

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xiii
Nomenklatur	xvii
1. Einleitung	1
2. Einteilung und Beschreibung von Systemvarianten	5
2.1 Prozessführung Wasser	6
2.2. Prozessführung Material	7
2.3 Ausgewählte TCES Labor- und Pilotanlagen	9
2.3.1. Geschlossene Adsorption im Vakuum	9
2.3.2 Offene Adsorption mit und ohne Speichermaterialtransport . .	10
2.3.3 Geschlossene Absorptionssysteme im Vakuum	11
2.3.4. Offene Absorptionssysteme	12
2.4. Energetische Bilanzierung der Prozessführungen	12
2.4.1. Entscheidungskriterien zur offenen oder geschlossenen Pro- zessführung Wasser	12
2.4.2 Entscheidungskriterien zur Prozessführung Material	15
2.5. Beschreibung des betrachteten Anlagenkonzepts	15
2.6. Fazit der Systemvarianten	17
3. Methodik der Speichermaterialuntersuchung	19
3.1. Konstruktion eines Versuchsstands zur Überprüfung der Materialei- genschaften	19
3.1.1. Aufbau des Versuchsstandes	20
3.1.2. Verwendete Messtechnik	21
3.1.3. Versuchsdurchführung	22
3.2. Definition und Berechnung der Speicherdichte	23
3.3 Massenspezifische Reaktionsenthalpie und adiabate Temperaturerhö- hung	24
3.4 Fazit zur Methodik	24
4. Untersuchung von Hydratation und Sorption	25
4.1 Hydratation	25
4.1.1 Reaktionsenthalpie	26
4.1.2. Thermodynamisches Gleichgewicht	26
4.1.3. Hydratationsgrad	27
4.2. Adsorption	27
4.2.1 Beschreibung des Adsorptionsgleichgewichts	28
4.2.2. Langmuirisothermen	28

4.2.3	Dubinín–Astakhov–Ansatz	29
4.3.	Experimentelle Untersuchungen an Salzhydraten	29
4.3.1	Laboruntersuchungen an Magnesiumsulfat	30
4.3.2.	Laboruntersuchungen an Calciumchlorid	33
4.4.	Experimentelle Untersuchungen an Zeolithen	35
4.4.1	Laboruntersuchungen an Zeolith 4A	35
4.4.2.	Laboruntersuchungen an Zeolith 13X und Zeolith 13XBF	37
4.5	Fazit zu den Hydratations- und Sorptionsreaktionen	38
5.	Untersuchung an Kompositen	39
5.1.	Kompositmaterial mit passivem Träger	39
5.2.	Kompositmaterial mit aktivem Träger	41
5.2.1.	REM-Analyse	42
5.2.2	Hydrothermale Stabilität	44
5.3.	Fazit der Kompositmaterialuntersuchungen	46
6.	Numerische Modellierung des Reaktors zur Simulation einer TCES Anlage	47
6.1.	Beschreibung des Reaktormodells	47
6.1.1.	Zugrunde liegende Annahmen	47
6.1.2.	Mathematische Beschreibung des Reaktormodells	49
6.2	Aufbau einer Demonstrationsanlage zur Validierung des Reaktormodells	50
6.2.1	Reaktordesign	51
6.2.2.	Materialtransportsystem	52
6.2.3	Peripherie	53
6.2.4.	Verwendete Messtechnik	53
6.2.5	Temperaturmessstellen	54
6.3	Experimentelle Untersuchungen	56
6.3.1	Versuchsdurchführung	56
6.3.2.	Versuchsauswertung	57
6.3.3.	Kontinuierliche Desorption	57
6.3.4.	Kontinuierliche Adsorption	60
6.4.	Validierung des numerischen Reaktormodells	62
6.5.	Fazit zum Reaktormodell	65
7.	Jahressimulationen zur Bestimmung der thermischen Leistungsfähigkeit	67
7.1	Beschreibung von Klima, Gebäude und Warmwasserbedarf	67
7.2.	Definition wichtiger Kennzahlen zur Bewertung solarthermischer Anlagen	69
7.3.	Das Referenzsystem	70
7.3.1	Randbedingungen zur Simulation	71
7.3.2	Simulationsergebnisse der Referenzsysteme	72
7.4	Das TCES-System	75
7.4.1	Randbedingungen zur Simulation	75
7.4.2.	Simulationsergebnisse bei konstanten Materialspeichervolumen (TCES 1)	78
7.4.3.	Sensitivitätsanalyse	82

7.4.4	Simulationsergebnisse bei konstanter Kollektorfeldgröße (TCES 2)	85
7.4.5.	Simulationsergebnisse bei vergleichbarer Anlagendimensionierung (TCES 3)	86
7.5	Vergleich zwischen Referenz- und TCES-System	88
7.6.	Fazit der Jahressimulationen	89
8.	Ökobilanzierung	91
8.1.	Zielsetzung und Randbedingungen	91
8.2.	Lebenszyklus Inventar (LCI)	92
8.3	Recycling Prozesse und Gutschriften	93
8.4.	Lebenszyklus Analyse (LCA)	94
8.4.1	Fixe und variable Beiträge zur LCA	95
8.4.2.	Vergleich der Heizungssysteme	97
8.5	Fazit der Ökobilanzierung	101
9.	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	103
9.1.	Geldmarkt- und Energiepreisentwicklung	103
9.1.1.	Geldmarktentwicklung	103
9.1.2.	Energiepreisentwicklung	104
9.2.	Investition und Betriebskosten	105
9.2.1	Bestimmung der Investition der Anlagen	105
9.2.2	Bestimmung der Betriebskosten und Barwert	107
9.3.	Kapitalwert und Amortisationszeit	108
9.4.	Vollkostenrechnung	111
9.5.	Fazit der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	112
10.	Zusammenfassung	115
11.	Schlussfolgerung und Ausblick	119
	Literaturverzeichnis	121
A.	Anhang zu den Materialuntersuchungen (Kapitel 3 bis 5)	127
A.1	Feuchte Luft	127
A.2.	Kalibrierung der Thermoelemente	128
A.3	Fehlerabschätzung	128
A.4.	Herstellung der Kompositmaterialien	129
A.4.1.	Herstellung des Komposits mit passivem Trägermaterial	129
A.4.2.	Herstellung des Komposits mit aktivem Trägermaterial	129
A.5.	Bilder der untersuchten Speicheranordnungen	131
B.	Anhang zum Reaktormodell (Kapitel 6)	135
B.1	Idealer Gegenstromreaktor - Type 349	135
B.2.	Materialtransport im Labordemonstrator	137
C.	Anhang zu den Jahressimulationen (Kapitel 7)	139
C.1.	Wetterdaten Standort Würzburg	139
C.2	Kollektorkennwerte	139

C.3. Speicherkenndaten	140
C.4 Isothermen-Datentabelle	141
C.5 Jahressimulationen im SFH 30 Gebäude	143
D. Anhang zur Lebenszyklusanalyse (Kapitel 8)	145
D.1. LCI der einzelnen Komponenten des Heizungssystems	145
D.2. LCI der genutzten Recyclingprozesse	151
D.3. LCA der Anlagenkomponenten	155
D.4 Wärme- und Strombedarf der betrachteten Gebäude	158
E. Anhang zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Kapitel 9)	161
E.1. Investitionen der Kombianlagen und Gasbrennwertgeräte	161
E.2. Betriebskosten von Gasbrennwertgerät und Kombianlage	163
E.3. Kapitalwert und Amortisationszeit der Kombianlagen	164
E.4. Durchschnittlicher Wärmepreis aller Heizungsanlagen	165