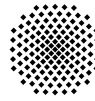




Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.  
in der Helmholtz-Gemeinschaft



Universität Stuttgart

# Diplomarbeit

von cand. umw. Thomas Meyer

Matrikelnummer: 2182078

## Modellierung des Schmelzens und Erstarrens von Latentwärmespeichermaterialien in Rippengeometrien

Betreuer: Dr. Thomas Bauer  
Abteilung Thermische Prozesstechnik, Institut für Technische Thermo-  
dynamik am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Prüfer: Professor Dr. Dr.-Ing. habil. H. Müller-Steinhagen  
Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik an der Universität Stuttgart

Ausgegeben: 01.11.2008  
Abgegeben: 30.04.2009

## Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit war es, Wärmetransportmechanismen in Latentwärmespeichern mit berippten Rohren zu beschreiben. Der Schwerpunkt lag auf der expliziten Ermittlung der Erstarrungszeit des PCMs (engl.: Phase Change Material) beim Entladen eines Speichers. Innerhalb der Arbeit wurde anhand von numerischen Simulationen eine analytische Formel für die Erstarrungszeit entwickelt, die typische Stoffwerte von Rippen und PCM sowie Geometrieparameter und Randbedingungen enthält.

Die Simulationen wurden mit der Simulationssoftware FLUENT durchgeführt. Mit 324 simulierten Fällen wurde ein breites Feld an Variationsmöglichkeiten aller wichtigen Parameter untersucht. Durch Analyse der Ergebnisse erfolgte schließlich die Herleitung der Gesamtanalytischen Näherungsgleichung ( $t_{GNG}$ ) zur Berechnung der Erstarrungszeit. Mit Hilfe dieser Gleichung wurde eine Kostenabschätzung durchgeführt, in der Speicherkonfigurationen gleichen thermischen Verhaltens mit hoher Rohranzahl und wenigen Rippen, solchen mit wenigen Rohren und vielen Rippen gegenübergestellt wurden.

Aufgrund der in dieser Arbeit entwickelten analytischen Näherungsgleichung und deren Zerlegung in drei Faktoren ist es möglich, die instationären Wärmetransportmechanismen für berippte Rohre, die mit PCM umgeben sind, besser zu verstehen. Somit können die Einflüsse einzelner Parameter bei der Speicherauslegung leichter ermittelt werden. Da hierdurch die wichtigsten geometrischen Größen für die Auslegung eines Latentwärmespeichers nach Gesichtspunkten von Effizienz und Kosten erkennbar sind, kann diese Arbeit dazu beitragen, künftige Speicher weiter zu optimieren.

## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Hilfe Dritter angefertigt zu haben. Gedanken und Zitate, die ich aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommen habe, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen und wurde bisher nicht veröffentlicht.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass die Arbeit durch das Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden kann.

\_\_\_\_\_ , \_\_\_\_\_

## **Danksagung**

Bedanken möchte ich mich vor allem bei meinem Betreuer, Dr. Thomas Bauer, der mich mit großem Einsatz bei der Anfertigung dieser Arbeit unterstützte. Ebenso gilt mein Dank Professor Müller-Steinhagen für die Betreuung seitens der Universität Stuttgart durch das Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik. Desweiteren möchte ich mich bei allen meinen Kollegen der Abteilung Thermische Prozesstechnik des DLR für die fachlichen Anregungen sowie das tolle Umfeld herzlich bedanken. Ein besonderer Dank gilt auch meiner Familie, die mich während der Zeit meines Studiums tatkräftig unterstützte und somit dazu beigetragen hat, dass ich heute diese Arbeit vorlegen kann.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XIV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>6</b>
2.1 Instationäres Wärmeleitproblem mit Phasenwechsel . . . . .	6
2.1.1 Die exakte Lösung für die ebene Wand . . . . .	7
2.1.2 Die quasistationäre Näherung für die ebene Wand . . . . .	10
2.1.3 Die quasistationäre Näherung für Rohrgeometrien . . . . .	12
2.2 Literaturüberblick zu analytischen Gleichungen für den Phasenwechsel mit Rippengeometrie . . . . .	14
2.3 Effektive Eigenschaften von Verbundmaterialien und lokales thermisches Gleichgewicht . . . . .	16
2.3.1 Effektive Eigenschaften allgemein . . . . .	16
2.3.2 Effektive Eigenschaften für PCM-Verbundwerkstoffe . . . . .	17
2.4 Volumenmittelung und effektive Eigenschaften im PCM-Verbund mit berippten Rohren . . . . .	19
<b>3 Umsetzung in Fluent – Verifikation des Computercodes</b>	<b>23</b>
3.1 Eindimensionale Verifikation des Computercodes . . . . .	24
3.2 Zweidimensional axialsymmetrische Verifikation . . . . .	26

<b>4</b>	<b>Modellierung der perfekt leitenden Rippe</b>	<b>30</b>
4.1	Modell und Annahmen . . . . .	30
4.2	Vorgehensweise in FLUENT . . . . .	33
4.3	Ergebnisse . . . . .	33
4.3.1	Bezug auf axialen Wärmetransport von der Rippe . . . . .	34
4.3.2	Bezug auf radialen Wärmetransport von der Rohrwand . . . . .	36
4.4	Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	38
<b>5</b>	<b>Modellierung der endlichen Wärmeleitung in der Rippe</b>	<b>43</b>
5.1	Modell und Annahmen . . . . .	43
5.2	Vorgehensweise in FLUENT . . . . .	46
5.3	Ergebnisse . . . . .	48
5.3.1	Ansatz über axialen Wärmetransport von der Rippe . . . . .	49
5.3.2	Diskussion des Ansatzes mit axialem Wärmetransport . . . . .	52
5.3.3	Ansatz über radialen Wärmetransport mit quasistationärer Näherung . . . . .	52
5.3.4	Diskussion des Ansatzes mit radialem Wärmetransport . . . . .	56
5.4	Modifikation der quasistationären Näherung mit effektiven Stoffeigen- schaften für PCM und Rippe . . . . .	59
5.5	Analyse der Gesamtanalytischen Näherungsgleichung . . . . .	63
<b>6</b>	<b>Anwendung der Gesamtanalytischen Näherungsgleichung</b>	<b>67</b>
6.1	Anwendung der Gleichung auf den Technikumsspeicher . . . . .	67
6.1.1	Natriumnitratspeicher mit Aluminiumrippen . . . . .	68
6.1.2	Kaliumnitrat-Natriumnitratspeicher mit Graphitlamellen . . . . .	69
6.2	Sensitivitätsanalyse der Gesamtanalytischen Näherungsgleichung . . . . .	70
6.3	Vorgehensweise zur Optimierung einer Speicherkonfiguration . . . . .	71
6.4	Ergebnisse zur Kostenoptimierung einer Speicherkonfiguration . . . . .	75
6.5	Diskussion des Vorfaktors für die Rippengeometrie . . . . .	78

6.6 Auslegung eines $6h$ -Speichers . . . . .	80
<b>7 Zusammenfassung</b>	<b>81</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>88</b>
<b>A Herleitung zur transzendenten Gleichung</b>	<b>92</b>
<b>B Integration für die Quasistationäre Näherung in Rohrgeometrien</b>	<b>94</b>
<b>C Matlab Berechnungsdatei für den 1D-Eisstab</b>	<b>95</b>
<b>D Batch-file für das automatische Einlesen in FLUENT</b>	<b>97</b>