



Universität Stuttgart



Deutsches Zentrum
DLR für Luft- und Raumfahrt

Studienarbeit Nr. 3322

cand. M.Sc. ENT *Sebastian Gamisch*

**Untersuchung von Regeneratorspeichern im Verbund mit Phasen-
wechselspeichern zur Verbesserung des exergetischen Wirkungs-
grades**

-

**Investigation of regenerator heat storages in combination with
phase change storages for increased exergetic efficiency**

Anschrift: Seyfferstraße 10
70197 Stuttgart

Ausgabe: 20.10.2014

Abgabe:

Prüfer: Prof. PD Dr.-Ing. Uwe Schnell

Betreuer: Dipl.-Ing. Christian Odenthal

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst zu haben. Es wurden keine anderen als die angegebenen Quellen benutzt und alle wörtlichen oder sinngemäßen Aussagen aus anderen Werken wurden als solche gekennzeichnet. Die hier eingereichte Arbeit ist nicht Gegenstand eines anderen Prüfungsverfahrens gewesen. Des Weiteren wurde die vorliegende Arbeit weder vollständig noch in Teilen veröffentlicht. Das elektronische Exemplar dieser Arbeit stimmt mit dem hier schriftlich eingereichten Exemplar überein.

Stuttgart, XX.März 2015

.....

Studienarbeit Nr. 3322
für Herrn cand. M.Sc. ENT *Sebastian Gamisch*
Matr.-Nr. 2880309

**Untersuchung von Regeneratorspeichern im Verbund mit Phasen-
wechselspeichern zur Verbesserung des exergetischen Wirkungs-
grades**

-

**Investigation of regenerator heat storages in combination with
phase change storages for increased exergetic efficiency**

1. Problembeschreibung

Regeneratorspeicher bieten eine kostengünstige Möglichkeit thermische Energie zu speichern und zu einem späteren Zeitpunkt zur Verfügung zu stellen. Die Speichermasse besteht aus Formsteinen oder Schüttungen und wird zur Be- und Entladung des Speichers mit Luft durchströmt. Die Temperatur der austretenden Luft nimmt dabei mit der Zeit zu bzw. ab. In solarthermischen Kraftwerken werden Regeneratoren eingesetzt um die Stromerzeugung von der Sonneneinstrahlung zu entkoppeln. Für einen effizienten Kraftwerksbetrieb wird eine konstante Austrittstemperatur benötigt. Dies kann durch Kombination des Regeneratorspeichers mit einem Phasenwechselspeicher zeitweise erreicht werden.

2. Zielsetzung

Im Rahmen dieser Arbeit soll die Kombination aus einem Regenerator- und einem Phasenwechselspeicher untersucht werden. Mithilfe eines numerischen Modells sollen die Auswirkungen des Phasenwechselmaterials (PCM) auf das Temperaturprofil am Austritt des gesamten Speichers bei Be- und Entladung analysiert werden. Dies ermöglicht eine Aussage über Veränderungen des exergetischen Wirkungsgrades des Speichers sowie des gesamten Kraftwerksprozesses.

3. Durchzuführende Arbeiten

Ein bestehendes numerisches Modell zur Untersuchung von Regeneratorspeichern soll um die Komponente des Phasenwechselmaterials (PCM) erweitert werden. Durch Literaturrecherche wird zunächst eine geeignete Form der Integration des PCMs in einen Regeneratorspeicher ermittelt. Anschließend erfolgen die Modellierung des PCMs und die Implementierung in das bestehende Modell. Mithilfe von Parameterstudien sollen die Auswirkungen verschiedener Parameter, wie zum Beispiel des PCM-Anteils im Speicher und der Geometrien des PCMs, auf die Austrittstemperatur und damit die Effizienz des Speichers untersucht werden. Abschließend werden die Effekte des kombinierten Speichers auf die Effizienz eines solarthermischen Kraftwerks anhand eines bereits vorliegenden Modells betrachtet.

Die studentische Arbeit wird beim Institut für Technische Thermodynamik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) durchgeführt und dort von *Herrn Dipl.-Ing. Christian Odenthal* betreut. Die Betreuung am IFK erfolgt durch *Herrn Apl. Prof. PD Dr.-Ing. Uwe Schnell*.

Das Merkblatt zur Durchführung und Anfertigung von studentischen Arbeiten am IFK ist zu beachten, ebenso die „Hinweise für die Abwicklung von außerhalb der Hochschule angefertigten Diplomarbeiten“ (gilt auch für Masterarbeiten). Über den Fortgang der Arbeit ist in regelmäßigen Abständen (alle 4 – 6 Wochen) am IFK zu berichten.

Während der Bearbeitungszeit ist an 9 Seminarvorträgen teilzunehmen

Beginn der Arbeit: 20.10.2014

Abgabetermin: 20.04.2015



(Apl. Prof. PD Dr.-Ing. Uwe Schnell)

<u>Adresse/Kontakt Daten Betreuer/in (extern):</u> Christian Odenthal Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Pfaffenwaldring 38-40 70569 Stuttgart Telefon: +49 711 6862-789 Christian.Odenthal@dlr.de	<u>Adresse/Kontakt Daten des Studierenden:</u> Sebastian Gamisch Seyfferstraße 10 70197 Stuttgart Tel. +49 171 5390976 Sebastian.Gamisch@outlook.com
---	---

Kurzfassung

Thermische Energiespeicher bieten ein hohes Potential zur Kompensation von Schwankungen in der elektrischen Energieerzeugung. Eine Möglichkeit ist der Einsatz von sensiblen Regeneratorspeichern. Ein wesentlicher Vorteil dieser Technologie ist die Verwendung von kostengünstigen Speichermaterialien, wie Basalt oder Beton. Das feste Speichermaterial wird zur Be- und Entladung von einem Wärmeträgerfluid durchströmt. Dabei verändert sich mit der Zeit die Fluidaustrittstemperatur. Zur Stabilisierung der Austrittstemperatur können Phasenwechselmaterialien (engl. phase change material, PCM) eingesetzt werden.

In der vorliegenden Arbeit wird die Kombination von Regeneratoren mit Phasenwechselspeichern untersucht. Zur Beschreibung des transienten thermischen Verhaltens solcher Verbundspeicher wird ein bestehendes numerisches Modell adaptiert und anhand von Literaturdaten validiert. Mithilfe einer Parameterstudie werden vorteilhafte PCM-Anteile in den Verbundspeicher für hohe exergetische Wirkungsgrade, Gesamtwirkungsgrade und Nutzungsgrade ermittelt. Es erfolgt ein Vergleich zu rein sensiblen Regeneratoren im Hinblick auf die thermischen Eigenschaften, benötigte Speichermasse sowie die entstehenden Kosten für das Speichermaterial.

Abstract

Thermal energy storages offer a high potential to compensate fluctuations in the electrical power generation. Sensible heat regenerators represent an opportunity. The use of low cost storage materials like basalt and concrete is one of the biggest advantages of this technology. For charging and discharging a heat transfer fluid flows in direct contact through the solid storage material. During this process the fluid exit temperature is changing. To stabilize the exit temperature phase change material (PCM) can be used.

The present work investigates sensible heat regenerators in combination with phase change storages. To calculate the thermal behavior of those combined storages an existing numerical model is adapted. The model is validated against literature. A parametric study is carried out to identify the beneficial PCM-fractions within the storages for achieving high exergetic efficiencies, utilization and storage efficiencies. The combined heat storages are compared to sensible heat regenerators with respect to the thermal behavior, required mass of storage material and the overall costs of the storage material.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	I
Aufgabenstellung	II
Kurzfassung.....	IV
Abstract.....	IV
Inhaltsverzeichnis.....	V
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XII
Nomenklatur	XIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	2
1.3 Struktur der Arbeit	2
2 Derzeitiger Kenntnisstand.....	4
2.1 Eigenschaften regenerativer Energiespeicher	4
2.1.1 Sensible Regeneratorspeicher	4
2.1.2 Phasenwechselspeicher	6
2.2 Bestehendes Berechnungsmodell für sensible Regeneratorspeicher	8
2.2.1 Berechnungsverfahren	9
2.2.2 Randbedingungen.....	12
2.2.3 Materialeigenschaften.....	12
2.2.4 Wärmeübertragung	12
2.2.5 Druckverlustberechnung	14
2.2.6 Einfluss des Speichers auf die Effizienz solarthermischer Kraftwerke	14
2.3 Modellierung von Phasenwechselmaterial.....	16
2.4 Bisherige Untersuchungen zu Verbundspeicherkonzepten	18
2.5 Methodik dieser Arbeit.....	19
3 Adaptiertes Berechnungsmodell für Verbundspeicher	20
3.1 Speicheraufbau	20
3.2 Materialeigenschaften	21
3.3 Berechnungsverfahren.....	22

3.4	Druckverlustberechnung.....	23
3.5	Exergetischer Wirkungsgrad	24
3.6	Nutzungsgrad	25
4	Untersuchung verschiedener Kapazitätsfunktionen	27
4.1	Ausgewählte Funktionen.....	27
4.2	Genauigkeit der Energiebilanz des Phasenwechselmaterials	30
4.3	Auswirkungen auf die Rechenzeit.....	34
5	Validierung des adaptierten Berechnungsmodells	36
5.1	Untersuchter Speicheraufbau	36
5.2	Materialmodell des verwendeten Phasenwechselmaterials	37
5.3	Simulationsbedingungen	39
5.4	Vergleich der Simulationsergebnisse mit Literaturdaten	39
6	Parameterstudie zur Untersuchung von Verbundspeichern.....	41
6.1	Festlegung der Studienparameter	41
6.2	Auswahl des Phasenwechselmaterials	43
6.3	Netzstudie.....	44
6.4	Auswertung der Studienergebnisse	46
6.4.1	Gesamtwirkungsgrad	47
6.4.2	Speichermasse	53
6.4.3	Kombinierte Parameterabhängigkeiten.....	55
6.4.4	Kostenabschätzung.....	60
7	Zusammenfassung.....	65
8	Ausblick	67
9	Literaturverzeichnis.....	68
Anhang	71
A	Eingabeparameter des bestehenden Berechnungsmodells	71
B	Stoffwertrouninen für Luft.....	72
C	Normierte Feststoff- und Fluidtemperaturen der Netzstudie.....	72
D	Verzögerter Temperaturanstieg bei größerer Zeitschrittweite.....	73
E	Diskussion der Abhängigkeiten des exergetischen Wirkungsgrades	73
F	Diskussion der Abhängigkeiten des Nutzungsgrades	76
G	Gesamtwirkungsgrad aller Speichervariationen	79

H	Volumetrischer Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit von Partikelgröße und Speicherquerschnitt	80
I	Druckverlust in Abhängigkeit von Partikelgröße und Speicherquerschnitt	81
J	Speichermasse und volumetrischer Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit von Partikeldurchmesser und Speicherquerschnitt.....	82
K	Speichermaterialkosten für verschiedene Kostenannahmen	83

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Formvarianten des Speichermaterials. Links: Schüttungen; Mitte: Formsteine; Rechts: Massives Speichermaterial.....	5
Abbildung 2.2: Typische Temperaturfront innerhalb eines sensiblen Regeneratorspeichers zu verschiedenen Zeitpunkten [4]	6
Abbildung 2.3: Diskretisierungsschema eines Speichers im bestehenden Berechnungsmodell ...	10
Abbildung 3.1: Schema des Verbundspeicheraufbaus	20
Abbildung 3.2: Diskretisierungsschema für Verbundspeicher im adaptierten Berechnungsmodell	23
Abbildung 4.1: Verläufe der untersuchten Kapazitätsverläufe für Gauß-, Sinus- und Sprungfunktion sowie für die Sinus-Funktion mit Plateau	28
Abbildung 4.2: Verhältnis von numerisch und analytisch berechneter aufgenommener Energiemenge für verschiedene Zeitschrittweiten und Knotenzahlen. Links-Oben: Sprung-Kapazitätsfunktion; Rechts-Oben: Gauß-Kapazitätsfunktion; Links-Unten: Sinus-Kapazitätsfunktion; Rechts-Unten: Sinus-Plateau-Kapazitätsfunktion.....	32
Abbildung 4.3: Schematischer $c(T)$ Verlauf zur Verdeutlichung des numerischen Fehlers bei der Energieberechnung durch ein zu große Temperaturänderung zwischen zwei Zeitschritten	33
Abbildung 5.1: Links: Schematischer Aufbau des untersuchten Speichers zur Validierung des Berechnungsmodells. Die Pfeile deuten die Durchströmungsrichtung an. Rechts: Temperaturmessstellen innerhalb der PCM-Kapsel. [28]	36
Abbildung 5.2: Gemessener und approximierter Kapazitätsverlauf des Paraffins RT20	37
Abbildung 5.3: Links: Vergleich der berechneten Temperaturverläufe mit den von Arkar et al. simulierten und gemessenen Temperaturverläufen innerhalb des Speichers. Rechts: Vergleich der mit verschiedenen Diskretisierungsvarianten berechneten Temperaturverläufe.	40
Abbildung 6.1: Prozentuale Abweichungen der Feststofftemperatur $\Delta\theta_s^*$ (links) und der Fluidaustrittstemperatur $\Delta\theta_{f,aus}^*$ (rechts) von der Diskretisierungsvariante für $\Delta t = 0,5$ s und $kk_{pcm} = 450$ für ΔT_{mfa} von 85 K. Die Abweichungen sind für die verschiedenen Variationen von Δt über kk_{pcm} aufgetragen.	46
Abbildung 6.2: Gesamtwirkungsgrad zwischen 65 % und 100 % in Abhängigkeit von ΔT_{mfa} (oben), d_p (mittig) und A_{sp} (unten). Die Variationen des PCM-Anteils im Speicher r_{pcm} sind mit unterschiedlichen Symbolen gekennzeichnet.	49

Abbildung 6.3: Fluidaustrittstemperaturen für den Be- und Entladevorgang von Speichern mit den Parametern $\Delta T_{mfa} = 45 \text{ K}$, $A_{sp} = 600 \text{ m}^2$ und $d_p = 0,02 \text{ m}$. Es sind die Temperaturverläufe für verschiedene PCM-Anteile im Speicher gezeigt.	51
Abbildung 6.4: Feststofftemperaturen im letzten Zeitschritt der Beladung von Speichern mit den Parametern $\Delta T_{mfa} = 45 \text{ K}$, $A_{sp} = 200 \text{ m}^2$ und $d_p = 0,01 \text{ m}$. Es sind die Temperaturverläufe für verschiedene PCM-Anteile im Speicher gezeigt. Die vertikalen Linien entsprechen jeweils den Grenzen der PCM-Abschnitte in den beiden Verbundspeichern.	52
Abbildung 6.5: Speichermasse m_{sp} für die verschiedenen Varianten des PCM-Gehalts r_{pcm} . Die verschiedenen Varianten von r_{pcm} sind mit unterschiedlichen Symbolen gekennzeichnet.	54
Abbildung 6.6: Speichermasse m_{sp} aufgetragen über dem Gesamtwirkungsgrad η_{ges} . Es sind für die verschiedenen PCM-Anteile r_{pcm} im Speicher nur die Speichervarianten mit hohen Gesamtwirkungsgraden bei gleichzeitig geringen Speichermassen gezeigt.	54
Abbildung 6.7: Gesamtwirkungsgrad η_{ges} und Speichermasse m_{sp} in Abhängigkeit von dem Partikeldurchmesser d_p und dem Speicherquerschnitt A_{sp} . Die Graphen sind für verschiedene Varianten von ΔT_{mfa} und r_{pcm} gezeigt.	56
Abbildung 6.8: Gesamtwirkungsgrad η_{ges} und Speichermasse m_{sp} in Abhängigkeit von der zulässigen Austrittstemperaturänderung ΔT_{mfa} und dem PCM-Gehalt r_{pcm} . Die Graphen sind für verschiedene Varianten von d_p und A_{sp} gezeigt.	59
Abbildung 6.9: Gesamtkosten für das Speichermaterial K_{ges} für $k_{mverk,d0}$ von 500 €/t aufgetragen über dem Gesamtwirkungsgrad η_{ges} . Die verschiedenen PCM-Gehalte sind durch unterschiedliche Linien gekennzeichnet. Die drei Varianten für k_{mpcm} von 750 €/t , 500 €/t und 250 €/t werden durch verschiedene Symbolen markiert. Die unterbrochenen Linien repräsentieren die Kosten des rein sensiblen Speichers mit dem maximalen Gesamtwirkungsgrad aller Variationen.	62
Abbildung 6.10: Gesamtkosten für das Speichermaterial K_{ges} für $k_{mverk,d0}$ von 500 €/t aufgetragen über dem Gesamtwirkungsgrad η_{ges} für verschiedene Parametereinschränkungen. Die unterbrochenen Linien repräsentieren die Kosten des rein sensiblen Speichers mit dem maximalen Gesamtwirkungsgrad aller Variationen. Oben: Zulässige Austrittstemperaturänderung $\Delta T_{mfa} \geq 45 \text{ K}$; Mittig: Partikeldurchmesser $d_p \geq 0,05 \text{ m}$; Unten: Speicherquerschnittsfläche $A_{sp} \leq 600 \text{ m}^2$	63
Abbildung C.1: Ergebnisse der Netzstudie für ΔT_{mfa} von 85 K bei Variation der Zeitschrittweite Δt und Knotenzahl pro Meter PCM k_{kpm} . Links: Normierte Feststofftemperaturen an der	

