

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	III
1. Einleitung	1
2. Grundlagen und Stand des Wissens	3
2.1. Geothermie	3
2.1.1. Oberflächennahe Geothermie	5
2.1.2. Tiefe Geothermie	5
2.2. Pumpenloser Wärmetransport - Thermosyphons und Heat Pipes	6
2.3. Beschreibung von Flüssigkeitsfallfilmen	8
2.3.1. Fluidodynamik von Fallfilmen und ihre Kennzahlen	8
2.3.2. Benetzung und Filmaufriss von Fallfilmen	11
2.3.3. Druckverlust bei der 1- und 2-Phasenströmung	16
2.3.4. Einbauten zur Filmverteilung und Flüssigkeitsstabilisierung	17
2.4. Einsatz von Phasenwechsellsonden in der oberflächennahen Geothermie	20
2.4.1. Aufbau und Funktion von Phasenwechsellsonden mit Wärmepumpen	20
2.4.2. Grenzen von Phasenwechsellsonden	25
2.4.3. Forschung zu Anwendung und Betriebsverhalten	30
2.5. Fazit und Motivation der Arbeit	40
3. Untersuchungen an einer realen Phasenwechsellsonde	43
3.1. Versuchsaufbau des Feldversuchsstandes	43
3.2. Voruntersuchungen	49
3.3. Versuchsauswertung	50
3.4. Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen	54
3.4.1. Überblick zu durchgeführten Versuchen	54
3.4.2. Charakterisierung des Anfahrverhaltens und der Filmausbreitung - visuelle Beobachtungen (Füllmenge = 8,1 kg)	55
3.4.3. Charakterisierung des Betriebsverhaltens und des Benetzungsgrades - visuelle Beobachtungen (Füllmenge = 8,1 kg)	62
3.4.4. Charakterisierung des Betriebsverhaltens und der Filmausbreitung in Abhängigkeit der Füllmenge	68
3.4.5. Energetische Bewertung unterschiedlicher Betriebsregime	73
3.4.6. Interne Regeneration	78
4. Ergänzende Laboruntersuchungen von Fallfilmen in geneigten Rohren	93
4.1. Anforderungen an die Versuchsanlage	93
4.1.1. Auswahl der Versuchsflüssigkeiten	93
4.1.2. Vergleich der Versuchsparameter	95
4.2. Versuchsaufbau der Laborversuchstände	96
4.3. Versuchsdurchführung und Auswertung	99
4.4. Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen	101
4.4.1. Benetzungsgrad im Leerrohr	101

4.4.2. Benetzungsgrad mit Drallfilmverteilern	106
4.4.3. Benetzungsgrad mit Drahtwendeleinbauten	111
4.4.4. Druckverlust ohne/mit Flüssigkeitsströmung	115
5. Diskussion der Ergebnisse	119
5.1. Propan-Phasenwechselsonde	119
5.2. Rieselfilmversuche im Labor	128
5.3. Bezug der Laborergebnisse zur Phasenwechselsonde am Standort „Reiche Zeche“	132
6. Zusammenfassung	141
7. Ausblick	145
Literaturverzeichnis	146
Anhang	i
A. Rechercheergebnisse	iii
A.1. Auswahlkriterien für Fluide für Phasenwechselsonden	iii
A.2. Hydratbildung von Kohlenwasserstoffen	v
A.3. Konstanten zur Berechnung der Filmdicke/-geschwindigkeit (Gl. 2.11 - Gl. 2.12)	vii
A.4. Recherche nach Filmverteilern	viii
A.5. Recherche zum Einsatz von Thermosyphons im Erdreich	viii
A.6. Recherche zur Bohrlochneigung	xiv
A.7. Energetische Bewertung von Wärmepumpen	xv
B. Phasenwechselsonden auf der „Reichen Zeche“	xvii
B.1. Spezifikation der Geothermieforschungs-sonde (PWS 8)	xviii
B.2. Kamerasystem und Druckschleuse	xxi
B.3. Zusätzliche Darstellung von Ergebnissen der PWS	xxvii
B.4. Marktverbreitung von Phasenwechselsonden	xxxii
C. Laboruntersuchungen zur Benetzung	xxxiii
C.1. Kontaktwinkelbestimmung von Fluiden unter Umgebungsbedingung	xxxiii
C.2. Kontaktwinkelbestimmung von Propan	xxxiv
C.3. Recherche und Eigenschaften möglicher Versuchsfluide	xxxv
C.4. Spezifikationen der Laboranlagen (A)/(B)	xxxviii
C.5. Zusätzliche Darstellung von Ergebnissen	xl