



**Deutsches Zentrum für
Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Technische Thermodynamik**



**Hochschule Konstanz Technik,
Wirtschaft und Gestaltung
Fakultät Maschinenbau**

Numerische Analyse verschiedener Wärmeleitstrukturen für thermische Energiespeicher mit Phasenwechselmaterial

Bachelorarbeit

von

Bohdan Pankevych

Matrikelnummer 284 820

Studiengang Maschinenbau Konstruktion und Entwicklung

Betreuer: Prof. Dr. Werner Hofacker
HTWG Konstanz - Fakultät Maschinenbau

Dipl.-Ing. Julian Vogel
DLR - Institut für Technische Thermodynamik

Standort: Stuttgart
Pfaffenwaldring 38-40

Bachelorarbeit

für Herrn Bohdan Pankevych

Numerische Analyse verschiedener Wärmeleitstrukturen für thermische Energiespeicher mit Phasenwechselmaterial

Thermische Energiespeicher sind eine Schlüsseltechnologie für die effiziente und zuverlässige Nutzung solarthermischer Kraftwerke zur Stromerzeugung. Durch diese kann die schwankende Verfügbarkeit von Sonnenenergie gepuffert und somit an den Bedarf des Verbrauchers angeglichen werden. Eine Möglichkeit zur Speicherung thermischer Energie ist die Ausnutzung der Latentwärme eines Speichermediums. In einem Phasenwechselspeicher (auch Latentwärmespeicher) schmilzt ein festes Speichermedium (z.B. ein Nitratsalz) beim Beladen. Die Wärme wird mit Hilfe von Wärmeleitstrukturen von einem Wärmeträger (idealerweise Wasserdampf) auf das Speichermedium übertragen. Bei Bedarf kann mit der gespeicherten Energie wieder Dampf erzeugt und z.B. eine Dampfturbine betrieben werden.

Durch die Formgebung der Wärmeleitstruktur kann die Leistungsfähigkeit des Speichersystems auf die Anforderungen des zu Grunde liegenden Prozesses angepasst werden. Ein hoher Rippenanteil im Speicher verbessert die Wärmeübertragung zwischen Wärmeträger und Speicher, verringert jedoch auch die Speicherkapazität. In vielen Forschungsarbeiten wurden bereits einfache Strukturen untersucht; eine Optimierung speziell auf Phasenwechselspeicher steht jedoch noch aus. Aktuelle Forschungsarbeiten konzentrieren sich daher auf die Untersuchung verschiedener Strukturen, um ein optimiertes Design zu erarbeiten. Dabei kommen zunächst numerische Methoden zum Einsatz: In einem 2D-Schnitt wird die Wärmeleitung in der Wärmeleitstruktur und im Phasenwechselmaterial simuliert und der Leistungsverlauf aufgezeichnet. Diese Ergebnisse liefern die Grundlage für weitere Designoptimierungen und dienen als Datenbasis zur Auslegung von Wärmeübertragern für Phasenwechselspeicher.

Im Rahmen der Arbeit sollen folgende Teilaufgaben bearbeitet werden:

- Einarbeitung in die Funktionsweise von Phasenwechselspeichern und Wärmeübertragung mit Phasenwechsel
- Recherche, Bewertung und Design möglicher Rippenstrukturen
- Geometrie-, Gittererstellung, Konfiguration und Simulation verschiedener axialer Rippenstrukturen im Rahmen einer Parameterstudie
- Ermittlung von Gestaltungsrichtlinien zur gezielten Beeinflussung der Leistungsfähigkeit der Rippenstrukturen
- Charakterisierung der Ergebnisse anhand geeigneter Kriterien und Zusammenstellung in einer Datenbank

Die vorgenommenen Arbeiten und Ergebnisse sind in geeigneter Form zu dokumentieren.

Betreuer: Dipl.-Ing. Julian Vogel

DLR-Institut für Technische Thermodynamik

Kurzzusammenfassung

Die vorliegende Arbeit handelt von der Untersuchung verschiedener Wärmeleitstrukturen im Rahmen einer numerischen Studie am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Im Zuge der Erforschung der erneuerbaren Energiequellen liegt einer der Schwerpunkte des Instituts für Technische Thermodynamik am Standort Stuttgart in der Entwicklung von thermischen Energiespeichern. Speicher mit Phasenwechselmaterial werden als Elemente zur direkten Dampferzeugung in thermischen Kraftwerken und für Industrieprozesse eingesetzt. Aufgrund der hierbei auftretenden Herausforderungen müssen Wärmeleitstrukturen zur Steigerung der Leistungsfähigkeit entworfen und umgesetzt werden. Zunächst erfolgt die Beleuchtung von Chancen und Herausforderungen dieser Technologie, einschließlich einer Übersicht potenzieller Lösungsmöglichkeiten. Ferner werden bereits eingesetzte Wärmeleitstrukturen vorgestellt. Es erfolgt eine kurze Zusammenfassung der theoretischen und numerischen Grundlagen zur Durchführung der 2D-Simulationen. Die simulierten Wärmeleitstrukturen werden in drei verschiedenen Speichermodifikationen eingesetzt. Es erfolgt eine Evaluierung geeigneter Beurteilungskriterien für die Bewertung der einzelnen Strukturen sowie die Vereinfachung und Zusammenfassung der Ergebnisse in einer Strukturdatenbank. Hierzu werden numerische Untersuchungen an unverzweigten, einfach verzweigten und zweifach verzweigten Strukturen durchgeführt. Aus den gewonnenen Daten werden Richtlinien für die Konstruktion von weiteren Wärmeleitstrukturen ermittelt sowie Funktionsmechanismen zur Beeinflussung des Entladeverhaltens beschrieben. Es erfolgt eine Überprüfung der Plausibilität der ermittelten Richtlinien anhand der Konstruktion einer neuen Wärmeleitstruktur. Schlussendlich wird ein Ausblick mit Anregungen für weitere Untersuchungen und mögliche Entwicklungsrichtungen gegeben.