Position des letzten Knotens im Speicher für k_{kpm} von 50; Rechts: Rechts: Normierte Fluidaustrittstemperatur.....	72
Abbildung D.1: Vergleich der Feststofftemperaturen des ersten Knotens für eine Zeitschrittweite von 0,5 s und 4 s bei einer Knotenzahl pro Meter PCM von 50. Es ergibt sich ein leicht verzögerter Temperaturanstieg bei der größeren Zeitschrittweite.	73
Abbildung E.1: Exergetischer Wirkungsgrad zwischen 65 % und 100 % in Abhängigkeit von ΔT_{mfa} (oben), dp (mittig) und Asp (unten). Die Variationen des PCM-Anteils im Speicher r_{pcm} sind mit unterschiedlichen Symbolen gekennzeichnet.	74
Abbildung E.2: Exergetischer Wirkungsgrad aller Variationen in Abhängigkeit von ΔT_{mfa} (oben), dp (mittig) und Asp (unten). Die Variationen des PCM-Anteils im Speicher r_{pcm} sind mit unterschiedlichen Symbolen gekennzeichnet.	75
Abbildung F.1: Nutzungsgrad zwischen 0 % und 100 % in Abhängigkeit von ΔT_{mfa} (oben), dp (mittig) und Asp (unten). Die Variationen des PCM-Anteils im Speicher r_{pcm} sind mit unterschiedlichen Symbolen gekennzeichnet.	77
Abbildung G.1: Gesamtwirkungsgrad aller Variationen in Abhängigkeit von ΔT_{mfa} (oben), dp (mittig) und Asp (unten). Die Variationen des PCM-Anteils im Speicher r_{pcm} sind mit unterschiedlichen Symbolen gekennzeichnet.	79
Abbildung H.1: Modifizierter volumetrischer Wärmeübergangskoeffizient α_v in einem Speicher über dem Partikeldurchmesser und der Speicherquerschnittsfläche. Der Wärmeübergangskoeffizient ist für eine mittlere Fluidtemperatur von 330 °C, einen Fluidmassenstrom von 100 kg/s und den Stoffeigenschaften von Basalt erstellt.....	80
Abbildung I.1: Druckverlust Δp in einem Speicher über dem Partikeldurchmesser und der Speicherquerschnittsfläche. Der Druckverlust ist für die Varianten für ΔT_{mfa} von 15 K und 55 K sowie r_{pcm} von 0 % und 5 % gezeigt.....	81
Abbildung J.1: Speichermasse und modifizierter volumetrische Wärmeübergangskoeffizient für die Variationen von dp und Asp . Die Speichermasse ist links für bei ΔT_{mfa} von 15 K und r_{pcm} von 0 % und rechts für r_{pcm} von 5 % gezeigt. Der modifizierte volumetrische Wärmeübergangskoeffizient ist für beide Graphen für eine mittlere Fluidtemperatur von 330 °C, einen Fluidmassenstrom von 100 kg/s und für die Stoffeigenschaften von Basalt dargestellt.....	82
Abbildung K.1: Gesamtkosten für das Speichermaterial K_{ges} für $k_{mverk,d0}$ von 750 €/t (oben) und 250 €/t (mittig) aufgetragen über dem Gesamtwirkungsgrad η_{ges} . Die verschiedenen PCM-Gehalte sind durch unterschiedliche Linien gekennzeichnet. Die drei Varianten für k_{mpcm} von 750 €/t, 500 €/t und 250 €/t werden durch verschiedene Symbole markiert. Unten sind die	

Gesamtkosten für ein kmverk,d0 und kmpcm von 100 €/t gezeigt. Die unterbrochenen Linien repräsentieren die Kosten des rein sensiblen Speichers mit dem maximalen Gesamtwirkungsgrad aller Variationen83

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1: Materialeigenschaften von NaNO_3 [25].....	27
Tabelle 4.2: Simulationsparameter zur Untersuchung der verschiedenen Kapazitätsverläufe	31
Tabelle 4.3: Benötigte Rechenzeit für die Berechnung der Wärmekapazität bei Verwendung der verschiedenen Kapazitätsfunktion für 100000 Zeitschritte	35
Tabelle 5.1: Geometriedaten des untersuchten Speicheraufbaus zur Validierung des Berechnungsmodell	36
Tabelle 5.2: Parameter für die approximierten Kurvenverläufe des gemessenen Kapazitätsverlaufs von RT20	38
Tabelle 5.3: Simulationsparameter zur Untersuchung der verschiedenen Kapazitätsverläufe	39
Tabelle 6.1: Parameter für die Durchführung der Parameterstudie.....	42
Tabelle 6.2: Materialeigenschaften von Basalt [30]	42
Tabelle 6.3: Auflistung der gewählten Parametervariationen	43
Tabelle 6.4: Materialeigenschaften von KOH und der beiden modifizierten PCMs KOH370 und KOH290	44
Tabelle 6.5: Parameter zur Durchführung der Netzstudie	45
Tabelle 6.6: Spezifische Materialkosten für sensibles Speichermaterial, Phasenwechselmaterial und Verkapselung.....	61
Tabelle A.1: Zu definierende Eingabeparameter im bestehenden Berechnungsmodell	71
Tabelle B.1: Stoffwertkorrelation für Luft	72

Nomenklatur

Abkürzungen

PCM	phase change material
NaNO ₃	Natriumnitrat
DSC	differential scanning calorimetry
RT 20	Phasenwechselmaterial der Firma Rubitherm
TM	trade mark
R	registriertes Warenzeichen
KOH	Kaliumhydroxid
KOH370	modifiziertes Kaliumhydroxid mit einer Schmelztemperatur von 370 °C
KOH290	modifiziertes Kaliumhydroxid mit einer Schmelztemperatur von 290 °C

Lateinische Buchstaben

A	Fläche	m ²
a	Koeffizient in der Kapazitätsfunktion	-
av	Oberflächen-Volumenverhältnis	1/m
c	spezifische Wärmekapazität	J/kg/K
Δc	Änderung der spezifischen Wärmekapazität	J/kg/K
d	Durchmesser	m
E	Energiemenge	J
ΔE	Energieänderung	J
ΔEx	Exergieänderung	J
h	Enthalpie	J/kg
i	Segmentindex	-
k	Gesamtanzahl der Segmente im Speicher	-
K	Kosten	€
km	spezifische Kosten	€/kg
L	Länge	m
m	Masse	kg
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
n	Zeitschrittindex	-
Nu	Nusselt-Zahl	-
P	elektrische Leistung	W
p	Druck	Pa
Δp	Druckverlust	Pa
Pr	Prandtl-Zahl	-
Q	Wärmemenge	J
r	prozentualer Speicheranteil	-
R	spezifische Gaskonstante	J/kg/K
Re	Reynolds-Zahl	-
s	Wandstärke	m
Δs	spezifische Entropieänderung	J/kg/k
t	Zeit	s

Δt	Zeitschrittweite	s
T	Temperatur	°C
ΔT	Temperaturänderung	K
u	Fluidgeschwindigkeit	m/s
\dot{V}	Volumenstrom	m ³ /s
x	Position im Speicher	m
Δx	Gitterweite	m
y	Parameter der Gauß-Kapazitätsfunktion	-

Griechische Buchstaben

α	Wärmeübergangskoeffizient	W/m ² /K
$\bar{\alpha}$	modifizierter Wärmeübergangskoeffizient	W/m ² /K
ε	Porosität	-
η	dynamische Viskosität	kg/m/s
η_{ex}	exergetischer Wirkungsgrad	-
η_{ges}	Gesamtwirkungsgrad	-
η_{nutz}	Nutzungsgrad	-
η_{vent}	Ventilatorwirkungsgrad	-
θ	normierte Temperatur	-
$\Delta\theta$	prozentuale Abweichung der normierte Temperatur	-
Λ	Parameter für Fluid Differentialgleichung	-
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/m/K
Π	Parameter für Feststoff Differentialgleichung	-
ρ	Dichte	kg/m ³
ϕ	normierte elektrische Leistung	-
φ	Phasenverschiebung	K
ω	Winkelfrequenz	1/K

Indizes

0	ohne Speicherinventar
A	Amplitude
a	ambient
ana	analytisch
auf	Aufnahme
aus	Austritt
be	Beladung
d0	Ausgangspartikeldurchmesser
ein	Eintritt
en	Entladung
end	Ende
f	Fluid
i	Knotenindex
initial	Initialwert
k	Gesamtanzahl der Segmente
K	Kraftwerk

kond	Kondensator
kpm	Knoten pro Meter
max	maximal
mfa	maximal zulässige Änderung Fluid am Austritt
min	minimal
netto	netto
nom	nominell
num	numerisch
o	oben
p	Partikel
p,f	isobar,Fluid
pcm	phase change material
pcm,f	phase change material flüssig
pcm,s	phase change material fest
pw	Phasenwechsel
ref	Referenz
RT20	Phasenwechselmaterial der Firma Rubitherm
s	solid
sens	sensibel
sf	solid-fluid
sin	Sinus
sm	schmelzen
sp	Speicher
sp	Sinus-Plateau
u	unten
v	volumetrisch
vent	Ventilator
verk	Verkapselung
vers	Versatz
wtf	Wärmeträgerfluid
wü	Wärmeübertragung
z	Zentrum

Exponenten

n	Zeitschrittindex
*	normiert

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der aktuelle Wandel der elektrischen Energieversorgung führt weltweit zu einem vermehrten Einsatz von regenerativen Energiequellen. Diese besitzen ein hohes Potential für die elektrische Energieerzeugung. Allerdings entstehen durch die eingeschränkte zeitliche Verfügbarkeit von regenerativen Energiequellen, wie beispielsweise der Solar- und Windenergie, Herausforderungen für die sichere Energieversorgung und einen stabilen Betrieb des elektrischen Energienetzes. Durch Energiespeicher können die zeitlichen Schwankungen in der Energieerzeugung kompensiert werden. Weiterhin ermöglichen Energiespeicher regelbare Kraftwerke auf Basis von regenerativen Energiequellen zur Stabilisierung des Netzbetriebes. Eine Möglichkeit ist der Einsatz von thermischen Energiespeichern, welche zum Beispiel in solarthermischen Kraftwerken eingesetzt werden. Solarthermische Kraftwerke wandeln die solare Einstrahlung zunächst in thermische Energie. Anschließend wird diese Energie in einem konventionellen Kraftwerksprozess in elektrische Energie gewandelt. Der wesentliche Nachteil solarthermischer Kraftwerke ist die Abhängigkeit der Stromerzeugung von der solaren Einstrahlung. Vor allem der Tag-Nacht-Wechsel und Schwankungen der solaren Einstrahlung führen zu einer diskontinuierlichen Stromerzeugung. Mithilfe von Energiespeichern ist es möglich, die thermische Energieerzeugung zeitweise von der elektrischen Energieerzeugung zu entkoppeln. Dadurch kann am Tag zusätzlich produzierte thermische Energie gespeichert werden, um das Kraftwerk nach Sonnenuntergang weiter betreiben zu können. Außerdem können Einstrahlungsschwankungen im Tagesgang ausgeglichen und regelbare Energie durch solarthermische Kraftwerke bereitgestellt werden.

Derzeit werden unter anderen sensible Regeneratorspeicher für den Einsatz in solarthermischen Kraftwerken untersucht. Die thermische Energie wird bei diesem Speicherkonzept in Form von sensibler Wärme gespeichert. Als Speichermaterial werden Feststoffe eingesetzt. Das Speichermaterial wird zur Be- und Entladung des Speichers direkt von einem Wärmeträgerfluid durchströmt. Durch den Einsatz von kostengünstigem Speichermaterial bieten sensible Regeneratoren die Möglichkeit niedrige Gesamtkosten für das Speichersystem zu erhalten. Allerdings ergibt sich bei Regeneratoren ein sich während der Be- und Entladung änderndes Temperaturniveau. Dies führt zu einer reduzierten Effizienz des gekoppelten Kraftwerksprozesses. Weiterhin besitzen die eingesetzten Speichermaterialien eine geringe Wärmeleitfähigkeit. Diese ist limitierend für thermische Leistung des Speichers.

Neben sensiblen Regeneratoren werden auch Phasenwechelspeicher erforscht. Diese Speicher nutzen den hohen Energieumsatz beim Wechsel zwischen fester und flüssiger Phase des Spei-

chermaterials. Vorteilhaft ist die niedrige Temperaturänderung beim Phasenwechsel. Nachteilig ist die geringe Wärmeleitfähigkeit des Phasenwechselmaterial (engl. phase change material, PCM). Im festen Zustand des PCMs ist die geringe Wärmeleitfähigkeit, wie auch für sensible Regeneratoren, limitierend für die thermische Leistung des Speichers. Außerdem können Phasenwechselspeicher aufgrund des Phasenwechsels nicht direkt von einem Wärmeträgerfluid durchströmt werden, weshalb eine Trennung zwischen PCM und Wärmeträgerfluid notwendig ist. Dadurch werden aufwendigere Speicheraufbauten als bei sensiblen Regeneratoren nötig.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit soll die Kombination von einem sensiblen Regeneratorspeicher und Phasenwechselspeicher in einem Verbundspeicher untersucht werden. Das Phasenwechselmaterial wird eingesetzt, um die Austrittstemperatur von sensiblen Regeneratoren zu stabilisieren. Die Arbeit soll zeigen, wie groß der PCM-Anteil in einem Verbundspeicher für die Stabilisierung der Temperatur gewählt werden muss. Für die Untersuchung wird ein bestehendes numerisches Modell zur Berechnung rein sensibler Regeneratoren für das Verbundspeicherkonzept angepasst. Zur Modellierung des Phasenwechselmaterials werden verschiedene Materialmodelle untersucht. Außerdem wird das angepasste Berechnungsmodell anhand von Literaturdaten validiert. Um die Eigenschaften des Verbundspeicherkonzepts zu analysieren, wird mit dem angepassten Berechnungsmodell eine Parameterstudie durchgeführt. Zur Bewertung des thermischen Verhaltens der Speichervarianten werden verschiedene Bewertungsmethoden miteinander verglichen und gemäß ihrer Eignung für die Speicherbewertung ausgewählt. Die Speichervarianten werden mithilfe des exergetischen Wirkungsgrades, Gesamtwirkungsgrades und des Nutzungsgrades bewertet. Weiterhin werden die Speichervarianten im Hinblick auf die benötigte Speichermasse und die Kosten für das Speichermaterial untersucht.

1.3 Struktur der Arbeit

Im Anschluss an das einführende Kapitel wird in Kapitel 2 der derzeitige Kenntnisstand dargestellt. Es werden die Haupteigenschaften von sensiblen Regeneratoren und Phasenwechselspeichern beschrieben. Außerdem werden das bestehende numerische Berechnungsmodell und die zur Modellierung des Phasenwechsels eingesetzte Kapazitätsmethode erläutert. Darüber hinaus enthält das Kapitel eine Darstellung der bisherigen Untersuchung zu Verbundspeichern.

In Kapitel 3 werden die vorgenommenen Anpassungen des bestehenden Berechnungsmodells beschrieben. Dies sind der veränderte Speicheraufbau, die verwendeten Materialeigenschaften, die

adaptierten Berechnungsgleichungen, die Druckverlustberechnung sowie die Ermittlung des exergetischen Wirkungsgrades und des Nutzungsgrades zur Bewertung der Speichervarianten.

Anschließend werden in Kapitel 4 verschiedene Materialmodelle für Kapazitätsmethode untersucht. Es werden die Auswirkung der verschiedenen Modelle auf die Genauigkeit der energetischen Bilanzierung und die benötigte Rechenzeit betrachtet. Als Ergebnis werden Grenzen für die zeitliche Diskretisierung aufgezeigt.

In Kapitel 5 wird das adaptierte Berechnungsmodell mithilfe von Literaturdaten für die Simulation von reinen Phasenwechselspeichern validiert. Der untersuchte Speicheraufbau, das verwendete Materialmodell, die Simulationsbedingungen und der Vergleich der Literaturdaten und Simulationsergebnisse werden erläutert.

Kapitel 6 beschreibt die durchgeführte Parameterstudie. Es werden die verwendeten Studienparameter und die Auswahl des Phasenwechselmaterials dargelegt. Weiterhin werden die Ergebnisse einer Netzstudie zur Wahl einer ausreichend feinen räumlichen Diskretisierung gezeigt. Es werden verschiedene Bewertungsmethoden miteinander verglichen und für die Auswertung der Studienergebnisse eingesetzt. Für die Auswertung werden die Eigenschaften und Kosten von Verbundspeichern und sensiblen Regeneratoren miteinander verglichen.

In Kapitel 7 werden die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst.

Kapitel 8 gibt einen Ausblick für weitere Untersuchungen.

