbau und Durchführung	47
3.1. Geothermische Phasenwechsellsonde im Feldversuch	47
3.2. Kontaktwinkel und Oberflächenspannung	49
3.2.1. Bestimmung des Kontaktwinkels von Wasser und der Oberflä- chenenergie von Verdampfermaterialien	49
3.2.2. Bestimmung des Kontaktwinkels von Propan	51
3.3. Filmdickenmessung und Filmbreitung	53
3.3.1. Filmbreitung und Filmdickenmessung auf einer ebenen Platte	53
3.3.2. Filmbreitung in innenstrukturierten Rohren	60
4. Zusammenfassung der Ergebnisse aus Versuchen und theoretischen Über- legungen	65
4.1. Untersuchungen zum Benetzungsgrad an Fallfilmverdampfern	65
4.1.1. Berechnung der minimalen Filmdicke	65
4.1.2. Visuelle Untersuchungen in einer geothermischen Phasenwechsel- sonde	69

4.1.3.	Einfluss des Benetzungsgrades in einer geothermischen Phasenwechselsonde auf den übertragbaren Wärmestrom	74
4.1.4.	Einfluss des Benetzungsgrades in industriellen Fallfilmverdampfern auf den übertragbaren Wärmestrom	79
4.2.	Untersuchungen zum Benetzungsverhalten	85
4.2.1.	Einfluss der Oberflächenenergie und -spannung auf die Benetzung	85
4.2.2.	Benetzungsverbesserung von Wasser durch oberflächenaktive Substanzen	92
4.3.	Einfluss von Oberflächenstrukturen auf die Filmausbreitung und die benetzte Fläche	95
4.3.1.	Analogie zwischen strukturierten Platten und Rohren	95
4.3.2.	Einfluss von Strukturen auf die Filmausbreitung eines Rieselfilmes	98
4.3.3.	Untersuchungen am Rillenblech	102
4.3.4.	Untersuchungen an innenstrukturierten Rohren	122
5.	Auswertung und Diskussion	135
5.1.	Einfluss des Benetzungsgrades auf den übertragbaren Wärmestrom . .	135
5.2.	Untersuchungen zum Benetzungsverhalten	137
5.2.1.	Bestimmung des Kontaktwinkels	137
5.2.2.	Benetzungsverbesserung durch Zugabe von Tensiden	138
5.3.	Einfluss strukturierter Oberflächen auf die Filmverteilung bzw. die benetzte Fläche	139
5.3.1.	Kapillarität und Flüssigkeitstransportvermögen von Strukturen	139
5.3.2.	Einfluss strukturierter Oberflächen auf das Filmausbreitungsverhalten und die benetzte Fläche	140
6.	Zusammenfassung und Ausblick	147
	Literatur	151
A.	Grundlagen	i
A.0.3.	Anwendung der Fallfilmverdampfung in der Industrie	i
A.0.4.	Übersicht über Geometrieparameter industrieller Rohr- und Plattenfallfilmverdampfer	iv
A.0.5.	Bestimmung der Oberflächenenergie eines Feststoffes nach der OWRK-Methode	vi
A.0.6.	Berechnung der <i>Poiseuille</i> -Zahl	vi
A.0.7.	Berechnung der Flächenvergrößerung aufgrund einer strukturierten Rohroberfläche in Abhängigkeit von der Kerbgeometrie sowie dem Drallwinkel	vii
A.0.8.	Kräftezerlegung an einem geneigten strukturierten Rohr	viii
A.0.9.	Ablenkung eines Rinnsales auf einer strukturierten Fläche . . .	ix
A.0.10.	Stoffwerte	ix
B.	Versuchsaufbau und Durchführung	xi
B.0.11.	Autoklav	xi
B.0.12.	Übersicht der untersuchten Tenside	xii
B.0.13.	Filmdickenmessung auf ebener Platte	xii