Inhalt

<i>Kurzzusammenfassung</i>	<i>iv</i>
<i>Selbständigkeitserklärung</i>	<i>v</i>
<i>Nomenklatur</i>	<i>viii</i>
1. Allgemeine Erläuterungen und Stand der Technik	1
1.1 Verschiedene Arten von thermischen Energiespeichern	1
1.2 Thermische Speicher mit Phasenwechselmaterial	2
1.2.1 Materialien	2
1.2.2 Einsatzgebiete	3
1.3 Vorteile von Latentwärmespeichern bei der solaren Stromerzeugung	5
1.4 Steigerung der Leistungsfähigkeit von Latentwärmespeichern	5
1.4.1 Verbesserung der Leitfähigkeit	6
1.4.2 Vergrößerung der Kontaktfläche	7
1.5 Radiale und Axiale Wärmeleitstrukturen	9
1.6 Ziele der vorliegenden Arbeit	11
2. Numerische Modellgleichungen	13
2.1 Allgemeine Energiegleichung	13
2.2 Das Erstarren/Schmelzen-Modell	13
2.3 Die numerische Diskretisierung	14
3. Bestimmung von Beurteilungskriterien und Grenzwerten der möglichen Leistungsfähigkeit	17
3.1 Stoffdatenmittelung	17
3.2 Wahl der Beurteilungsgrößen	19
3.3 minimale und maximale theoretische Leistungsfähigkeit	23
4. Parameterstudie an unverzweigten Strukturen	27
4.1 Vorauswahl der Grundstruktur	27
4.2 Parametrisierung der Sternrippe für weitere Berechnungen	28
4.3 Validierung der Vereinfachung	31
4.4 Netzstudie	32
4.5 Zeitschrittstudie	33
4.6 Einfluss des Zielresiduums	34
4.7 Ergebnisse der Parameterstudie	35
4.7.1 Ergebnisse für den 70 mm-Rohrabstand.....	35
4.7.2 Ergebnisse für den 100 mm-Rohrabstand.....	36

4.7.3	Ergebnisse für den 160 mm-Rohrabstand.....	37
4.8	Kritische Betrachtung der Leistungskurven	38
4.9	Kritische Betrachtung der Maximalwertreferenz.....	39
4.10	Ausschnitt aus der Datenbank: unverzweigte Strukturen	40
5.	<i>Parameterstudie an verzweigten Strukturen</i>	43
5.1	Verzweigte Strukturen für den 70 mm-Rohrabstand	43
5.1.1	Einarmig einfach verzweigt	43
5.1.2	Zweiarmig einfach verzweigt.....	44
5.1.3	Einarmig doppelt verzweigt	46
5.2	Verzweigte Strukturen im 160 mm-Gebiet.....	48
5.2.1	Einarmig einfach verzweigt	48
5.2.2	Zweiarmig einfach verzweigt.....	49
5.2.3	Einarmig doppelt verzweigt	51
5.3	Ausschnitt aus der Datenbank: verzweigte Strukturen	52
6.	<i>Freie Gestaltung einer eigenen Struktur</i>	55
6.1	Warum ist die Organic-Rippe so leistungsfähig?.....	55
6.2	Die umzusetzenden Konstruktionsrichtlinien.....	56
6.3	Entwicklung der Hex-Struktur	58
6.3.1	Bionischer Ansatz	58
6.3.2	Umsetzung der Konstruktionsrichtlinien.....	60
6.4	Entladungsverlauf der Hex-Struktur und Vergleich mit den vorhandenen Strukturen.....	61
6.4.1	Entladungsverlauf und Vergleich mit der Organic-Rippe	61
6.4.2	Vergleich mit Tellerrippe und Snowflake-Rippe durch Skalierung	63
6.5	Kritik und Anmerkungen zur erstellten Struktur.....	64
7.	<i>Abschlussbetrachtung</i>	65
7.1	Zusammenfassung.....	65
7.2	Fazit und Ausblick.....	65
	<i>Quellenverzeichnis.....</i>	67
	<i>Abbildungsverzeichnis.....</i>	71
	<i>Tabellenverzeichnis.....</i>	73
	<i>Anhang.....</i>	75