2 Derzeitiger Kenntnisstand

2.1 Eigenschaften regenerativer Energiespeicher

Als regenerative Energiespeicher werden Speicher bezeichnet, die zur Be- und Entladung (Ein- und Ausspeicherung von thermischer Energie) mit einem Wärmeträgerfluid durchströmt werden. Die thermische Energie wird je nach verwendetem Speichermaterial durch verschiedene Mechanismen gespeichert. In dieser Arbeit werden regenerative Energiespeicher untersucht, die auf dem Prinzip der sensiblen und latenten Wärmespeicherung basieren. Diese beiden Speicherkonzepte werden im Folgenden näher beschrieben.

2.1.1 Sensible Regeneratorspeicher

Mithilfe von sensiblen Regeneratorspeichern kann thermische Energie in Form von fühlbarer Wärme gespeichert werden. Die charakteristische Materialgröße für sensible Speichertechnologien ist die spezifische Wärmekapazität c . Diese gibt an, welche Energiemenge in einem Kilogramm Material pro Kelvin Temperaturänderung des Materials gespeichert werden kann. Die umgesetzte thermische Energie ΔQ_{12} bei einer Temperaturänderung von T_1 zu T_2 einer Speichermasse m kann mithilfe der spezifischen Wärmekapazität wie folgt berechnet werden:

$$\Delta Q_{12} = m \int_{T_1}^{T_2} c \, dT \quad (2.1)$$

Als Speicherinventar werden feste Materialien eingesetzt. Es werden kostengünstige Materialien, wie zum Beispiel Gestein oder Beton, verwendet [1]–[3]. Bei festen Materialien kann die thermische Energie nur über Wärmeleitung in und aus dem Material geleitet werden. Da die Wärmeleitfähigkeit λ der eingesetzten Speichermaterialien vergleichsweise gering ist, muss die Wärme über eine möglichst große Oberfläche an das Speichermaterial übertragen werden. Dazu wird das Speicherinventar in Form von Schüttungen, Formsteinen oder in massiver Form mit integriertem Wärmeübertrager ausgeführt. Durch den im Speicherintegral integrierten Wärmeübertrager sind die Speicherkapazität und die thermische Leistung des Speichers miteinander gekoppelt. Für diese Speicherausführungen muss der Wärmeübertrager anhand der Speichergröße und damit für die Kapazität des Speichers dimensioniert werden. Schüttungen und Formsteine werden direkt von dem Wärmeträgerfluid durchströmt. Im Speicher ist kein Wärmeübertrager notwendig. Die Auskopplung der thermischen Leistung aus dem Wärmeträgerfluid erfolgt über einen von dem Speicher getrennten Wärmeübertrager. Dieser kann unabhängig von der Speicherkapazität dimensioniert werden. Leistung und Kapazität sind voneinander entkoppelt.

In Abbildung 2.1 sind diese drei Varianten schematisch dargestellt. Die drei Formvarianten unterscheiden sich grundsätzlich durch die für den Wärmeübergang zwischen Fluid und Speicherinventar zur Verfügung stehenden Oberfläche und den bei der Durchströmung entstehenden Druckverlust des Fluids. Schüttungen bieten je nach Größe der verwendeten Partikel die größte Oberfläche, führen jedoch zu den größten Druckverlusten bei der Durchströmung. Für massives Speicher material mit integriertem Wärmeübertrager ergeben sich die geringste Oberfläche und der geringste auftretende Druckverlust. Die Verwendung von Formsteinen führt zu mittleren Werten für die Oberfläche und den Druckverlust. Als Wärmeträgerfluid werden für Schüttungen und Formsteine in der Regel gasförmige Fluide verwendet [1]. Beim Einsatz von massivem Speicher material werden flüssige Fluide eingesetzt [3].



Abbildung 2.1: Formvarianten des Speicher materials. Links: Schüttungen; Mitte: Formsteine; Rechts: Massives Speicher material

Je nach Speicher material können sensible Regeneratorspeicher bis auf eine Temperatur von bis zu 1200 °C aufgeheizt werden [1]. Die Möglichkeit thermische Energie auf einem derart hohen Temperaturniveau speichern zu können und die Verwendung von kostengünstigem Speicher inventar repräsentieren die entscheidenden Vorteile dieser Technologie.

Beim Betrieb von sensiblen Regeneratorspeichern bildet sich im Speicher material eine Temperaturfront aus. Diese bewegt sich beim Be- und Entladen durch den Speicher und führt bei Erreichen des Austritts zu einer sich ändernden Fluidaustrittstemperatur. In Abbildung 2.2 ist ein typischer Temperaturverlauf innerhalb des Speicher materials während eines Entladevorgangs dargestellt. Das Diagramm zeigt die Temperatur in einem Speicher der Länge L , aufgetragen über der Position x in Durchströmungsrichtung.

Ausgehend von einem initialen Temperaturprofil zum Zeitpunkt $t = 0$ wandert die Front durch den Speicher bis zum Zeitpunkt $t = t_{\text{end}}$. An der Position $x = 0$ strömt das kalte Fluid in den Speicher. Durch die kontinuierliche Entladung wandert die Temperaturfront, wie durch die Pfeilrichtung dargestellt, durch den Speicher. Erreicht die Temperaturfront den Speicheraustritt an der Stelle L beginnt die Austrittstemperatur des Fluids abzunehmen. Beim Beladen des Speichers

strömt das heiße Fluid an der Stelle L in den Speicher. Die Temperaturfront wandert entgegengesetzt zur Beladungsrichtung durch den Speicher. Erreicht die Front den Austritt an der Position $x = 0$, beginnt die Fluidaustrittstemperatur sich zu erhöhen.

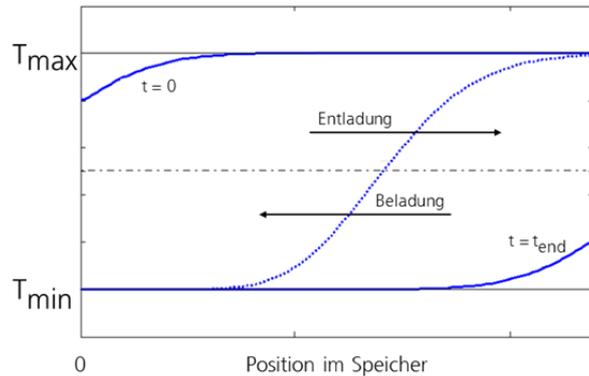


Abbildung 2.2: Typische Temperaturfront innerhalb eines sensiblen Regeneratorspeichers zu verschiedenen Zeitpunkten [4]

Da gekoppelte Prozesse für einen effizienten Betrieb konstant hohe Temperaturen benötigen, ist diese zeitliche Änderung der Speicheraustrittstemperatur ein wesentlicher Nachteil sensibler Regeneratorspeicher.

2.1.2 Phasenwechselspeicher

In Phasenwechselspeichern wird thermische Energie mithilfe von latenter Wärme gespeichert. Die verwendeten Speichermaterialien durchlaufen bei der Be- und Entladung einen Phasenwechsel. Die dabei umgesetzte Energie wird als Latentwärme bezeichnet. Zum Einsatz kommen Materialien die bei der gewünschten Speichertemperatur einen Wechsel zwischen fester und flüssiger Phase vornehmen. Der Phasenwechsel flüssig-gasförmig ist mit einer sehr starken Volumenänderung verbunden und wird deshalb nicht für Energiespeicher in Betracht gezogen.

Zur Bestimmung der ein- und ausgespeicherten Energie in Phasenwechselmaterialien (engl. phase change material, PCM) werden die spezifische Wärmekapazität des flüssigen und festen Materials $c_{pcm,f}$ und $c_{pcm,s}$ sowie die spezifische Schmelzenthalpie h_{sm} benötigt. Diese gibt an, wie viel Energie beim Wechsel zwischen fester und flüssiger Phase pro Kilogramm PCM umgesetzt wird. Gleichung (2.2) beschreibt die eingespeicherte Energiemenge ΔQ_{12} bei einer Temperaturänderung der Speichermasse m von T_1 zu T_2 . Das Material besitzt eine definierte Schmelztemperatur T_{sm} .

$$\Delta Q_{12} = m \cdot \left[\int_{T_1}^{T_{sm}} c_{pcm,s} dT + h_{sm} + \int_{T_{sm}}^{T_2} c_{pcm,f} dT \right] \quad (2.2)$$

Der Phasenwechsel und der Umsatz der Schmelzenthalpie finden in diesem Fall bei der Schmelztemperatur T_{sm} statt. Dies trifft vor allem für reine Materialien zu. Für Stoffgemische kann der Phasenwechsel auch in einem wenige Kelvin breiten Temperaturbereich ablaufen [5]. Der vergleichsweise hohe Energieumsatz beim Phasenwechsel bei konstanter Temperatur bzw. innerhalb eines kleinen Temperaturbereichs ist der wesentliche Vorteil dieser Technologie.

Als PCM können je nach Einsatztemperatur verschiedene Stoffe wie Paraffine, Fettsäuren, Salze, Salzmischungen und Salzhydrate verwendet werden. In der Literatur werden für einen Temperaturbereich von 0 bis 1000 °C zahlreiche Materialien aufgeführt [5]–[8]. Die Stoffe unterscheiden sich neben der Schmelztemperatur auch in der Größe der Schmelzenthalpie, in ihrem Schmelz- und Erstarrungsverhalten, ihrer Korrosivität und weiteren Stoffeigenschaften. Das Schmelz- und Erstarrungsverhalten kann sich auch bei einem PCM unterscheiden.

Beim Wärmeeintrag bzw. der –entnahme treten aufgrund des Phasenwechsels mehrere Effekte auf. Beim Aufschmelzen eines vollständig erstarrten und unter die Schmelztemperatur abgekühlten PCMs erfolgt der Wärmeeintrag in das Speichermedium bis zum Erreichen der Schmelztemperatur nur über Wärmeleitung. Wie bei sensiblen Regeneratorspeichern ist die geringe Wärmeleitfähigkeit des Speichermediums bei diesem Vorgang limitierend. Beginnt das PCM aufzuschmelzen liegen gleichzeitig feste und flüssige Phase des Materials vor. Es ergibt sich eine mit der Zeit wandernde Schmelzfront. Der Wärmeeintrag in die flüssige Phase und von der flüssigen zur festen Phase erfolgt zunehmend mithilfe von freier Konvektion. An der Position der Schmelzfront ist die Temperatur gleich der Schmelztemperatur des PCMs. Die Schmelzfront bewegt sich so lange durch das PCM bis das gesamte Material aufgeschmolzen ist und nur noch in flüssiger Form vorliegt. Beim Abkühlen eines vollständig aufgeschmolzenen PCMs beginnt das Material beim Erreichen der Schmelztemperatur in die feste Phase überzugehen. Ab diesem Zeitpunkt wird der Wärmestrom durch die Wärmeleitfähigkeit des festen Materials begrenzt. Die Schmelzfront bewegt sich bis zum vollständigen Erstarren durch das Material.

Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit kann der Speicher wie bei sensiblen Regeneratoren nicht als massiver Block ausgeführt werden. Es werden ähnliche Konzepte wie die in Abbildung 2.1 dargestellten Formvarianten des Speichermediums eingesetzt. Zur Realisierung von Schüttungen muss das PCM verkapselt werden, um beim Phasenwechsel vom Wärmeträgerfluid getrennt zu bleiben. Für die Verkapselung existieren je nach Einsatzgebiet verschiedene Möglichkeiten, wie zum Beispiel in Form einer Kugel oder in Metallprofilen. Bei der Verkapselung des PCMs muss unter anderem auf die beim Phasenwechsel auftretende Volumenänderung Rücksicht genommen werden. Außerdem muss beachtet werden, dass durch die Verkapselung die Speicherkapazität durch die Einbringung zusätzlicher Materialien reduziert wird. Die PCM-Kapseln werden direkt von einem Wärmeträgerfluid umströmt. Die thermische Leistung ist, wie

bei sensiblen Regeneratoren mit Speichermaterial in Form von Schüttungen und Formsteinen, von der Speicherkapazität entkoppelt. Für Speicherausführungen mit integriertem Wärmeübertrager erfolgt die Trennung des Wärmeträgerfluids und PCMs durch den Wärmeübertrager. Die thermische Leistung ist damit an die Kapazität gekoppelt. Zur Kompensation der niedrigen Wärmeleitfähigkeit des Speichermaterials werden zusätzliche Wärmeleitungsstrukturen am Wärmeübertrager oder Verbundmaterialien aus PCM und Graphit zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit eingesetzt. Die geringe Wärmeleitfähigkeit des PCMs und der daraus resultierende Aufwand um dies zu kompensieren sind wesentliche Nachteile dieser Speicherkonzepte. Außerdem sind die verwendeten PCMs verglichen mit anderen Speichermaterialien deutlich kostenintensiver. [5]

2.2 Bestehendes Berechnungsmodell für sensible Regeneratorspeicher

Das bestehende Modell ermöglicht die transiente Berechnung des thermischen Verhaltens von sensiblen Regeneratorspeichern und wurde von Odenthal [9] entwickelt. Im Modell wird nur das Speicherinventar betrachtet. Als Wärmeträgerfluid werden Gase bei Umgebungsdruck verwendet. Die für den Betrieb notwendigen übrigen Komponenten, wie Ventilator und Wärmeübertrager zur Kopplung mit einem Kraftwerksprozess, sind im Modell nicht abgebildet. Das Speicherinventar kann in Form einer Schüttung oder Formsteinen ausgeführt werden. Da für die in dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen nur Schüttungen verwendet werden, findet die Variante der Formsteine keine weitere Berücksichtigung in der Beschreibung des Modells. Zur Untersuchung verschiedener Speichervarianten und Betriebsparameter werden für die Berechnung diverse Eingabeparameter definiert. Diese sind in Anhang A tabellarisch aufgeführt.

Der Berechnungsvorgang für einen gegebenen Speicher läuft bei definierten Betriebsparametern wie nachfolgend beschrieben ab. Zu Beginn besitzt das gesamte Speichermaterial eine definierte Initialtemperatur $T_{s,initial}$. Zur Beladung wird der Speicher von einem konstanten Fluidmassenstrom \dot{m}_f mit einer konstanten Eintrittstemperatur durchströmt, bis die Fluidaustrittstemperatur eine definierte maximal zulässige Temperatur überschreitet. Anschließend wird der Speicher in umgekehrter Strömungsrichtung mit gleichem Massenstrom und konstanter Eintrittstemperatur entladen. Da Regeneratorspeicher erst nach einer bestimmten Anzahl von Be- und Entladungen einen eingeschwungenen Zustand erreichen, wird der Be- und Entladezyklus mehrmals wiederholt, bis sich die Beladezeit der einzelnen Zyklen nur noch um eine festgelegte Zeitdauer unterscheiden.

Das Berechnungsmodell bietet die Möglichkeit Parameterstudien durchzuführen. Es können die geometrischen Eigenschaften des Speichers und die Betriebsparameter variiert werden. Zur bes-

seren Vergleichbarkeit der thermischen Eigenschaften der einzelnen Speichervarianten wird für jeden Parametersatz mithilfe eines Optimierungsalgorithmus die Speicherlänge dahingehend optimiert, eine festgelegte Entladedauer zu erreichen. Die Speichervarianten können dadurch für die gleichen Randbedingungen miteinander verglichen werden. Verwendet wird das Nelder-Mead-Verfahren. Nähere Informationen zu dem verwendeten Algorithmus sind in Lagarias [10] zu finden.

Außerdem ermöglicht das bestehende Modell die Effizienz des Speichers anhand eines solarthermischen Kraftwerks zu bewerten.

Im Folgenden werden das Berechnungsverfahren mit den dafür nötigen Differentialgleichungen, die verwendeten Randbedingungen und Materialeigenschaften sowie die Berechnungsmethoden des Wärmeübergangs und des Druckverlusts beschrieben. Anschließend wird die Methode zur Untersuchung der Auswirkungen des Speichers auf den Kraftwerksprozess erläutert.

2.2.1 Berechnungsverfahren

Zur Berechnung wird ein 2-Phasenmodell eingesetzt. Berücksichtigt werden das Speicherinventar und das strömende Wärmeträgerfluid. Die Grundlage des Modells bildet die energetische Bilanzierung dieser beiden Phasen. Der Speicher mit der Länge L_{sp} wird räumlich eindimensional in Durchströmungsrichtung mit einer konstanten Gitterweite Δx in k Segmente diskretisiert. Durch das 2-Phasenmodell enthält jedes Segment einen Fluid- und einen Feststoffknoten. Die Eigenschaften der beiden Phasen sind in dem jeweiligen Knoten zusammengefasst. Für die Bilanzierung der Knoten werden folgende Vereinfachungen getroffen:

- Keine Wärmeleitung in Durchströmungsrichtung
- Keine Wärmeleitung zwischen den Partikeln des Speicherinventars
- Keine Wärmeleitung innerhalb des Fluids
- Keine Wärmeübertragung durch Strahlung
- Keine Wärmeübertragung an die Umgebung
- Einheitliche Fluidgeschwindigkeit über dem Speicherquerschnitt
- Einheitliche Stoffwerte, Temperaturen und Wärmeübergangskoeffizienten innerhalb eines Speichersegments
- Kein Einfluss der Schwerkraft

In Abbildung 2.3 ist ein diskretisierter Speicher mit Fluid und Feststoffphase im Zeitschritt n dargestellt. Die Knoten $1,n$ und $k+2,n$ werden für die Definition der Randbedingungen benötigt (vgl. Abschnitt 2.2.2). Bei der Bilanzierung werden die folgenden Wärmeströme berücksichtigt:

- Zeitliche Änderung der Inneren Energie des Speichermaterials
- Konvektiver Wärmeübergang zwischen Feststoff und Fluid

- Enthalpiestrom des eintretenden Fluids
- Enthalpiestrom des austretenden Fluids

Die Änderung der inneren Energie des Fluids innerhalb eines Speichersegments wird aufgrund der geringen Dichte gasförmiger Fluide nicht berücksichtigt.