B.0.14. Filmausbreitung in innenstrukturierten Rohren	xv
B.0.15. Forschungssonde Geothermie	xvi
C. Zusammenfassung der Ergebnisse	xvii
C.0.16. Minimale Filmdicken für verschiedene Flüssigkeiten in Abhängigkeit vom Kontaktwinkel	xvii
C.0.17. Einfluss des Benetzungsgrades auf den übertragbaren Wärmestrom in einer geothermischen Phasenwechselsonde	xvii
C.0.18. Einfluss des Benetzungsgrades auf den übertragbaren Wärmestrom in industriellen Fallfilmverdampfern	xx
C.0.19. Einfluss der Oberflächenenergie und -spannung auf die Benetzung	xxiv
C.0.20. Einfluss von Oberflächenstrukturen auf die Filmstabilität	xxvi

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Formelzeichen, lateinische Buchstaben

A	m^2	(benetzte) Fläche
B	$\%$	Benetzungsgrad
b	m	Breite
c_p	$\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$	spezifische Wärmekapazität
d	m	Durchmesser
g	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Fallbeschleunigung
Δh_v	$\frac{\text{J}}{\text{kg}}$	spezifische Verdampfungsenthalpie
L	m	Lauflänge, Länge
\dot{m}	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	Massenstrom
\dot{Q}	W	Wärmestrom
\dot{q}	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	Wärmestromdichte
r	m	Radius
T	K	Temperatur
\dot{V}	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	Volumenstrom
w	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	(Film-, Strömungs-) Geschwindigkeit

Formelzeichen, griechische Buchstaben

α	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} ; ^\circ$	Wärmeübergangskoeffizient, Kerbenanstellwinkel zur Vertikalen
β	$^\circ$	Neigungswinkel Platte bzw. Rohr zur Horizontalen
γ	$^\circ$	Ablenkwinkel eines Flüssigkeitsfilms aus der Vertikalen

δ	mm	Filmdicke
ϵ	°	Kerböffnungswinkel
η	$\frac{\text{kg}}{\text{m s}}$	dynamische Viskosität
θ	°	Kontaktwinkel
κ_H	m	Krümmungsradius der Helix (Schraubenkurve)
λ	$\frac{\text{W}}{\text{m K}}$	Wärmeleitfähigkeit
ν	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	kinematische Viskosität
ρ	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Dichte
σ	$\frac{\text{mN}}{\text{m}}$	Oberflächenspannung
φ	°	Winkel
ϕ	°	Kerbflankenwinkel
χ	-	Querschnittsverhältnis

Dimensionslose Kennzahlen

EO	$\frac{g \cdot \rho_l \cdot d_h^3}{\sigma_l}$	Eötvös-Zahl
Ga	$\frac{g \cdot d_h^3}{\nu_l^2}$	Galilei-Zahl
K_f	$\frac{\rho_l \cdot \sigma_{l,g}^3}{\eta_l^4 \cdot g}$	Filmkennzahl
Nu	$\frac{\alpha \cdot L_{ch}}{\lambda}$	Nußeltzahl
Pr	$\frac{\nu \cdot c_p}{\lambda}$	Prandtl-Zahl
Po	siehe A.0.6	Poisouille-Zahl
Re	$\frac{\dot{V}_l}{\pi \cdot d_i \cdot \nu_l}$	Reynoldszahl
We	$\frac{\rho \cdot w_N^2 \cdot \delta_N}{\sigma_l}$	Weber-Zahl

Indizes

d	dispersiver Anteil
fm	Zementierung
i	innen
K	Kerbe
l	flüssige Phase
m	mittlere, gemittelt
min	minimal
p	polarer Anteil
P	Platte
proj	projizierte (Fläche)
R	Rohr
s	feste Phase
S	Steg
sat	Sättigung
surf	Oberfläche
v	dampfförmige Phase
W	Windung
wahr	wahre (Fläche)

Abkürzungen

DGRL	Druckgeräterichtlinie (Kap. 4.2.1)
FOM	faseroptisches Messkabel
MBR	minimale Benetzungsrate
PWS	Phasenwechselsonde