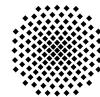




Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft



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 Prozessstechnik, 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 Rohrzahl 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 Thermo-dynamik 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. Des Weiteren 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

Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XIV
1 Einleitung	1
2 Theorie	6
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
3 Umsetzung in Fluent – Verifikation des Computercodes	23
3.1 Eindimensionale Verifikation des Computercodes	24
3.2 Zweidimensional axialsymmetrische Verifikation	26

4 Modellierung der perfekt leitenden Rippe	30
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
5 Modellierung der endlichen Wärmeleitung in der Rippe	43
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 Stoffeigenschaften für PCM und Rippe	59
5.5 Analyse der Gesamtanalytischen Näherungsgleichung	63
6 Anwendung der Gesamtanalytischen Näherungsgleichung	67
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
7 Zusammenfassung	81
Literaturverzeichnis	88
A Herleitung zur transzendenten Gleichung	92
B Integration für die Quasistationäre Näherung in Rohrgeometrien	94
C Matlab Berechnungsdatei für den 1D-Eisstab	95
D Batch-file für das automatische Einlesen in FLUENT	97