Die Berechnungen erfolgen in normierter Form. Die Fluid- und Feststofftemperaturen werden auf eine Referenztemperatur T_{ref} normiert. Nicht normierte Temperaturen werden nachfolgend mit T und normierte Temperaturen mit θ bezeichnet.

Die Bilanzgleichung des Wärmeträgerfluids setzt sich aus dem ein- und austretenden Enthalpiestrom des Fluids und dem Wärmestrom zwischen Fluid und Feststoff zusammen. Sie kann wie folgt aufgestellt werden:

$$\bar{\alpha} A_{wü} (\theta_s - \theta_f) = \dot{m}_f c_{p,f} \frac{\partial \theta_f}{\partial x} \Delta x \tag{2.3}$$

Das Produkt aus modifizierten Wärmeübergangskoeffizienten $\bar{\alpha}^1$, der wärmeübertragenden Fläche $A_{wü}$ und der Temperaturdifferenz zwischen Feststoff und Fluid im Speichersegment beschreibt den durch Konvektion übertragenen Wärmestrom. Dieser ist gleich der Änderung des Fluidenthalpiestroms. Die Änderung der Fluidenthalpie errechnet sich aus dem Produkt von Fluidmassenstrom \dot{m}_f , der spezifischen isobaren Wärmekapazität des Fluids $c_{p,f}$ und der Änderung der Fluidtemperatur beim Durchströmen des Segments $\frac{\partial \theta_f}{\partial x} \Delta x$.

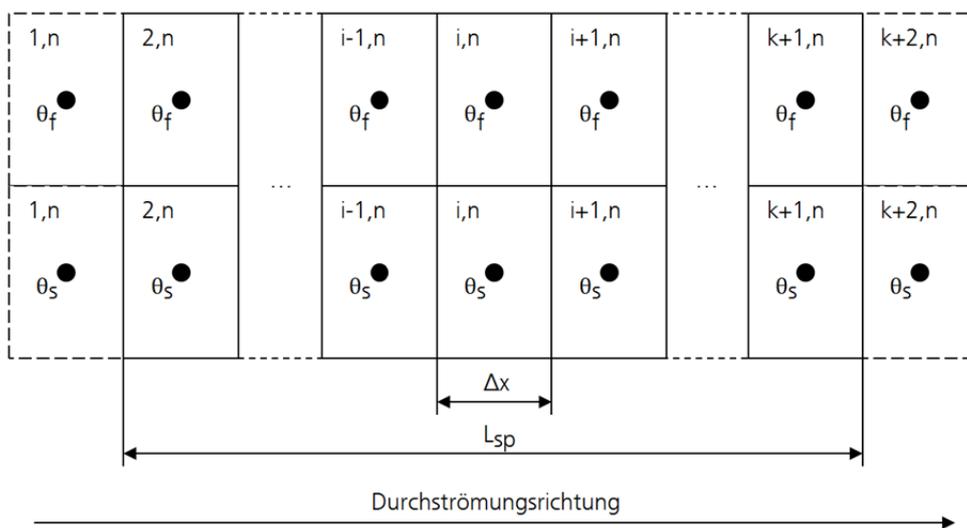


Abbildung 2.3: Diskretisierungsschema eines Speichers im bestehenden Berechnungsmodell

¹ Für Regeneratoren muss ein modifizierter Wärmeübergangskoeffizient eingesetzt werden. Dies wird in Abschnitt 2.2.4 näher beschrieben.

Für die energetische Bilanzierung des Speichermaterials werden der übertragene Wärmestrom und die Änderung der inneren Energie des Feststoffs berücksichtigt:

$$\bar{\alpha}A_{w\ddot{u}}(\theta_f - \theta_s) = m_s c_s \frac{\partial \theta_s}{\partial t} \quad (2.4)$$

Die zeitliche Änderung der Inneren Energie des Feststoffs berechnet sich aus der Masse des Feststoffs innerhalb des Speichersegments m_s , der spezifischen Wärmekapazität des Feststoffs c_s und der Änderung der Feststofftemperatur mit der Zeit $\frac{\partial \theta_s}{\partial t}$.

Die beiden Differentialgleichungen (2.3) und (2.4) werden zur numerischen Berechnung mithilfe der finiten Differenzenmethode diskretisiert. Dazu wird ein Aufwind-Verfahren 1. Ordnung verwendet. Die zeitliche Diskretisierung erfolgt voll implizit mit einer definierten Zeitschrittweite Δt . Nach einer Umformung ergeben sich für die Fluid- und Feststoffbilanzen die folgenden Differenzgleichungen für den Zeitschritt n bis $n+1$:

Fluid:

$$\theta_{f,i}^{n+1} - \theta_{f,i-1}^{n+1} = \Lambda_i^n (\theta_{s,i}^{n+1} - \theta_{f,i}^{n+1}) \quad (2.5)$$

mit $\Lambda = \frac{\bar{\alpha}A_{w\ddot{u}}}{\dot{m}_f c_{p,f}}$

Feststoff:

$$\theta_{s,i}^{n+1} - \theta_{s,i}^n = \Pi_i^n (\theta_{f,i}^{n+1} - \theta_{s,i}^{n+1}) \quad (2.6)$$

mit $\Pi = \frac{\bar{\alpha}A_{w\ddot{u}}\Delta t}{m_s c_s}$

Die beiden Gleichungen ermöglichen die transiente Berechnung der Fluid und Feststofftemperatur innerhalb jedes Segments. Die beiden Faktoren Λ und Π werden für die Stoffwerte von Luft bei der Be- und Entladetemperatur bestimmt. Dabei bleibt die wärmeübertragende Fläche aufgrund der konstanten Gitterweite der Diskretisierung und der gleichbleibenden Porosität ebenso konstant wie die übrigen Parameter. Die beiden Parameter Λ und Π werden über dem Temperaturbereich zwischen Be- und Entladetemperatur linearisiert. Zur schnelleren Berechnung werden aus dieser Linearisierung in Abhängigkeit der Temperatur des Zeitschritts n im Segment i die jeweiligen Werte Λ_i^n und Π_i^n zur Berechnung des Zeitschritts $n+1$ ermittelt.

Die Gleichungen (2.5) und (2.6) werden für jedes Speichersegment aufgestellt und zu einem linearen Gleichungssystem zusammengefügt. Das Gleichungssystem wird für jeden Zeitschritt mittels einer Matlab-Routine iterativ gelöst.

2.2.2 Randbedingungen

Für die Randbedingungen wird am Ein- und Auslass des Speichers jeweils ein Knoten für Fluid- und Feststoffphase angefügt. Für k Segmente im Speicher beträgt die Gesamtknotenzahl demnach $k+2$. Für die Eintrittsrandbedingung beträgt der Knotenindex $i = 1$ und für die Austrittsrandbedingungen $i = k+2$. Am Eintrittsknoten des Speichers werden die Fluid- und Feststofftemperatur gleich der Temperatur des eintretenden Fluidmassenstroms gesetzt:

$$\begin{aligned}\theta_{f,1}^n &= \theta_{f,ein} \\ \theta_{s,1}^n &= \theta_{f,ein}\end{aligned}\tag{2.7}$$

Am Austritt des Speichers wird eine adiabate Randbedingung verwendet. Die Temperaturen des Randbedingungsknoten werden zu jedem Zeitpunkt gleich der Temperatur des letzten Speicherknotens gesetzt:

$$\begin{aligned}\theta_{f,k+2}^n &= \theta_{f,k+1}^n \\ \theta_{s,k+2}^n &= \theta_{s,k+1}^n\end{aligned}\tag{2.8}$$

Die Fluidtemperatur $\theta_{f,k+2}^n$ wird im Folgenden als Fluidaustrittstemperatur $\theta_{f,aus}^n$ bezeichnet.

2.2.3 Materialeigenschaften

Die Stoffwerte des sensiblen Speichermaterials werden als temperaturunabhängige Parameter vorab definiert. Es werden die Wärmeleitfähigkeit des Materials λ_s , die spezifische Wärmekapazität c_s sowie die Dichte ρ_s benötigt. Für das gewählte Wärmeträgerfluid werden die Dichte ρ_f , isobare spezifische Wärmekapazität $c_{p,f}$, Wärmeleitfähigkeit λ_f und die dynamische Viskosität η_f mittels Stoffwertrouninen für jedes Speichersegment in Abhängigkeit der Fluidtemperatur im Zeitschritt n ermittelt. Die entsprechenden Gleichungen sind für Luft im Anhang B aufgeführt.

2.2.4 Wärmeübertragung

Zur Berechnung des konvektiven Wärmeübergangs werden der Wärmeübergangskoeffizient und die wärmeübertragende Fläche benötigt. Der Wärmeübergangskoeffizient kann für eine Partikelschüttung nach Wakao [11] mit folgender Nusselt-Korrelation in Abhängigkeit der Prandtl-Zahl Pr und Reynolds-Zahl Re berechnet werden:

$$Nu = 2 + 1,1Pr^{1/3}Re^{0,6}\tag{2.9}$$

Die Prandtl-Zahl wird mithilfe der dynamischen Viskosität, der spezifischen Wärmekapazität und der Wärmeleitfähigkeit des Fluids nach Gleichung (2.10) berechnet.

$$Pr = \frac{\eta_f c_{p,f}}{\lambda_f} \quad (2.10)$$

Zur Berechnung der Reynolds-Zahl werden in der Wakao-Korrelation die Geschwindigkeit der freien Strömung vor Eintritt in die Schüttung u_0 , die Fluidichte, der Partikeldurchmesser des Schüttguts d_p und die dynamische Viskosität des Fluids verwendet (vgl. Gleichung (2.11)). Die Strömungsgeschwindigkeit wird mithilfe der Speicherquerschnittsfläche A_{sp} berechnet.

$$Re = \frac{\rho_f u_0 d_p}{\eta_f} \quad (2.11)$$

$$\text{mit } u_0 = \frac{\dot{m}_f}{A_{sp} \rho_f}$$

Der Wärmeübergangskoeffizient α wird mithilfe des Zusammenhangs von Nusselt-Zahl Nu , Wärmeleitfähigkeit des Fluids und des Partikeldurchmessers bestimmt:

$$\alpha = \frac{Nu \lambda_f}{d_p} \quad (2.12)$$

Der so berechnete Wärmeübergangskoeffizient muss für die Berechnung von Regeneratoren aufgrund der verwendeten mittleren Temperaturen korrigiert werden. Beim Be- und Entladen des Speichers ergibt sich in den Partikeln der Schüttung ein räumliches und zeitabhängiges Temperaturprofil [12]. Für das Berechnungsverfahren wird jedoch eine mittlere Temperatur in jedem Speichersegment angenommen. Die übertragene Wärmemenge wird demnach nicht mit Oberflächentemperatur der Partikel durchgeführt, sondern mit der mittleren Partikeltemperatur. Um den Einfluss der mittleren Temperaturen zu berücksichtigen, wird in [13] die Gleichung (2.13) zur Anpassung des Wärmeübergangskoeffizienten in einer Kugelschüttung angegeben. Der modifizierte Wärmeübergangskoeffizient $\bar{\alpha}$ berechnet sich aus dem ursprünglichen α -Wert, dem Partikeldurchmesser d_p und der Wärmeleitfähigkeit des Feststoffs λ_s :

$$\frac{1}{\bar{\alpha}} = \frac{1}{\alpha} + \frac{d_p}{10 \cdot \lambda_s} \quad (2.13)$$

Die wärmeübertragende Fläche wird mithilfe des Oberflächen-Volumen-Verhältnisses a_v in einer Kugelschüttung ermittelt. Dieses berechnet sich aus der Porosität der Schüttung ϵ und dem Partikeldurchmesser nach Gleichung (2.14).

$$av = \frac{6(1 - \varepsilon)}{d_p} \quad (2.14)$$

Für den gesamten Speicher wird eine konstante Porosität angenommen. Die wärmeübertragende Oberfläche der Schüttung innerhalb eines Speichersegments kann aus dem Produkt von Segmentvolumen und Oberflächen-Volumen-Verhältnis ermittelt werden.

2.2.5 Druckverlustberechnung

Der Druckerlust bei der Durchströmung ist eine wesentliche Eigenschaft von Regeneratorspeichern und entscheidet über den Energieaufwand für dessen Betrieb. Für eine Kugelschüttung wird von Ergun [14] die folgende Korrelation angegeben:

$$\Delta p_f = \frac{150(1 - \varepsilon)^2 u_0 \eta_f L}{\varepsilon^3 d_p^2} + \frac{1,75(1 - \varepsilon) u_0^2 \rho_f L}{\varepsilon^3 d_p} \quad (2.15)$$

Mit L = Länge der Kugelschüttung in Durchströmungsrichtung

Im bestehenden Modell werden die Fluidstoffwerte bei der mittleren Temperatur aus Be- und Entladetemperatur verwendet. Der Energieaufwand für den Ventilator für eine Be- und Entladung wird mithilfe der Gleichung (2.16) ermittelt.

$$E_{vent} = \frac{\Delta p_f \dot{m}_f}{\rho_f \eta_{vent}} (t_{be} + t_{en}) \quad (2.16)$$

mit t_{be} = Beladezeit

t_{en} = Entladezeit

η_{vent} = Wirkungsgrad Ventilator

2.2.6 Einfluss des Speichers auf die Effizienz solarthermischer Kraftwerke

Für diese Untersuchung wird der Speicherbetrieb in Kombination mit dem Kraftwerksblock eines solarthermischen Parabolrinnenkraftwerks simuliert. Der Speicherkreislauf wird mit Luft betrieben. Der Regeneratorspeicher ist mit dem Kraftwerksprozess über einen Luft-Öl-Wärmeübertrager gekoppelt. Zur Beladung des Speichers wird das heiße Wärmeträgeröl nach dem Kollektorfeld durch den Wärmeübertrager geleitet, um die Luft des Speicherkreislaufes zu erwärmen. Hierbei werden konstante Massenströme und Eintrittstemperaturen des Wärmeträgeröls und der Luft angenommen. Zur Entladung wird die durch den Speicher erwärmte Luft dazu genutzt das Wärmeträgeröl des Kraftwerksprozesses zu erwärmen.

Die Auswirkungen des Speichers auf die Kraftwerksleistung werden mit dem Gesamtwirkungsgrad η_{ges} quantifiziert. Dieser berechnet sich aus der bei der Speicherentladung durch das

Kraftwerk erzeugten elektrischen Energie $E_{\text{netto,en}}$, der für den Speicherbetrieb nötigen Energiemenge für den Ventilator E_{vent} und der bei konstanter maximaler Speicheraustrittstemperatur möglichen elektrischen Energieerzeugung $E_{\text{netto,max}}$:

$$\eta_{\text{ges}} = \frac{E_{\text{netto,en}} - E_{\text{vent}}}{E_{\text{netto,max}}} \quad (2.17)$$

Dieser Gesamtwirkungsgrad ermöglicht eine Aussage über den Einfluss der sich ändernden Speicheraustrittstemperatur bei der Entladung und des Druckverlusts im Speicher auf die elektrische Stromerzeugung.

Die Berechnung von $E_{\text{netto,en}}$ und $E_{\text{netto,max}}$ wird mithilfe eines Kraftwerksmodells durchgeführt. Das Modell ist der Dissertation von Padilla [15] entnommen. Es erlaubt ausgehend von der nominellen elektrischen netto Kraftwerksleistung $P_{\text{netto,nom}}$ und den nominellen Werten für die Betriebsparameter Wärmeträgerfluidmassenstrom $\dot{m}_{\text{wtf,nom}}$, der eintretenden Wärmeträgerfluidtemperatur $T_{\text{wtf,ein,nom}}$ sowie den Kondensatordruck $p_{\text{kond,nom}}$ die elektrische Kraftwerksleistung P_{netto} bei abweichenden Betriebsparametern zu bestimmen. Von Padilla wurde dazu folgender Zusammenhang entwickelt:

$$\begin{aligned} \ln(\phi) = & -7,118 + 8,864 \cdot 10^{-2} \dot{m}_{\text{wtf}}^* - 1,228 \cdot 10^{-1} [\ln(\dot{m}_{\text{wtf}}^*)]^2 \\ & + 10,957 \cdot T_{\text{wtf,ein}}^* - 3,839 \cdot T_{\text{wtf,ein}}^{*2} \\ & - 2,202 \cdot 10^{-1} \ln(p_{\text{kond,nom}}^*) - 1,477 \cdot 10^{-2} [p_{\text{kond,nom}}^*]^2 \\ & + 1,567 \cdot 10^{-2} \ln(\dot{m}_{\text{wtf}}^*) \ln(p_{\text{kond,nom}}^*) \\ & + 6,326 \cdot 10^{-1} \ln(\dot{m}_{\text{wtf}}^*) T_{\text{wtf,ein}}^* \\ & + 1,532 \cdot 10^{-1} \ln(T_{\text{wtf,ein}}^*) \ln(p_{\text{kond,nom}}^*) \end{aligned} \quad (2.18)$$

mit

$$\phi = \frac{P_{\text{netto}}}{P_{\text{netto,nom}}} \quad \dot{m}_{\text{wtf}}^* = \frac{\dot{m}_{\text{wtf}}}{\dot{m}_{\text{wtf,nom}}} \quad T_{\text{wtf,ein}}^* = \frac{T_{\text{wtf,ein}}^n}{T_{\text{wtf,ein,nom}}} \quad p_{\text{kond,nom}}^* = \frac{p_{\text{kond}}}{p_{\text{kond,nom}}}$$

Für den Fluidmassenstrom des Kraftwerkkreislaufes und der Kondensatordruck werden für die Untersuchung die nominellen Werte angenommen. Demnach wird für \dot{m}_{wtf}^* und $p_{\text{kond,nom}}^*$ ein Wert von eins verwendet. Für das von Padilla betrachtete Kraftwerk beträgt die nominelle Kraftwerksleistung 48385,9 kW und die nominelle Temperatur des in den Kraftwerksblock eintretenden Öls 390 °C.

