

# Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen .....	VIII
1. Einleitung .....	1
1.1 Solarthermische Stromerzeugung .....	1
1.2 Thermische Energiespeicher für Solarkraftwerke .....	2
1.2.1 Thermische Energiespeicher als Pufferspeicher.....	2
1.2.2 Thermische Energiespeicher als Kurzzeitspeicher .....	4
1.3 Parabolrinnen-Solarkraftwerke .....	6
1.4 Aufgabenstellung .....	8
2. Technische Konzepte für thermische Energiespeicher .....	10
2.1 Prinzipielle Überlegungen zu Speicherkonzepten .....	10
2.2 Mitteltemperatur-Speicherkonzepte .....	15
2.3 Vorstudien zu thermischen Energiespeichern für Parabolrinnen- Solarkraftwerke .....	15
2.4 Phasenwechsel-Speicher .....	17
2.4.1 Vorstudien zu Phasenwechsel-Speichern.....	17
2.4.2 Spezifische Charakteristika eines Phasenwechsel-Speichers.....	18
2.4.3 Konstruktive Überlegungen zu Phasenwechsel-Speichern .....	21
2.4.4 Notwendige Untersuchungsschwerpunkte bei Phasenwechsel-Speichern.....	22
3. Wärmetransportvorgänge in Phasenwechsel-Speichern .....	23
3.1 Allgemeine Beschreibung der Wärmetransportvorgänge .....	23
3.2 Mathematische Modellierung der Wärmetransportvorgänge.....	26
3.2.1 Instationäre Wärmeleitung mit Phasenwechsel .....	26
3.2.2 Freie Konvektion .....	31
3.3 Herleitung der dimensionslosen Kennzahlen .....	32
3.3.1 Freie Konvektion ohne Phasenwechsel .....	32
3.3.2 Freie Konvektion beim quasistationären Aufschmelzen .....	34

---

3.3.3	Freie instationäre Konvektion ohne Phasenwechsel.....	37
3.3.4	Ansätze für die Kennzahlzusammenhänge.....	37
3.4	Bisherige Untersuchungen.....	37
3.4.1	Freie Konvektion ohne Phasenwechsel.....	38
3.4.2	Freie Konvektion mit Phasenwechsel.....	40
4.	Experimentelle Untersuchungen.....	44
4.1	Versuchsprogramm.....	44
4.2	Testmodule.....	47
4.2.1	Doppelrohr-Testmodule und Instrumentierung.....	47
4.2.2	Rohrregister-Testmodul und Instrumentierung.....	50
4.3	Untersuchungsmethode.....	53
4.3.1	Anmerkungen zum anwendungsnahen Ansatz.....	53
4.3.2	Meß- und Berechnungsgrößen Doppelrohr-Module.....	56
4.3.3	Meß- und Berechnungsgrößen Rohrregister-Modul.....	59
4.3.4	Definition der Nußelt-Zahl.....	60
4.4	Speichermaterialien.....	61
4.4.1	Materialauswahl.....	61
4.4.2	Stoffwerte der verwendeten Phasenwechselmaterialien.....	63
4.5	Versuchsanlagen.....	65
4.5.1	Wärmeträgeröl-Anlage.....	65
4.5.1.1	Anlagenbeschreibung.....	65
4.5.1.2	Meß-, Steuer-, Regel-System.....	68
4.5.1.3	Besonderheiten der Meßtechnik.....	69
4.5.1.4	Stoffwerte des Wärmeträgeröls.....	70
4.5.2	Hochdruck-Wasser/Dampf-Anlage HIPRESS.....	70
4.5.2.1	Anlagenbeschreibung.....	70
4.5.2.2	Speichereperimente an der HIPRESS-Anlage.....	73
4.6	Fehlerabschätzung.....	74
4.6.1	Unsicherheit der Stoffwertangaben.....	74
4.6.1.1	Wärmeträgeröl.....	74
4.6.1.2	Speichermaterialien.....	74
4.6.2	Fehlerabschätzung Durchflußmessung.....	76
4.6.3	Fehlerabschätzung Temperaturmessung.....	76
4.6.4	Fehlerabschätzung Berechnung der Rohraußenwand- Temperatur.....	77

---

4.6.5	Gesamtfehler.....	79
5.	Versuchsergebnisse.....	80
5.1	Allgemeine Darstellung eines Speicherzyklus.....	80
5.1.1	Beladen eines Speichermoduls.....	80
5.1.2	Entladen eines Speichermoduls.....	83
5.2	Wärmeübergang beim Beladen.....	85
5.2.1	Nußelt-Zahl als Funktion der Rayleigh-Zahl.....	85
5.2.2	Nußelt-Zahl als Funktion des Rohrdurchmessers.....	88
5.2.3	Untersuchungen am nicht-eutektischen Phasenwechselmaterial NaNO <sub>3</sub> /KNO <sub>3</sub> .....	90
5.2.4	Untersuchungen am niedrigschmelzenden Phasenwechselmaterial HITEC.....	93
5.2.5	Vergleich der Ergebnisse an einem Rohrregister-Speicher.....	97
5.2.6	Einfluß der Unterkühlung des Phasenwechselmaterials auf den Wärmeübergang.....	100
5.2.7	Einfluß der Stefan-Zahl auf den Wärmeübergang.....	103
5.3	Wärmeübergang beim Entladen in der Flüssigphase.....	104
5.4	Diskussion der Ergebnisse und Vergleich mit der Literatur.....	107
5.5	Anmerkungen zu möglichen Korrosionsproblemen.....	110
6.	Konzepte für Rohrregister-Speicher mit Phasenwechselmaterial.....	114
6.1	Weiterführende Speicherexperimente.....	114
6.1.1	Größerer Laborspeicher mit Öl als Wärmeträgerfluid.....	114
6.1.2	Laborspeicher mit Wasser/Dampf als Wärmeträgerfluid.....	116
6.2	Entwurf für einen 200 MWh Kurzzeitspeicher.....	120
6.2.1	Randbedingungen und Dimensionierung.....	120
6.2.2	Konstruktive Detaillösungen.....	124
6.2.3	Modularer 200 MWh <sub>th</sub> Phasenwechsel-Speicher.....	125
6.3	Phasenwechsel-Speicher im MWh-Maßstab mit Thermalöl als Wärmeträgerfluid.....	126
7.	Zusammenfassung und Schlußfolgerungen.....	128
	Literatur.....	132