



Inhalt

Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XVIII
Formelzeichen, Abkürzungen und Indices	XIX
1. Motivation.....	1
2. Grundlagen der geothermischen Stromerzeugung	3
2.1. Stand der Techniken zur geothermischen Stromerzeugung	3
2.2. Geothermievorkommen und deren Erschließung in Deutschland.....	5
3. Systembeschreibung für die indirekte Nutzung geothermischer Wärme	10
3.1. Thermalfluidsystem.....	11
3.2. Stromerzeugung bei indirekter Nutzung der Geothermie.....	14
3.2.1. Carnot-Prozess bzw. das theoretische Maximum der Umwandlung.....	15
3.2.2. Clausius-Rankine-Prozess	18
3.2.3. Systematik der Prozesse zur Niederenthalpienutzung	19
3.3. Verfahren zur Wärmebereitstellung aus tiefer Geothermie.....	21
3.4. Kraftwerkskomponenten für Dampfkraftprozesse	23
3.4.1. Wärmeübertrager	24
3.4.2. Arbeitsmaschine – Turbine und Expander.....	26
3.4.3. Pumpen und Elektromotoren	28
3.4.4. Separatoren	28
3.4.5. Rückkühlung	29
3.5. Beispiele zu bestehenden geothermischen Kraftwerken.....	34
4. Thermodynamische Kennzahlen zur Systembeschreibung.....	39
4.1. Definition der Wärmeströme und Leistungen	39
4.2. Wirkungsgrade und Kennzahlen bei reiner Stromerzeugung	41
4.3. Nutzungsgrade für die kombinierte Erzeugung von Strom und Wärme	43
5. Leistungsaufnahme der Thermalfluidpumpen.....	44
5.1. Anschlussleistung der Förderpumpe.....	44
5.2. Einflüsse einzelner Parameter auf die Leistungsaufnahme der Förderpumpe anhand von Fallstudien	47
5.2.1. Einfluss der geologischen und hydraulischen Bedingungen	49
5.2.2. Einfluss des Bohrungsdurchmessers.....	50
5.2.3. Einfluss des Pumpenwirkungsgrades und Gegenüberstellung von ESP und LSP	51
5.3. Anschlussleistung der Injektionspumpe	51
6. Untersuchte Kraftwerksprozesse	52
6.1. Referenzbedingungen	52
6.2. Arbeitsfluide für Kreisprozesse zur Niederenthalpienutzung.....	53

6.2.1.	Thermodynamische Besonderheiten.....	54
6.2.2.	Thermodynamik von Gemischen.....	55
6.2.3.	Arbeitsfluide – Stabilität und Werkstoffauswahl.....	57
6.2.4.	Stoffdatenmodelle zur Verwendung in Prozesssimulationen	58
6.2.5.	Kriterien zur Beschreibung der Eignung und der Umweltauswirkungen von Arbeitsfluiden.....	59
6.2.6.	Auswahl der Arbeitsfluide für die Untersuchungen der Kraftwerks- prozesse	60
6.3.	Randbedingungen für die Simulationen.....	62
6.4.	Rankine-Prozesse	64
6.4.1.	Rankine-Prozesse mit Reinstoffen als Arbeitsfluid.....	64
6.4.2.	Rankine-Prozesse mit Mischungen als Arbeitsfluide.....	67
6.4.3.	Untersuchte Prozesse.....	69
6.4.4.	Prozessoptimierung und Ergebnisse aus der Literatur	69
7.	Ergebnisse der Prozessoptimierungen.....	75
7.1.	Ergebnisse der Prozesssimulationen bei Verwendung von Reinstoffen	75
7.1.1.	C ₃ H ₈ Propan – 74-98-6.....	75
7.1.2.	C ₄ H ₁₀ Isobutan – 75-28-5.....	78
7.1.3.	C ₄ H ₁₀ n-Butan (R600) – 106-97-8	83
7.1.4.	C ₅ H ₁₂ Isopentan – 78-78-4.....	87
7.1.5.	C ₅ H ₁₂ n-Pentan – 109-66-0.....	92
7.1.6.	C ₆ H ₁₄ n-Hexan – 110-54-3	95
7.1.7.	C ₇ H ₁₆ n-Heptan – 142-82-5	96
7.1.8.	C ₃ H ₆ Propen – 115-07-d1.....	97
7.1.9.	C ₄ H ₈ Trans-2-Buten – 624-62-6.....	100
7.1.10.	C ₇ H ₈ Toluol – 108-88-3	103
7.1.11.	C ₂ H ₄ F ₂ R152a – 75-37-6	104
7.1.12.	C ₂ H ₂ F ₄ R134a – 811-97-2.....	109
7.1.13.	C ₃ HF ₇ R227ea – 460-89-0.....	111
7.1.14.	C ₃ H ₃ F ₅ R245fa – 460-73-1	114
7.1.15.	NH ₃ Ammoniak – 7664-41-7	117
7.2.	Ergebnisse der Prozesssimulation bei Verwendung von Mischungen.....	120
7.2.1.	C ₃ H ₈ Propan und C ₄ H ₁₀ Isobutan	121
7.2.2.	C ₃ H ₈ Propan und C ₆ H ₁₂ n-Hexan	125
7.2.3.	C ₂ H ₄ F ₂ R152a und C ₃ H ₃ F ₅ R245fa.....	128
7.2.4.	NH ₃ Ammoniak und H ₂ O Wasser.....	137
8.	Sensitivitäten.....	142
8.1.	Rankine-Prozesse mit Reinstoffen und Mischungen ohne Konzentrationsänderungen.....	144
8.1.1.	Einfluss des Frischdampfdrucks bezogen auf den kritischen Druck des Arbeitsfluids.....	144
8.1.2.	Einfluss des Frischdampfdrucks am Beispiel der Verwendung von Pentan, Butan und R245fa.....	145
8.1.3.	Einfluss der internen Wärmerückgewinnung.....	148



8.1.4.	Einfluss des Turbinenwirkungsgrades	149
8.1.5.	Einfluss der Thermalfluidtemperatur am Eintritt auf verschiedene Prozessführungen	150
8.2.	Rankine-Prozesse mit Mischungen und Nutzung von De- und Absorption zur Konzentrationsänderung	153
8.2.1.	Einflüsse von Prozessparametern	153
8.2.2.	Einfluss des Turbinenwirkungsgrades bei Prozessen mit Konzentrations-änderung	155
8.2.3.	Einfluss der Thermalfluidtemperatur am Eintritt bei Prozessen mit Arbeitsfluidmischungen	156
8.3.	Genereller Einfluss der Wärmeauskopplung	158
8.4.	Einfluss der Rückkühlung	159
8.5.	Anlagennettoleistungen mit Berücksichtigung des elektrischen Eigenbedarfs der Thermalfluidförderung	161
9.	Zusammenfassung	164
10.	Literatur	168
	Angaben zur Leistungsaufnahme der Thermalfluidförderung	180
	Eigenschaften von Gemischen	181
	Abbildungen – Ergebnisse	182