Das Kraftwerksmodell wird dafür eingesetzt, $E_{\text{netto,en}}$ unter der Berücksichtigung der sich ändernden Speicheraustrittstemperatur zu ermitteln. Dazu wird in jedem Zeitschritt die berechnete Speicheraustrittstemperatur $T_{\text{f,aus}}^n$ verwendet, um die Fluidtemperatur im Kraftwerkskreislauf T_{wtf}^n

zu ermitteln. Durch die Grädigkeit $\Delta T_{wü}$ des Luft-Öl-Wärmeübertragers ist es nicht möglich im Wärmeübertrager das kalte Fluid auf das Temperaturniveau des heißen Fluids zu erwärmen. Die Fluidtemperatur T_{wtf}^n ergibt sich deshalb aus folgender Gleichung:

$$T_{wtf}^n = T_{f,aus}^n - \Delta T_{wü} \quad (2.19)$$

Mithilfe von T_{wtf}^n kann die elektrische netto Leistung des Kraftwerks in jedem Zeitschritt berechnet werden. Die Summation aller Produkte aus netto Leistung und Zeitschrittweite Δt ergibt die elektrische netto Energiemenge des Kraftwerks beim Entladen des Speichers:

$$E_{netto,en} = \sum_{n=1}^{n_{en}} P_{netto}(T_{wtf}^n) \Delta t \quad (2.20)$$

mit n_{en} = Anzahl der Zeitschritte in der Entladephase

Zur Berechnung von $E_{netto,max}$ wird davon ausgegangen, dass der Speicher im nominellen Betrieb beladen wird. Die Beladetemperatur beträgt deshalb zu jedem Zeitpunkt:

$$T_{be} = T_{wtf,nom} - \Delta T_{wü} \quad (2.21)$$

Die Beladetemperatur entspricht der maximalen Speicheraustrittstemperatur beim Entladen. Die maximale Temperatur des Wärmeträgerfluid im Kraftwerkskreislauf bei der Speicherentladung berechnet sich dann unter erneuter Berücksichtigung der Grädigkeit nach Gleichung (2.22).

$$T_{wtf,max} = T_{wtf,nom} - 2 \cdot \Delta T_{wü} \quad (2.22)$$

Mit $T_{wtf,max}$ kann nun die maximale elektrische netto Kraftwerksleistung beim Entladen ermittelt werden. $E_{netto,max}$ lässt sich aus dem Produkt dieser Leistung und der Entladedauer t_{en} des Speichers ermitteln:

$$E_{netto,max} = P_{netto}(T_{wtf,max}) \cdot t_{en} \quad (2.23)$$

2.3 Modellierung von Phasenwechselmaterial

Beim Phasenwechsel eines Materials können mehrere komplexe Phänomene auftreten, die die Modellierung des Materialverhaltens erschweren. Neben der in Abschnitt 2.1.2 bereits erwähnten sich bewegenden Schmelzfront und den konvektiven Strömungen kann es auch zur Unterkühlung des flüssigen PCMs kommen. Außerdem wird sich beim Aufschmelzen von verkapseltem PCM das feste Material aufgrund von Dichteunterschieden am Boden der Verkapselung anlagern, was zu einem veränderten Wärmeübergang führt [16].

Die erwähnten Effekte werden im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Die Modellierung dieser wird in der Literatur [16], [17] beschrieben. Für die Untersuchung des Verbundspeicher-konzepts wird die Modellierung des Phasenwechselmaterials nur in energetischer Form durchgeführt. Es wird lediglich die beim Erwärmen und Abkühlen des Materials umgesetzte Energiemenge betrachtet. Das angewendete Verfahren wird als Kapazitätsmethode bezeichnet [18].

Der Energieumsatz beim Erwärmen und Abkühlen eines PCMs über die Schmelztemperatur hinweg wird prinzipiell durch die Gleichung (2.2) beschrieben. Für die Kapazitätsmethode wird diese Gleichung in modifiziert Form verwendet. Der Energieumsatz wird im gesamten Temperaturbereich mithilfe einer temperaturabhängigen spezifischen Wärmekapazität beschrieben. Dazu wird angenommen, dass der Phasenwechsel innerhalb eines definierten Temperaturbereichs abläuft. Dieser Bereich wird durch die beiden Temperaturen $T_{pw,1}$ und $T_{pw,2}$ festgelegt. Innerhalb dieses Temperaturbereichs wird dem Material die spezifische Wärmekapazität $c_{pcm,pw}(T)$ zugewiesen. Die durch $c_{pcm,pw}(T)$ umgesetzte Energiemenge muss der Schmelzenthalpie und der sensiblen Wärme des Speichermaterials entsprechen:

$$\int_{T_{pw,1}}^{T_{pw,2}} c_{pcm,pw}(T) dT = \int_{T_{pw,1}}^{T_{sm}} c_{pcm,s} dT + h_{sm} + \int_{T_{sm}}^{T_{pw,2}} c_{pcm,f} dT \quad (2.24)$$

mit $T_{sm} = \frac{T_{pw,1} + T_{pw,2}}{2}$

Mit $c_{pcm,pw}(T)$ kann eine abschnittsweise definierte Funktion der spezifischen Wärmekapazität $c_{pcm}(T)$ des PCMs aufgestellt werden:

$$c_{pcm}(T) = \begin{cases} c_{pcm,s}(T) & T < T_{pw,1} \\ c_{pcm,pw}(T) & T_{pw,1} < T < T_{pw,2} \\ c_{pcm,f}(T) & T_{pw,2} < T \end{cases} \quad (2.25)$$

Im Folgenden soll $c_{pcm}(T)$ als Kapazitätsfunktion bezeichnet werden. Die Berechnung der umgesetzten Energie in einem PCM in Gleichung (2.2) vereinfacht sich mit der Kapazitätsfunktion zu:

$$\Delta Q_{12} = m \int_{T_1}^{T_2} c_{pcm}(T) dT \quad (2.26)$$

Die Wahl der Funktion $c_{pcm}(T)$ kann nach den Eigenschaften des Phasenwechselmaterials erfolgen. Durch die Kapazitätsfunktion werden Phasenwechselmaterialien energetisch behandelt wie rein sensible Speichermaterialien. Dies ermöglicht eine einfache Implementierung der energetischen Eigenschaften des Phasenwechselmaterials in das bestehende Berechnungsmodell.

Als eine Alternative zur Kapazitätsmethode existiert die Enthalpiemethode. Dabei wird anstatt einer temperaturabhängigen Kapazität die Enthalpie des Materials für die energetische Bilanzierung verwendet. Der Energieumsatz wird durch eine Änderung der Enthalpie ausgedrückt. Durch einen definierten Enthalpie-Temperatur-Verlauf kann die Temperatur des Materials ermittelt werden. Da die Kapazitätsmethode einfacher in das bestehende Berechnungsmodell implementiert werden kann und deshalb im Rahmen dieser Arbeit verwendet werden soll, wird an dieser Stelle auf eine nähere Beschreibung der Enthalpiemethode verzichtet und auf die Literatur [5], [17], [18] verwiesen.

2.4 Bisherige Untersuchungen zu Verbundspeicherkonzepten

Die Kombination aus sensiblen Regenerator- und Phasenwechselfpeicher wird im Rahmen dieser Arbeit als Verbundspeicher bezeichnet. Die konstante Temperatur beim Phasenwechsel soll bei diesem Speicherkonzept zur Stabilisierung der Austrittstemperatur von sensiblen Regeneratoren genutzt werden. Zusätzlich soll durch den Einsatz von Phasenwechselmaterialien die Energiedichte im Speicher erhöht werden.

Verbundspeicher wurden bereits experimentell und numerisch untersucht. Okello et al. haben in [19] experimentell einen sensiblen Regeneratorspeicher bestehend aus einer Gesteinsschüttung mit einem Verbundspeicher verglichen. Beide Speicher besitzen dieselben Abmessungen. Der Verbundspeicher enthält ebenfalls eine Gesteinsschüttung, ist aber zusätzlich noch in Strömungsrichtung mit in Kupferrohren verkapselten PCM versehen. Betrieben wurden beide Speicher mit Luft als Wärmeträgerfluid. Die Experimente zeigten einen erhöhten Energieinhalt beim Verbundspeicher. Gleichzeitig jedoch wurde durch die hohe Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Kupferrohre die Temperaturfront im Speicher material sehr stark abgeflacht. Dies hatte zur Folge, dass sich die Austrittstemperatur beim Verbundspeicher schneller änderte als bei einem reinen sensiblen Regenerator.

Zanganeh et al. haben ein numerisches Modell eines Verbundspeichers aufgebaut [20]. Der Speicher wurde als Kugelschüttung ausgeführt und das PCM in Edelstahlkugeln verkapselt. Es wurde ebenfalls Luft als Fluid verwendet. Untersucht wurden drei verschiedene PCMs und drei verschiedene PCM-Anteile im Speicher bei gleicher Speichergröße. Das Phasenwechselmaterial befand sich immer am Speicheraustritt (für den Entladeprozess betrachtet). Die Simulationsergebnisse zeigten, dass für die betrachteten Speicher ein PCM-Anteil von 1,33 % des gesamten Speichervolumens eine ausreichende Stabilisierung der Austrittstemperatur ermöglicht.

In [21] wurden von Galione et al. als einziges dieser drei Quellen mehrere verschiedene Konfigurationen des Verbundspeicheraufbaus untersucht und als Wärmeträgerfluid nicht Luft sondern

eine Salzschnmelze verwendet. Der Speicher wurde auch mithilfe eines numerischen Modells untersucht. Es wurden Speicher bestehend aus einer reinen Gesteinsschüttung, reiner Schüttung aus verkapselten PCM und verschiedene mehrschichtige Varianten untersucht, wie zum Beispiel PCM-Gestein-PCM und PCM-Gestein-PCM-Gestein-PCM. Für alle Varianten wurde das gleiche Phasenwechselmaterial verwendet. Die Speichervarianten besitzen auch für die Untersuchung dieselben Abmessungen. Die Schmelztemperatur der Phasenwechselmaterialien wurde modifiziert, sodass bei der Entladung des Speichers am Austritt das höchste Schmelztemperaturniveau und am Eintritt das niedrigste vorliegt. Diese PCM-Anordnung führt zu Vorteilen für den gekoppelten Kraftwerksprozess. Beim Beladen bewirkt das niedrig schmelzende PCM am Austritt eine längere niedrigere Austrittstemperatur. Bei der Entladung wird länger eine hohe Austrittstemperatur erzielt. Die Untersuchungen zeigten die größte Ausnutzung des möglichen Speicherpotentials und eine deutliche Stabilisierung der Austrittstemperaturen bei einer dreischichtigen Variante. Im Vergleich zu anderen Varianten führte das dreischichtige Konzept auch zur geringsten benötigten PCM-Menge und bietet damit Kostenvorteile.

2.5 Methodik dieser Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung von Verbundspeichern zur Verbesserung der thermischen Eigenschaften im Vergleich zu rein sensiblen Regeneratorspeichern. Für dieses Verbundspeicherkonzept ergab die Literaturrecherche ein großes Potential. Allerdings betrachteten bisherige Arbeiten lediglich einzelne Speicherkonfigurationen bei ausgewählten Betriebsparametern. In dieser Arbeit soll erstmals eine umfangreiche Parameterstudie zu Verbundspeichern durchgeführt werden. Dazu soll ein luftbetriebener dreischichtiger Verbundspeicher bestehend aus einer Partikelschüttung untersucht werden. Zur Durchführung der Parameterstudie wird das in Abschnitt 2.2 beschriebene Berechnungsmodell für die Simulation von Verbundspeichern erweitert. Durch den verwendeten Optimierungsvorgang der Speicherlänge ergeben sich im Gegensatz zu den bisherigen Untersuchungen Speicher mit unterschiedlichen Größen dafür allerdings mit gleichen Be- bzw. Entladezeiten. Dadurch können die Speichervarianten für die gleichen Randbedingungen und damit für die gleichen Einsatzbedingungen miteinander verglichen werden. Für die bisherigen Untersuchungen trifft dies nicht zu. Die Modellierung des Phasenwechselmaterials erfolgt durch die Kapazitätsmethode. Zur Anwendung dieser Methode werden verschiedene Verläufe der Kapazitätsfunktion für den Einsatz im Modell untersucht. Mithilfe von Literaturdaten wird das adaptierte Berechnungsmodell validiert.

3 Adaptiertes Berechnungsmodell für Verbundspeicher

Zur Berechnung des dreischichtigen Verbundspeichers wird für das Berechnungsmodell der betrachtete Speicheraufbau angepasst und das Phasenwechselmaterial implementiert. Deshalb werden die Berechnungsgleichungen, das Diskretisierungsverfahren und die Bestimmung der temperaturabhängigen Materialeigenschaften angepasst. Außerdem wird die Druckverlustberechnung neu gestaltet und der exergetische Wirkungsgrad sowie der Nutzungsgrad bestimmt. Das adaptierte Berechnungsmodell besitzt weiterhin die Möglichkeit Parameterstudien durchzuführen. Das verwendete Verfahren wird aus dem bestehenden Modell übernommen.

3.1 Speicheraufbau

Für den Verbundspeicher wird der sensible Speicherteil jeweils an seinen Enden um einen Abschnitt mit verkapseltem PCM ergänzt. Die beiden PCM-Abschnitte besitzen die gleiche Länge L_{pcm} (vgl. Abbildung 3.2). Der Speicherquerschnitt ist über die gesamte Länge konstant. Der Verbundspeicher besteht aus einer Partikelschüttung.

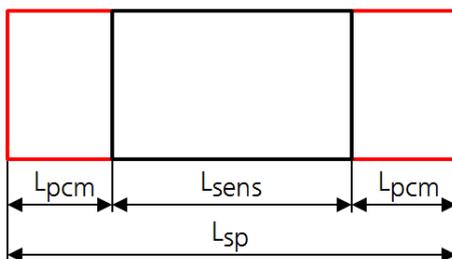


Abbildung 3.1: Schema des Verbundspeicheraufbaus

Dabei werden für das verkapselte PCM und das sensible Speicher material die gleichen Partikeldurchmesser verwendet. Die Länge der beiden PCM-Abschnitte wird mithilfe des PCM-Anteils im Speicher r_{pcm} definiert. Es gilt:

$$L_{pcm} = \frac{L_{sp} r_{pcm}}{2} \quad (3.1)$$

Die Massenanteile der beiden PCM-Bereiche $m_{pcm,1}^*$ und $m_{pcm,2}^*$ sowie des sensiblen Speicher material m_{sens}^* berechnen sich mit Gleichung (3.1) folgendermaßen:

$$m_{pcm,1}^* = \frac{m_{pcm,1}}{m_{sp}} = \frac{\rho_{pcm,1}}{\rho_{pcm,1} + \rho_{pcm,2} - 2\left(1 - \frac{1}{r_{pcm}}\right)\rho_{sens}} \quad (3.2)$$

mit m_{sp} = Gesamtspeichermasse
 $m_{pcm,1}$ = Masse des PCMs im PCM-Bereich 1
 $\rho_{pcm,1}$ = Dichte des PCMs im PCM-Bereich 1
 $\rho_{pcm,2}$ = Dichte des PCMs im PCM-Bereich 2
 ρ_{sens} = Dichte des sensiblen Speichermaterials

$$m_{pcm,2}^* = \frac{m_{pcm,2}}{m_{sp}} = \frac{\rho_{pcm,2}}{\rho_{pcm,1} + \rho_{pcm,2} - 2\left(1 - \frac{1}{r_{pcm}}\right)\rho_{sens}} \quad (3.3)$$

mit $m_{pcm,2}$ = Masse des PCMs im PCM-Bereich 2

$$m_{sens}^* = \frac{m_{sens}}{m_{sp}} = \frac{\rho_{sens}}{\frac{r_{pcm}}{2(1 - r_{pcm})}(\rho_{pcm,1} + \rho_{pcm,2}) + \rho_{sens}} \quad (3.4)$$

3.2 Materialeigenschaften

Die Stoffwerte des sensiblen Speichermaterials werden, wie im bisherigen Modell, temperaturunabhängig vorgegeben. Für das verwendete Fluid Luft werden die in Anhang B aufgeführten Stoffwert Routinen verwendet. Die Stoffwerte werden für jedes Speichersegment in Abhängigkeit der Temperatur in jedem Zeitschritt neu berechnet. Für das Phasenwechselmaterial werden die Werte für die Wärmeleitfähigkeit λ_{pcm} , Dichte ρ_{pcm} und spezifische Wärmekapazität c_{pcm} benötigt. Die Wärmekapazität wird für die eingesetzte Kapazitätsmethode (vgl. Abschnitt 2.3) durch eine Kapazitätsfunktion $c_{pcm}(T)$ definiert. Der Wert der spezifischen Wärmekapazität wird in jedem PCM-Segment im Speicher zu jedem Zeitschritt n in Abhängigkeit der Temperatur T_s^n des PCMs neu berechnet.

