

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur und Verzeichnisse	xiii
Abkürzungen	xiii
Formelzeichen	xv
Indizes	xvii
Abstract / Kurzfassung	xviii
1. Einleitung	1
2. Stand der Technik solarthermischer Kraftwerke	7
2.1. Technologien zur Stromerzeugung mit CSP	7
2.1.1. Linienfokussierende Systeme	7
2.1.2. Punktfokussierende Systeme	9
2.2. Komponenten eines Solarturmkraftwerkes	10
2.2.1. Heliostatenfeld	10
2.2.2. Turm	11
2.2.3. Receiver	11
2.2.4. Energiespeicher	14
2.2.5. Kraftwerksblock	14
2.3. Meilensteine der Salzturmtechnologie	15
2.3.1. Gemasolar (2011)	15
2.3.2. Crescent Dunes	16
3. Eigenschaften und Anwendungen von Flüssigmetallen	19
3.1. Bisherige Anwendungen von Flüssigmetallen	20
3.1.1. Kernreakorteknik	20
3.1.2. Auslassventile in Verbrennungsmotoren	21
3.1.3. CPU-Kühler für PCs	21

3.1.4.	Flüssigmetallbatterien	21
3.2.	Flüssigmetalle in Solarkraftwerken	21
3.2.1.	Sandia CRTF (Central Receiver Test Facility)[24]	22
3.2.2.	CRS-Natriumreceiver auf der PSA	23
3.2.3.	Jemalong Solar Thermal Station	27
3.3.	Potenzielle Flüssigmetalle in Solarkraftwerken	29
3.4.	Eigenschaften der Flüssigmetalle als WTM	31
3.4.1.	Thermohydraulische Eigenschaften	32
3.4.2.	Wärmestromdichtelimit	33
3.4.3.	Receivergeometrie, Druckverlust und Wärmeübergang	39
3.4.4.	Begleitheizung, Korrosion und Lebensdauer	48
3.4.5.	Einfrier- und Auftauvorgänge im Receiver	51
3.4.6.	Förderung und Messtechnik	54
3.4.7.	Reaktivität und Toxizität	55
3.4.8.	Erfahrung und Sicherheit	56
3.4.9.	Verfügbarkeit und Kosten	57
4.	Kraftwerkskonzepte und -komponenten für Flüssigmetallreceiver	59
4.1.	Einteilung der Kraftwerkskonzepte für Flüssigmetallreceiver	59
4.1.1.	Anbindung an eine Dampfturbine	59
4.1.2.	Anbindung an eine Gasturbine	61
4.1.3.	AMTEC - Alkali Metal Thermal to Electric Converter	62
4.1.4.	LM MHD Generator - Liquid Metal Magnetohydrodynamic Generator	63
4.1.5.	Flüssigmetalldampfturbine	64
4.2.	Thermische Energiespeicher für Flüssigmetallsysteme	64
4.2.1.	Modellierung der thermischen Speicherkonzepte	65
4.2.2.	Ergebnisse und Vergleich mit Literaturdaten	66
4.3.	Elektromagnetische Pumpen (EMP) und Wärmeübertrager	69
4.3.1.	Konduktionspumpe	69
4.3.2.	Induktionspumpe	70
4.3.3.	Wärmeübertrager mit Flüssigmetallen	70

5. Receivermodellierung ASTRID[®]	73
5.1. Analytische Vorauslegung von Rohrreovern	74
5.1.1. Funktionsumfang und Programmstruktur	74
5.1.2. Berechnung der Receivergeometrie	82
5.1.3. Thermohydraulische Berechnung	85
5.1.4. Berechnung der Receiverkosten	89
5.2. Thermische Receivermodellierung mit FEM	92
5.2.1. Geometrieerstellung und Netzgenerierung	93
5.2.2. Randbedingungen	95
5.2.3. Temperaturregelung und Teillastverhalten	98
5.2.4. Netzstudie	100
5.3. Validierung des ASTRID-Receivermodells	102
5.3.1. Validierung mit CFD-Modell	102
5.3.2. SOLUGAS-Projekt	105
5.3.3. SolarTwo-Projekt	109
6. Konzeptauswahl, Bewertungsmethodik und Spezifikation	117
6.1. Übergeordnete Annahmen	117
6.1.1. Basiskonzept und Leistungsklasse	118
6.1.2. Kraftwerksblock	122
6.1.3. Standort und Auslegungszeitpunkt	124
6.1.4. Heliostatenfeldauslegung	124
6.1.5. Receivermodellierung und Wärmeträgermedium	126
6.1.6. Leitungssystem und thermischer Energiespeicher	127
6.2. Bewertungsmethodik und LCOE-Berechnung	130
6.2.1. Systemmodellierung und Jahresertragsberechnung	133
6.2.2. Kostenmodelle	133
7. Vergleichsstudie Mehrturmsystem (5x140 MW)	141
7.1. Ergebnisse der Komponentenauslegung	141
7.1.1. Heliostatenfeldauslegung	141
7.1.2. Receivermodellierung	146
7.2. Ergebnisse der LCOE-Berechnung	149
7.2.1. Solar Salt im Vergleich zu Natrium	149
7.2.2. Sensitivitätsanalyse des Feldwirkungsgrades	152

Inhaltsverzeichnis

7.2.3. Solar Salt im Vergleich zu Blei-Bismut	154
7.2.4. Kostenanalyse der Wärmeträgermedien	155
8. Vergleichsstudie Einturmsystem (700 MW-Receiver)	159
8.1. Ergebnisse der Komponentenauslegung	159
8.1.1. Heliostatenfeldauslegung	159
8.1.2. Receivermodellierung	162
8.2. Ergebnisse der LCOE-Berechnung	168
8.3. Vergleich von Einturm- u. Mehrturmsystemen	172
Zusammenfassung und Ausblick	173
A. Stoffwerte	177
B. Spannungsuntersuchung des Auftauvorgangs eines mit Natrium befüllten Rohres	181
C. Berechnung der Rohrwandstärken	183
D. Druckverlustberechnung im Receiver	185
E. Verwendete Nusselt-Korrelationen	187
F. Receivermodell 502 in HFLCAL	189
G. Spezifikationstabellen der Mehrturmsysteme	191
G.1. Übersicht der Konfigurationen	191
G.2. Konzeptskizzen	192
G.3. Standort und Auslegungspunkt	198
G.4. Spezifikation Referenzsystem Solar Salt und Rec-only mit Natrium	199
G.5. Spezifikation Referenzsystem Solar Salt und Receiver-only mit LBE	210
G.6. Spezifikation Referenzsystem Solar Salt und Tower-loop mit Na- trium	213
H. Spezifikationstabellen der Einturmsysteme	215
H.1. Übersicht der Konfigurationen	215
H.2. Standort und Design Point	216

H.3. Spezifikation Referenzsystem Solar Salt und Rec-only mit Natrium 217

H.4. Spezifikation Referenzsystem Solar Salt und Tower-loop mit Natrium 229