Für die PCM-Partikelschüttung ist eine Verkapselung nötig. Die Eigenschaften des Verkapselungsmaterials werden im Modell nicht berücksichtigt. Diese Annahme wird auch in der Literatur bei Untersuchung von verkapselten PCM getroffen [22]. Voraussetzung für diese Annahme ist eine im Vergleich zum PCM hohe Wärmeleitfähigkeit und eine dünnwandige Ausführung der Verkapselung. Die geringe Dicke der Verkapselung ermöglicht die Vernachlässigung der Wärmekapazität des verwendeten Materials.

3.3 Berechnungsverfahren

Das Berechnungsverfahren für den Verbundspeicher beruht weiterhin auf einem 2-Phasenmodell. Für die Bilanzierung werden dieselben Annahmen getroffen wie bisher. Allerdings wurden die verwendeten Differenzialgleichungen angepasst. Die Gleichungen (2.5) und (2.6) werden wie folgt verwendet:

Fluid:

$$\theta_{f,i}^{n+1} - \theta_{f,i-1}^{n+1} = \Lambda_i^n (\theta_{s,i}^{n+1} - \theta_{f,i}^{n+1}) \quad (3.5)$$

mit $\Lambda_i^n = \frac{\bar{\alpha}_i^n A_{w\ddot{u},i}}{\dot{m}_f c_{p,f,i}^n}$

Feststoff:

$$\theta_{s,i}^{n+1} - \theta_{s,i}^n = \Pi_i^n (\theta_{f,i}^{n+1} - \theta_{s,i}^{n+1}) \quad (3.6)$$

mit $\Pi_i^n = \frac{\bar{\alpha}_i^n A_{w\ddot{u},i} \Delta t}{m_{s,i} c_{s,i}^n}$

Die beiden Parameter Λ_i^n und Π_i^n werden im adaptierten Modell in jedem Zeitschritt n für jedes Speichersegment i in Abhängigkeit der Temperatur des Fluids $T_{f,i}^n$ und des Feststoffs $T_{s,i}^n$ berechnet. Für die Feststoffknoten werden die Stoffwerte des sensiblen Speichermaterials oder des PCMs verwendet. Für die PCM-Knoten wird $c_{s,i}^n$ durch die gewählte Kapazitätsfunktion berechnet.

Die Diskretisierung des Verbundspeichers wird für die PCM-Abschnitte feiner als für den sensiblen Abschnitt ausgeführt (siehe Abbildung 3.2). Dadurch wird zum einen die temperaturabhängige Wärmekapazität des PCMs besser abgebildet und die Rechenzeit durch Einsparung von sensiblen Speichersegmenten reduziert. Die Knotenzahl in den beiden PCM-Speicherbereichen k_{pcm} wird in Abhängigkeit der Länge dieser Speicherbereiche L_{pcm} durch k_{kpm} vorgegeben. Die Knotenzahl in den beiden PCM-Abschnitten berechnet sich wie folgt:

$$k_{pcm} = k_{kpm} L_{pcm} \quad (3.7)$$

Im sensiblen Speicherteil wird eine festgelegte Knotenzahl k_{sens} vorgegeben. Die wärmeübertragende Oberfläche $A_{w\ddot{u}}$ ist durch die unterschiedliche Gitterweite in PCM und sensiblen Speicherteilen in den jeweiligen Abschnitten verschieden und wird für jeden Bereich berechnet.

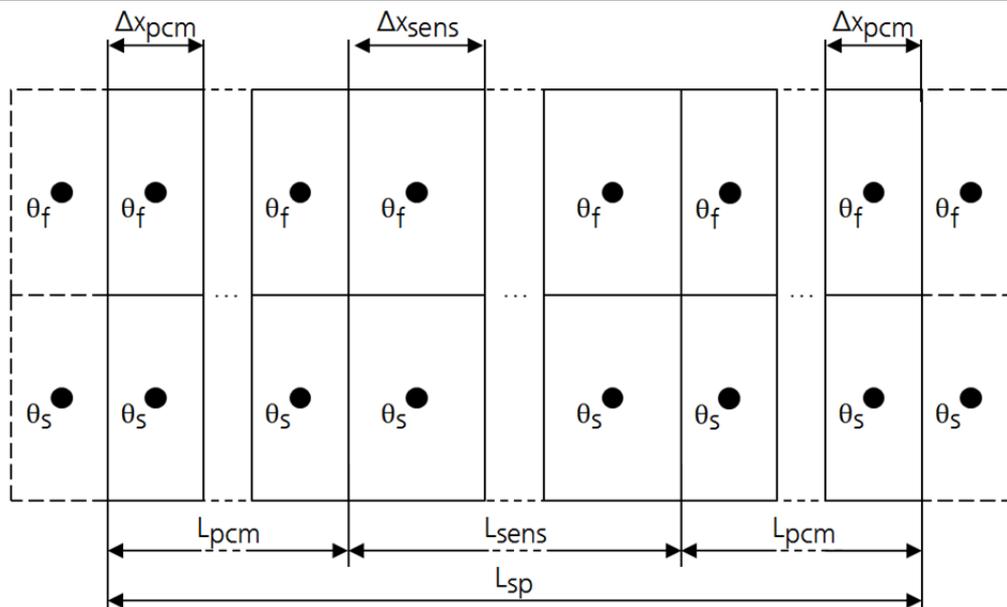


Abbildung 3.2: Diskretisierungsschema für Verbundspeicher im adaptierten Berechnungsmodell

3.4 Druckverlustberechnung

Es wird die in Gleichung (2.15) angegebene Korrelation verwendet. Allerdings wird der gesamte Druckverlust im Speicher in jedem Zeitschritt n bei der Beladung $\Delta p_{f,be}^n$ und Entladung $\Delta p_{f,en}^n$ berechnet. Dazu wird die Summe des in den einzelnen Speichersegmenten auftretenden Druckverlusts gebildet. Die Fluidstoffwerte werden bei der Knotentemperatur $T_{f,i}^n$ berechnet. Die freie Strömungsgeschwindigkeit am Eintritt jedes Knoten i wird nach Gleichung (3.8) mithilfe der Fluidichte des vorherigen Knotens $i-1$ $\rho_{f,i-1}^n$ ermittelt.

$$u_{0,i}^n = \frac{\dot{m}_f}{\rho_{f,i-1}^n A_{sp}} \quad (3.8)$$

Die gesamte für den Ventilator nötige Energiemenge für einen Be- und Entladevorgang wird aus der Summe der in den einzelnen Zeitschritten nötigen Energiemenge berechnet:

$$E_{vent} = \sum_{n=1}^{n_{be}} \frac{\Delta p_{f,be}^n \dot{m}_f}{\rho_{f,1,be} \eta_{vent}} \Delta t + \sum_{n=1}^{n_{en}} \frac{\Delta p_{f,en}^n \dot{m}_f}{\rho_{f,1,en} \eta_{vent}} \Delta t \quad (3.9)$$

mit n_{be} = Anzahl der Zeitschritte in der Beladephase

n_{en} = Anzahl der Zeitschritte in der Entladephase

$\rho_{f,1,be}$ = Dichte des eintretenden Fluidmassenstroms in der Beladephase

$\rho_{f,1,en}$ = Dichte des eintretenden Fluidmassenstroms in der Entladephase

3.5 Exergetischer Wirkungsgrad

Der exergetische Wirkungsgrad η_{ex} bewertet gleichzeitig den zeitlichen Verlauf der Fluidaustrittstemperatur und den auftretenden Druckverlust im Speicher. Für die Bestimmung des exergetischen Wirkungsgrades existieren verschiedene Möglichkeiten. Dincer und Rosen ermitteln η_{ex} in [23] beispielsweise mit dem Quotienten aus der bei der Entladung dem Speicher entnommenen Exergie zu der bei der Beladung dem Speicher zugeführten Exergie. Für die Be- und Entladung wird jeweils die Änderung des Exergiegehalts des Luftmassenstroms betrachtet. Diese Methode berücksichtigt die bei der Be- und Entladung entstehenden Exergieverluste. Die Exergieverluste setzen sich dabei aus dem Exergieverbrauch durch Entropieerzeugung und den Exergieverluststrom an die Umgebung zusammen. Im Rahmen dieser Arbeit wird der exergetische Wirkungsgrad mithilfe der bei der Entladung auftretende Änderung des Exergiegehalts des Luftmassenstroms $\Delta Ex_{f,en}$ und der maximal theoretisch möglichen Exergieänderung bei der Entladung ΔEx_{max} berechnet (vgl. Gleichung (3.10)). Der Bezug auf ΔEx_{max} bewertet die auftretenden Exergieverluste stärker als bei der Variante von Dincer und Rosen. Dadurch können die Speichervarianten der Parameterstudie besser miteinander verglichen werden. Da im Berechnungsmodell keine Wärmeverluste an die Umgebung berücksichtigt werden, sind die Exergieverluste auf die Entropieänderung des Fluids zurückzuführen.

$$\eta_{ex} = \frac{\Delta Ex_{f,en}}{\Delta Ex_{max}} \quad (3.10)$$

Die Änderung der Exergie des Fluidstroms wird aus der Summe der Exergieänderung des Fluids in den einzelnen Zeitschritten bei der Entladung berechnet (siehe Gleichung (3.11)). Die Exergieänderung berechnet sich aus der Differenz der Enthalpieänderung des Fluidmassenstroms und der durch die Änderung der spezifischen Entropie Δs hervorgerufenen Exergieverluste beim Durchströmen des Speichers.

$$\Delta Ex_{f,en} = \sum_{n=1}^{n_{en}} \dot{m}_f \Delta t [c_{p,f} (T_{f,aus}^n - T_{en}) - (T_a + 273,15) \Delta s^n] \quad (3.11)$$

mit Δs^n = Entropieänderung

$$c_{p,f} = c_{p,f} \left(\frac{T_{be} + T_{en}}{2} \right)$$

T_{be} = Beladetemperatur

T_{en} = Entladetemperatur

T_a = 25 °C Umgebungstemperatur

Die Entropieänderung wird unter Annahme von idealem Gasverhalten berechnet:

$$\Delta s^n = c_{p,f} \ln \left(\frac{T_{f,aus}^n + 273,15}{T_{en} + 273,15} \right) - R_f \ln \left(\frac{p_{f,aus}}{p_{f,ein}} \right) \quad (3.12)$$

mit $R_f = 287,1 \text{ J/kg/K}$ spezifische Gaskonstante trockene Luft [24]

$$p_{f,aus} = 1 \text{ bar}$$

$$p_{f,ein}^n = p_{f,aus} + \Delta p_{f,en}^n$$

Die maximal mögliche Exergieänderung ΔEx_{max} bei der Entladung berechnet sich nach Gleichung (3.13). Die maximale Exergieänderung ergibt sich für einen Druckverlust von 0 Pa und für eine Erwärmung des Luftstroms von der Entladetemperatur zur Beladetemperatur. Für die Entropieänderung wird deshalb nur die Temperaturänderung berücksichtigt.

$$\Delta Ex_{max} = \dot{m}_f t_{en} \left[c_{p,f} (T_{be} - T_{en}) - (T_a + 273,15) c_{p,f} \ln \left(\frac{T_{be} + 273,15}{T_{en} + 273,15} \right) \right] \quad (3.13)$$

Ein Vergleich mit Realgasdaten zeigt, dass die Annahme von idealem Gasverhalten zur Berechnung der Entropie zulässig ist. Für eine Änderung der Temperatur von 300 °C auf 400 °C bei gleichzeitiger Druckänderung von 5 bar auf 1 bar ergibt sich bei der Entropieberechnung² eine Abweichung von unter 0,1 % zwischen der Berechnung mit realen Stoffwerten und der Berechnung mit idealen Gaseigenschaften.

3.6 Nutzungsgrad

Der Nutzungsgrad η_{nutz} beschreibt die energetische Ausnutzung des Speichermaterials. Er berechnet sich aus dem Verhältnis der beim Entladen entnommenen Energiemenge ΔE_{en} und der maximal speicherbaren Energiemenge $\Delta E_{sp,max}$. Die maximale Energiemenge berechnet sich für den Fall, dass der gesamte Speicher auf die Beladetemperatur erwärmt und auf die Entladetemperatur abgekühlt wird. Für den Nutzungsgrad gilt:

$$\eta_{nutz} = \frac{\Delta E_{en}}{\Delta E_{sp,max}} \quad (3.14)$$

Die entnommene Energiemenge ΔE_{en} berechnet sich aus der Änderung der inneren Energie aller Speicherknoten zwischen dem Ende der Beladung und dem Ende der Entladung:

² Die zugehörigen Stoffdaten des realen Gases sind dem VDI-Wärmeatlas entnommen [24].

$$\Delta E_{en} = \sum_{i=1}^k m_i \int_{T_i^{n_{en}}}^{T_i^{n_{be}}} c_i dT \quad (3.15)$$

mit k = Knotenzahl im Speicher

m_i = Masse des Knoten i

c_i = Kapazität des Knoten i

$T_i^{n_{be}}$ = Temperatur des Knoten i im letzten Zeitschritt der Beladung

$T_i^{n_{en}}$ = Temperatur des Knoten i im letzten Zeitschritt der Entladung

Je nachdem ob sich der Knoten i in einem sensiblen Speicherbereich oder in einem der beiden PCM-Bereiche befindet, wird für m_i die entsprechende Knotenmasse des Bereichs verwendet. Für die Kapazität c_i wird im sensiblen Speicherbereich ein konstanter Wert verwendet und in den PCM-Bereichen die jeweiligen Kapazitätsfunktion des Phasenwechselmaterials.

Die maximal speicherbare Energiemenge berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$\Delta E_{sp,max} = \sum_{i=1}^k m_i \int_{T_{en}}^{T_{be}} c_i dT \quad (3.16)$$

Je nach Speicherbereich werden auch für diese Gleichung die entsprechenden Knoteneigenschaften verwendet.

4 Untersuchung verschiedener Kapazitätsfunktionen

Für die Verwendung der Kapazitätsmethode zur Beschreibung des energetischen Verhaltens von Phasenwechselmaterialien wird eine Kapazitätsfunktion benötigt (vgl. Abschnitt 2.3). In diesem Kapitel sollen zunächst mögliche Funktionen vorgestellt werden. Anschließend soll deren Eignung für den Einsatz in dem neuen Berechnungsmodell untersucht werden. Dies erfolgt anhand der Genauigkeit der energetischen Bilanzierung des Phasenwechselmaterials sowie der für die Simulation nötigen Rechenzeit.

Für das PCM wird von einem gleichen Schmelz- und Erstarrungsverhalten ausgegangen, d.h. die Kapazitätsfunktion wird für die beiden Vorgänge verwendet. Die Wärmekapazität des festen und flüssigen Materials wird gleich und als temperaturunabhängig angenommen. Es gilt:

$$c_{pcm,sf} = c_{pcm,s} = c_{pcm,f} \quad (4.1)$$

Die Untersuchungen werden anhand von Natriumnitrat NaNO_3 durchgeführt. Die Materialeigenschaften von NaNO_3 sind in Tabelle 4.1 aufgeführt.

Tabelle 4.1: Materialeigenschaften von NaNO_3 [25]

Materialeigenschaft	Symbol	Wert	Einheit
Dichte	ρ_{pcm}	2011	kg/m^3
Schmelztemperatur	T_{sm}	306	$^{\circ}\text{C}$
Spezifische Wärmekapazität	$c_{pcm,sf}$	1655	J/kg/K
Wärmeleitfähigkeit	λ_{pcm}	0,514	W/m/K
Schmelzenthalpie	h_{sm}	178000	J/kg

4.1 Ausgewählte Funktionen

Die Kapazitätsfunktion $c_{pcm}(T)$ setzt sich wie in Gleichung (2.25) gezeigt aus den drei Funktionen $c_{pcm,s}(T)$, $c_{pcm,f}(T)$ und $c_{pcm,pw}(T)$ zusammen. Die Kapazitäten $c_{pcm,s}(T)$, $c_{pcm,f}(T)$ sind durch $c_{pcm,sf}$ bereits definiert. Für den Kapazitätsverlauf im Phasenwechselbereich $c_{pcm,pw}(T)$ sollen vier Varianten untersucht werden:

- eine Sprung-Funktion
- eine Gauß-Funktion (Normalverteilung)
- eine Sinus-Funktion
- eine Sinus-Funktion mit Plateau

Die einfachste Variante die Schmelzenthalpie in der Kapazitätsmethode zu berücksichtigen ist die Sprung-Funktion. Sie wurde zum Beispiel von Stückle in [26] verwendet. Die Gauß-Funktion wurde bereits erfolgreich von Samara eingesetzt [27] und soll deshalb auch hier betrachtet werden. Die beiden Ansätze der Sinus-Funktion wurden im Rahmen dieser Arbeit ausgearbeitet.

Die Temperaturgrenzen $T_{pw,1}$ und $T_{pw,2}$ von $c_{pcm,pw}(T)$ werden für alle Verläufe symmetrisch um die Schmelztemperatur T_{sm} angenommen. Mit der Temperaturdifferenz ΔT_{pw} ergeben sich die Temperaturgrenzen zu

$$T_{pw,1} = T_{sm} - \Delta T_{pw} \quad (4.2)$$

und

$$T_{pw,2} = T_{sm} + \Delta T_{pw} \quad (4.3)$$

Um den Einfluss unterschiedlich breiter Schmelzbereiche zu analysieren, wird die Temperaturdifferenz ΔT_{pw} für die verschiedenen Kapazitätsfunktionen unterschiedlich gewählt.

Für die Untersuchung der verschiedenen Verläufe gilt die Definition der Kapazitätsfunktion in Gleichung (2.24). Die Fläche unter den Funktionsverläufen muss demnach der Summe aus der Schmelzenthalpie des PCMs und der durch $c_{pcm,sf}$ in den Temperaturgrenzen umgesetzten sensiblen Energiemenge betragen.

In Abbildung 4.1 sind die Kapazitätsverläufe der verschiedenen Funktionen für NaNO_3 dargestellt. Die grundlegenden Gleichungen dieser Verläufe sollen im Folgenden mit den zugehörigen Parametern erläutert werden.

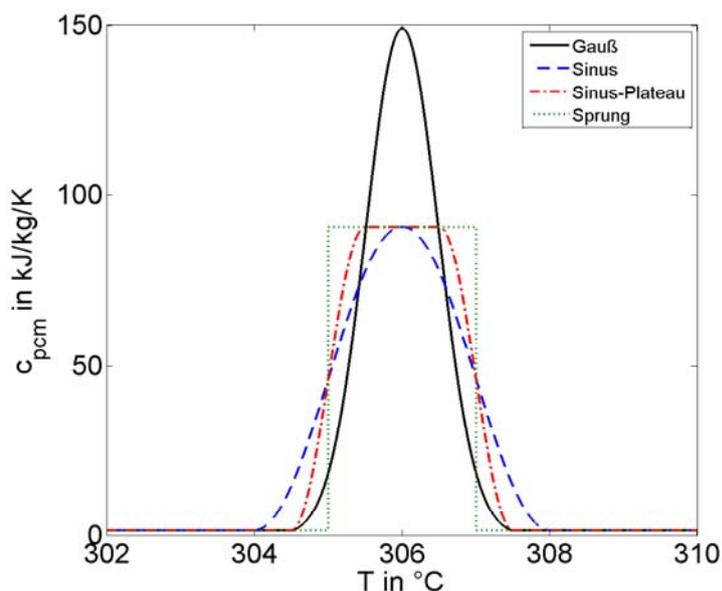


Abbildung 4.1: Verläufe der untersuchten Kapazitätsverläufe für Gauß-, Sinus- und Sprungfunktion sowie für die Sinus-Funktion mit Plateau

Für die Sprungfunktion wird $c_{pcm,pw}(T)$ durch die Gleichung (4.4) festgelegt. Die Kapazität springt von $c_{pcm,sf}$ beim Eintritt in den Phasenwechselbereich auf den Wert von $c_{pcm,pw}$ und bleibt zwischen den Temperaturgrenzen $T_{pw,1}$ und $T_{pw,2}$ konstant.

$$c_{pcm,pw} = \frac{h_{sm}}{2\Delta T_{pw}} + c_{pcm,sf} \quad (4.4)$$

Beim Verlassen des Phasenwechselbereichs springt die Kapazität wieder auf $c_{pcm,sf}$. Für ΔT_{pw} wurde von Stücker in [26] ein Wert von 0,5 K verwendet. In dieser Arbeit wird für ΔT_{pw} ein Wert von 1 K verwendet. Die Sprungfunktion bietet eine einfache Möglichkeit den Phasenwechsel eines Materials zu berücksichtigen. Nachteilig ist jedoch die sprunghafte Änderung. Diese entspricht in keinem Fall einem real zu erwartenden Verhalten von PCM.

Für die Gauß-Funktion wird der Zusammenhang zwischen Kapazität und Temperatur mithilfe der Gleichung für die Normalverteilung beschrieben. In angepasster Form ergibt sich folgende Gleichung:

$$c_{pcm,pw}(T) = (h_{sm} + c_{pcm,sf} 2\Delta T_{pw}) \frac{1}{\sqrt{2\pi \left(\frac{\Delta T_{pw}}{y}\right)^2}} e^{-\frac{(T-T_{sm})^2}{2\left(\frac{\Delta T_{pw}}{y}\right)^2}} \quad (4.5)$$

Diese Gleichung wird zur Beschreibung des Kapazitätsverlaufes innerhalb der Temperaturgrenzen $T_{pw,1}$ und $T_{pw,2}$ verwendet. Die Temperaturdifferenz ΔT_{pw} wird für diese Funktion nicht vorgegeben. Stattdessen wird ΔT_{pw} mit den folgenden Randbedingungen numerisch bestimmt:

- Die Fläche unter dem Kurvenabschnitt soll 99,73 % der Schmelzenthalpie und der durch $c_{pcm,sf}$ umgesetzten Energiemenge im Temperaturbereich von $T_{pw,1}$ und $T_{pw,2}$ beinhalten.
- Für die beiden Grenztemperaturen $T_{pw,1}$ und $T_{pw,2}$ soll die Kapazitätsfunktion dem Wert $c_{pcm,sf} = 1655 \text{ J/kg/K}$ entsprechen.

Zum Erreichen der ersten Vorgabe muss für y ein Wert von 3 verwendet werden. Mit der zweiten Vorgabe ergibt sich zusammen mit y die Temperaturdifferenz ΔT_{pw} zu 1,46904 K. Die Begrenzungen des Kurvenabschnitts führen für die Gauß-Funktion jeweils zu einem Knick im Kapazitätsverlauf an den Grenzen.

Die Sinus-Funktion wird durch die Amplitude c_A , die Winkelfrequenz ω , die Phasenverschiebung ϕ und dem Versatz c_{vers} parametrisiert und kann wie folgt zur Beschreibung des Kapazitätsverlaufes angesetzt werden:

$$c_{pcm,pw}(T) = c_{A,sin} \sin(\omega_{sin} T + \varphi_{sin}) + c_{vers,sin} \quad (4.6)$$

$$\text{mit } c_{A,sin} = \frac{h_{sm}}{2\Delta T_{pw}} \quad \omega_{sin} = \frac{\pi}{\Delta T_{pw}} \quad \varphi_{sin} = \frac{0.5\Delta T_{pw} - T_{sm}}{\Delta T_{pw}} \pi \quad c_{vers,sin} = c_{A,sin} + c_{pcm,sf}$$

Für den in Abbildung 4.1 gezeigten Verlauf wird ein ΔT_{pw} von 2 K angenommen. Im Vergleich zur Gauß- und Sprung-Funktion erlaubt es die Sinusfunktion, einen stetig differenzierbaren Funktionsverlauf, also einen knickfreien Verlauf, über dem gesamten Temperaturbereich zu erzeugen.

Zur Umsetzung der Sinus-Funktion mit Plateau wird zwischen den Temperaturen $T_{pw,1}$ und $T_{pw,2}$ eine abschnittsweise definierte Funktion mit drei Temperaturbereichen verwendet. Zur Glättung des Übergangsbereichs beim Eintreten und Verlassen des Schmelzbereichs wird jeweils eine Sinus-Funktion verwendet. Zwischen den beiden Sinus-Funktionen wird für einen Temperaturbereich von 1 K ein Plateau eingesetzt.

$$c_{pcm,pw}(T) = \begin{cases} c_{A,sp} \sin(\omega_{sp} T + \varphi_{sp1}) + c_{vers,sp} & T_{pw,1} \leq T \leq T_{pw,1} + \frac{2}{3} \Delta T_{pw} \\ c_{A,sp} + c_{vers,sp} & T_{pw,1} + \frac{2}{3} \Delta T_{pw} < T < T_{pw,2} - \frac{2}{3} \Delta T_{pw} \\ c_{A,sp} \sin(\omega_{sp} T + \varphi_{sp2}) + c_{vers,sp} & T_{pw,2} - \frac{2}{3} \Delta T_{pw} \leq T \leq T_{pw,2} \end{cases} \quad (4.7)$$

$$\text{mit } c_{A,sp} = \frac{h_{sm}}{2\Delta T_{pw}} \quad \omega_{sp} = \frac{3\pi}{2\Delta T_{pw}} \quad \varphi_{sp1} = \frac{\frac{2}{3}\Delta T_{pw} - T_{sm}}{\frac{2}{3}\Delta T_{pw}} \pi \quad \varphi_{sp2} = \frac{-T_{sm}}{\Delta T_{pw}} \pi \quad c_{vers,sp} = c_{A,sp} + c_{pcm,sf}$$

Für diese Kapazitätsfunktion wird ein ΔT_{pw} von 1,5 K gewählt. Die damit erzeugte Kapazitätsfunktion stellt eine Lösung zwischen der abrupten Änderung der Sprung-Funktion und der dem flacheren Verlauf der reinen Sinus-Funktion dar.

4.2 Genauigkeit der Energiebilanz des Phasenwechselmaterials

Für die Untersuchung des Einflusses der verschiedenen Funktionen auf die Genauigkeit der Energiebilanz wird mit dem Berechnungsmodell ein reiner PCM-Speicher simuliert. Es wird der erste Beladevorgang eines Speichers betrachtet. Die verwendeten Simulationsparameter sind in Tabelle 4.2 aufgeführt. Der Speicher wird so lange beladen, bis die Austrittstemperatur den zulässigen Grenzwert überschreitet. Es werden die Zeitschrittweite und die gesamte Knotenzahl k_{ges} (inklusive Randbedingungsknoten) variiert.

Zur Analyse des numerischen Fehlers bei der energetischen Bilanzierung soll zum Vergleich der Kapazitätsfunktionen die im gesamten Speicher eingespeicherte Energiemenge verwendet werden. Die Energiemenge wird mit zwei verschiedenen Berechnungsmethoden ermittelt. Die erste Methode erfolgt mithilfe der mit dem Berechnungsmodell errechneten Knotentemperaturen des

PCMs in jedem Zeitschritt. Dazu wird die Gleichung (4.8) verwendet. Die Wärmekapazität wird für jedem Zeitschritt n mit der Knotentemperatur $T_{s,i}^n$ berechnet. Die Randbedingungsknoten werden nicht berücksichtigt.

$$E_{auf,num} = \sum_{n=1}^{n_{be}-1} \sum_{i=2}^{k_{ges}-1} m_i^n c_i^n (T_{s,i}^{n+1} - T_{s,i}^n) \quad (4.8)$$

Tabelle 4.2: Simulationsparameter zur Untersuchung der verschiedenen Kapazitätsverläufe

Betriebsparameter	Symbol	Wert	Einheit
Beladetemperatur Fluid	T_{be}	356	°C
Entladetemperatur Fluid	T_{en}	256	°C
Zulässige Änderung der Fluidaustrittstemperatur	ΔT_{mfa}	46	K
Starttemperatur Speicherinventar	$T_{s,initial}$	256	°C
Fluidmassenstrom	\dot{m}_f	100	kg/s
Querschnittsfläche des Speichers	A_{sp}	200	m ²
Länge des Speichers	L_{sp}	5	m
Simulationseinstellungen			
Anzahl der Berechnungsknoten	k_{ges}	30, 60, 120, 240	-
Zeitschrittweite	Δt	0,5, 1, 2, 3, 4, 10, 20, 30	s

In der zweiten Methode wird die aufgenommene Energiemenge mithilfe eines Integrals berechnet. Die Methode soll nachfolgend als analytische Berechnung (kurz ana) bezeichnet werden. Für jeden Knoten wird die aufgenommene Energiemenge zwischen der Starttemperatur $T_{s,initial}$ des Speichermaterials und der Endtemperatur $T_{s,i,end}$ bestimmt. Die Summe der aufgenommenen Energien aller Knoten ergibt die gesamte aufgenommene Energiemenge des Speichers (siehe Gleichung (4.9)). Die beiden Gleichungen werden mit einer Matlab-Routine berechnet³. Die analytische Berechnungsmethode ermöglicht eine deutlich exaktere Berechnung im Vergleich zur numerischen. Abweichungen der numerischen Berechnung von der analytischen geben

³ Zur Berechnung des Integrals in Gleichung (4.9) wird der Matlab-Befehl *integral* eingesetzt. Dieser verwendet eine absolute Fehlertoleranz von 10^{-10} .

demnach Auskunft über den numerischen Fehler des Berechnungsmodells der durch die zeitliche und räumliche Diskretisierung entsteht.

$$E_{auf,ana} = \sum_{i=2}^{k_{ges}-1} \int_{T_{s,initial}}^{T_{s,i,end}} m_{s,i} c_{s,i} dT \tag{4.9}$$

In Abbildung 4.2 ist das Verhältnis von $E_{auf,num}$ zu $E_{auf,ana}$ für die vier Funktionen für die verschiedenen Knotenzahlen über der Zeitschrittweite aufgetragen. Beim Vergleich der Gauß-Funktion und der beiden Sinus-Funktionen zeigt sich eine starke Abhängigkeit von der Zeitschrittweite Δt . Je größer Δt wird, desto größer wird der numerische Fehler des Modells für beinahe alle Varianten.

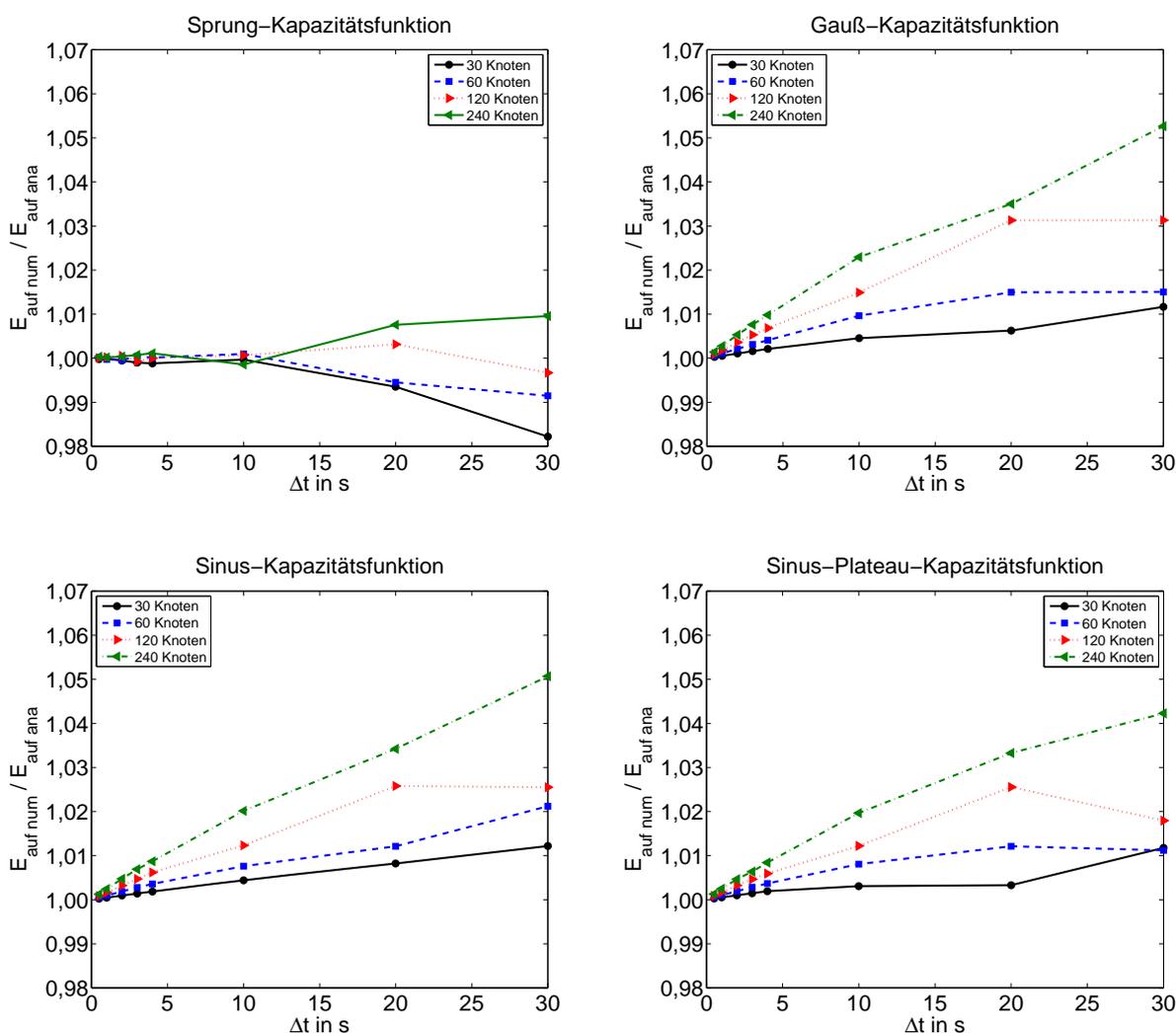


Abbildung 4.2: Verhältnis von numerisch und analytisch berechneter aufgenommener Energiemenge für verschiedene Zeitschrittweiten und Knotenzahlen. Links-Oben: Sprung-Kapazitätsfunktion; Rechts-Oben: Gauß-Kapazitätsfunktion; Links-Unten: Sinus-Kapazitätsfunktion; Rechts-Unten: Sinus-Plateau-Kapazitätsfunktion

Lediglich bei 120 Knoten wird bei einer Zeitschrittweite von 30 s eine geringere Abweichung gegenüber einer Zeitschrittweite von 20 s erreicht. Für die höheren Knotenzahlen 120 und 240 erreicht die Sinus-Funktion mit Plateau die geringsten Abweichungen. Die Gauß-Funktion führt bei diesen Knotenzahlen zu den größten Abweichungen. Der breitere Schmelzbereich und die hohen Kapazitätswerte der Gauß-Funktion im Bereich der Schmelztemperatur wirken sich bei diesen Knotenzahlen negativ auf die Genauigkeit der Berechnung aus. Bei kleineren Zeitschrittweiten nimmt der Unterschied zwischen den einzelnen Funktionen für alle Knotenzahlen deutlich ab. Die Sprung-Funktion führt tendenziell zu geringeren Abweichungen als die übrigen Funktionen. Außerdem ist nur für Zeitschrittweiten größer 10 s eine deutliche Zeitschrittweitenabhängigkeit festzustellen.

Auffällig ist bei allen Funktionen die geringere Abhängigkeit von der Zeitschrittweite bei geringen Knotenzahlen. Das Verhalten kann mit folgender Überlegung erklärt werden. Die höhere Knotenzahl führt zu kleineren Volumina der Speichersegmente und damit zu kleineren Massen innerhalb der Segmente. Da in allen Varianten ein gleich großer Fluidmassenstrom vorgegeben wird, werden kleine Speichermassen deutlich schneller durch das Fluid erwärmt. Die Temperaturänderung zwischen zwei Zeitschritten ist deshalb größer. Der Kapazitätsverlauf einzelner Knoten wird durch die größere Temperaturänderung schlechter abgebildet. Dies führt zu einer größeren Abweichung bei der Energieberechnung. In Abbildung 4.3 ist diese Problematik schematisch für einen Knoten der gerade in den Schmelzbereich eingetreten ist dargestellt. Gezeigt ist ein $c(T)$ Verlauf. Eingetragen sind die Knotentemperaturen von zwei aufeinander folgenden Zeitschritten sowie die dabei auftretenden Änderung der spezifischen Wärmekapazität Δc_s .

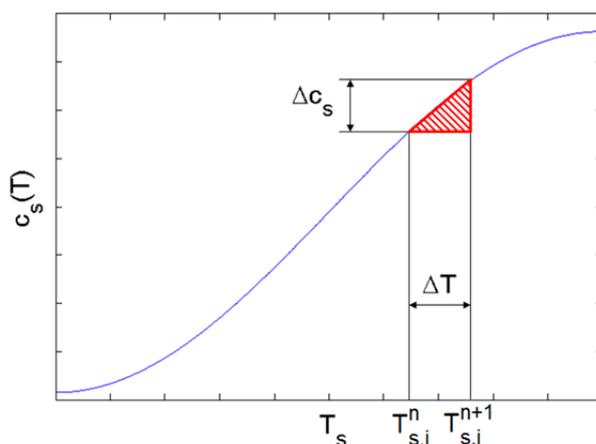


Abbildung 4.3: Schematischer $c(T)$ Verlauf zur Verdeutlichung des numerischen Fehlers bei der Energieberechnung durch ein zu große Temperaturänderung zwischen zwei Zeitschritten

Im Berechnungsmodell wird die durch die Temperatur des ersten Zeitschritts definierte Wärmekapazität verwendet, um die Änderung der Energiemenge zwischen den Zeitschritten zu be-

rechnen. Dabei entsteht ein Fehler der durch die schraffierte Fläche in Abbildung 4.3 veranschaulicht wird. Bei höheren Knotenzahlen und demnach größeren Temperaturdifferenzen nimmt dieser Fehler entsprechend zu. Kleinere Zeitschrittweiten führen zu kleineren Temperaturdifferenzen und damit zu kleineren Fehlern.

Aus der Abbildung 4.3 lässt sich außerdem darauf schließen, weshalb die Verhältnisse von $E_{\text{auf,num}}$ zu $E_{\text{auf,ana}}$ Werte von kleiner oder größer eins annehmen. Die Wärmekapazität nimmt beim Eintreten in den Schmelzbereich zu, bis ein Maximum erreicht wird. Diese Zunahme führt dazu, dass die Temperaturdifferenzen bis zum Erreichen des Maximalwerts immer kleiner werden. Demnach nimmt auch der numerische Fehler ab. Überschreitet der Knoten den Maximalwert, werden die Temperaturdifferenzen und der numerische Fehler in jedem Zeitschritt größer. Bis zum Erreichen der maximalen Kapazität nimmt das Material demzufolge zu wenig Energie auf, beim Verlassen dagegen zu viel. Je nachdem ob der Fehler beim Eintreten oder Verlassen des Schmelzbereichs dominiert, ergibt sich in Abbildung 4.2 ein Verhältnis von kleiner oder größer eins.

Für ein gutes Abbild des Kapazitätsverlaufs sollten möglichst kleine Zeitschrittweiten und für geringe numerische Fehler eine geringe Knotenzahl verwendet werden. Allerdings sollte zur realistischeren Abbildung des Speichers im Modell grundsätzlich eine höhere Knotenzahl bevorzugt werden.

Als maximal tolerierte Abweichung vom analytischen Wert wird in dieser Arbeit ein Fehler von 1 % festgelegt. Um diesen zu unterschreiten sollte für die Gauß-Funktionen mindestens eine Zeitschrittweite von 3 s, für die beiden Sinus-Funktionen 4 s und für die Sprung-Funktion von 20 s verwendet werden. Ausgehend von dieser Analyse treten für eine Zeitschrittweite von 3 s keine signifikanten Unterschiede zwischen diesen drei Funktionen auf. Dabei besitzen die unterschiedlich breiten Schmelzbereiche der Funktionen keinen nennenswerten Einfluss. Die beiden Sinus-Funktionen und die Gauß-Funktion können für das Berechnungsmodell eingesetzt werden. Die Sprung-Funktion wird trotz der guten Ergebnisse aufgrund des unrealistischen Verlaufs nicht eingesetzt.

4.3 Auswirkungen auf die Rechenzeit

Die Wärmekapazität wird in jedem Zeitschritt für alle Knoten neu berechnet. Je nachdem wie viel Zeit die Berechnung in Anspruch nimmt, lässt sich für umfangreiche Berechnungsvorhaben durch die Wahl der Kapazitätsfunktion eine deutliche Zeitersparnis erzielen.

Für die Untersuchung wird nur der für die Berechnung der Wärmekapazität nötige Abschnitt des Programmcodes verwendet. Dieser Abschnitt wird für die Sinus- und Gauß-Funktion für einen

Speicher mit 100 Knoten 100000 Mal aufgerufen. Dies entspricht bei einer Zeitschrittweite von 3 s einer simulierten Zeitdauer von 88,3 h. Der Speicher besitzt für die Berechnung in allen Knoten eine Temperatur von 306 °C. Die nötigen Berechnungszeiten sind in Tabelle 4.3 aufgeführt.

Tabelle 4.3: Benötigte Rechenzeit für die Berechnung der Wärmekapazität bei Verwendung der verschiedenen Kapazitätsfunktionen für 100000 Zeitschritte

Durchlauf	Zeit in s			
	Sprung	Gauß	Sinus	Sinus mit Plateau
1	4,066	4,213	4,210	4,985
2	4,108	4,211	4,237	4,946
3	4,087	4,190	4,216	4,982
4	4,060	4,211	4,195	4,955
5	4,098	4,248	4,214	5,007
Mittelwert	4,084	4,215	4,214	4,975

Im Mittel erzielt die der Sprung-Funktion die kürzeste Berechnungszeit. Die Gauß- und reine Sinus-Funktion benötigen annähernd die gleiche Zeit für die Berechnung. Die längste Berechnungszeit wird bei Verwendung der Sinus-Plateau-Funktion erreicht.

Die Sprung-Funktion wurde bereits im vorherigen Abschnitt für die Verwendung im Berechnungsmodell ausgeschlossen. Die Sinus-Plateau-Funktion scheidet nach dieser Betrachtung aufgrund der längeren Berechnungszeit aus. Abschließend kann festgehalten werden, dass die Gauß- und Sinus Funktion im Hinblick auf den Zeitaufwand am besten geeignet sind.

Für die Parameterstudie in Kapitel 6 wird das Phasenwechselmaterial mit der in dieser Arbeit entwickelten Sinus-Kapazitätsfunktion modelliert.

5 Validierung des adaptierten Berechnungsmodells

Das adaptierte Modell wird für die Berechnung von regenerativen Phasenwechselfeuchern validiert. Dazu werden die von Arkar et al. in [28] veröffentlichten Simulations- und Messergebnisse für die Beladung eines reinen Phasenwechselfeuchers verwendet. Es werden im Folgenden der untersuchte Speicheraufbau, die Modellierung des verwendeten PCM sowie die Simulationsbedingungen beschrieben. Abschließend werden in diesem Kapitel die Simulationsergebnisse dieser Arbeit mit den vorliegenden Daten verglichen.

5.1 Untersuchter Speicheraufbau

Betrachtet wird ein zylindrischer, vertikal stehender, nicht isolierter Speicher. Als PCM wird das Paraffin RT 20 der Firma Rubitherm eingesetzt. Das PCM ist in Polyethylenkugeln verkapselt. Die Geometriedaten sind nachfolgend tabellarisch aufgeführt.

Tabelle 5.1: Geometriedaten des untersuchten Speicheraufbaus zur Validierung des Berechnungsmodell

Speicherabmessungen	Symbol	Wert	Einheit
Speicherlänge	L_{sp}	1,52	m
Speicherdurchmesser	d_{sp}	0,34	m
Durchmesser Verkapselung	d_{verk}	0,05	m
Wandstärke Verkapselung	s_{verk}	1,00	mm

Die PCM-Kugeln sind im Speicher in 35 regelmäßigen Lagen angeordnet (vgl. Abbildung 5.1 links). Der Speicher wird von unten durchströmt. Als Wärmeträgerfluid wird Luft eingesetzt. Während des Betriebs werden im Speicher in der 16. Lage (von unten gezählt) drei verschiedene Temperaturen innerhalb einer PCM-Kapsel gemessen.



Abbildung 5.1: Links: Schematischer Aufbau des untersuchten Speichers zur Validierung des Berechnungsmodells. Die Pfeile deuten die Durchströmungsrichtung an. Rechts: Temperaturmessstellen innerhalb der PCM-Kapsel. [28]

Dazu ist die Kapsel mit drei PT-100 Temperatursensoren versehen. Die Temperatur wird an der untersten Stelle, im Zentrum und an der obersten Stelle des PCMs in der Kapsel gemessen (siehe Abbildung 5.1 rechts).

5.2 Materialmodell des verwendeten Phasenwechselmaterials

Die für die Modellierung nötige Kapazitätsfunktion wird für das verwendete Phasenwechselmaterial RT 20 mithilfe von Messdaten aufgestellt. Von Arkar et al. wurde die temperaturabhängige Wärmekapazität des PCMs mit einer DSC Messung (engl. differential scanning calorimetry, DSC) ermittelt. Bei der Messung wird gleichzeitig einer definierten Menge des PCMs und einer Referenzmaterialprobe eine vorgegebene Heizrate (Temperaturänderung pro Minute) aufgeprägt. Die nötige Leistung zum Erreichen der Heizrate wird für jede Temperatur gemessen. Aus der Differenz der nötigen Leistungen für das PCM und das Referenzmaterial kann die temperaturabhängige Wärmekapazität bestimmt werden [5], [28]. Der Kapazitätsverlauf wurde von Arkar et al. für Heizraten von 0,1 K/min, 1 K/min und 5 K/min ermittelt.

Für die Validierungssimulation des adaptierten Berechnungsmodells wird der Kapazitätsverlauf für 0,1 K/min verwendet. Für diesen Verlauf erzielten Arkar et al. die beste Übereinstimmung zwischen Simulations- und Messdaten. Der Kapazitätsverlauf wird zur Verwendung im Modell in drei Abschnitte unterteilt und durch zwei Potenzfunktionen sowie einem konstanten Bereich approximiert. Die gemessenen Verläufe und die Approximation sind in Abbildung 5.2 dargestellt.

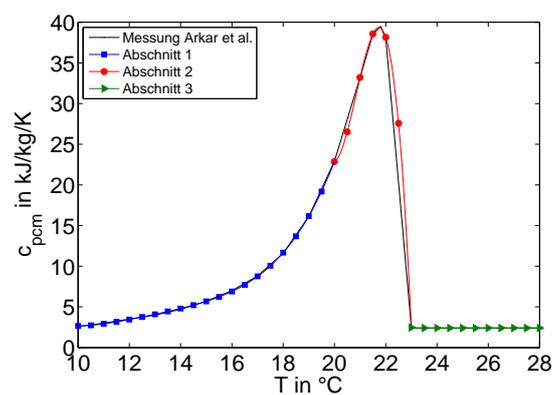


Abbildung 5.2: Gemessener und approximierter Kapazitätsverlauf des Paraffins RT20

Die Kapazitätsfunktion wird durch die Kapazitätsverläufe in den drei Abschnitten $c_1(T)$, $c_2(T)$ und $c_3(T)$ definiert:

$$\text{Abschnitt 1} \quad c_1(T) = a_{1,1}T^4 + a_{2,1}T^3 + a_{3,1}T^2 + a_{4,1}T + a_{5,1} \quad (5.1)$$

$$\text{Abschnitt 2} \quad c_2(T) = a_{1,2}T^3 + a_{2,2}T^2 + a_{3,2}T + a_{4,2} \quad (5.2)$$

$$\text{Abschnitt 3} \quad c_3(T) = 2400 \quad (5.3)$$

Die Parameter der beiden Gleichungen (5.1) und (5.2) sind in Tabelle 5.2 dargestellt. Mit diesen Parametern wird für beide Approximationen eine Bestimmtheitsmaß von 0,9999 erreicht.

Mit den Gleichungen (5.1) bis (5.3) lässt sich die Kapazitätsfunktion in J/kg/K folgendermaßen ausdrücken:

$$c_{pcm,RT20}(T) = \begin{cases} c_1(T) & 10 < T \leq 20 \\ c_2(T) & 20 < T \leq 20,9999 \\ c_3(T) & 20,9999 < T \end{cases} \quad (5.4)$$

Tabelle 5.2: Parameter für die approximierten Kurvenverläufe des gemessenen Kapazitätsverlaufs von RT20

Parameter	Wert
$a_{1,1}$	4,6620047
$a_{2,1}$	- 239,0054390
$a_{3,1}$	4628,0885781
$a_{4,1}$	- 39447,5919760
$a_{5,1}$	126700,6993009
$a_{1,2}$	- 5886,0777077
$a_{2,2}$	368134,2294151
$a_{3,2}$	- 7660844,3954777
$a_{4,2}$	53074714,7728453

Neben der Kapazitätsfunktion werden noch die Wärmeleitfähigkeit und die Dichte des PCMs benötigt. Aufgrund der fehlenden Angaben in [28] werden diese Stoffwerte dem Hersteller Datenblatt [29] entnommen. Für das Material wird eine mittlere Dichte von 825 kg/m³ und eine Wärmeleitfähigkeit von 0,2 W/m/K verwendet.

5.3 Simulationsbedingungen

Die von Arkar et al. gewählten Betriebsparameter des Speichers sollen auch für die Simulation verwendet werden. Die Werte sind in Tabelle 5.3 eingetragen. Es wird der erste Beladevorgang eines Speichers betrachtet. Der Speicher besitzt zu Beginn eine einheitliche Starttemperatur. Die Beladung wird so lange fortgeführt, bis die Austrittstemperatur den maximal zulässigen Wert erreicht.

Tabelle 5.3: Simulationsparameter zur Untersuchung der verschiedenen Kapazitätsverläufe

Betriebsparameter	Symbol	Wert	Einheit
Beladetemperatur Fluid	T_{be}	35	°C
Maximale Austrittstemperatur	$T_{f,aus}$	34,50	°C
Starttemperatur Speicherinventar	$T_{s,initial}$	11	°C
Fluidvolumenstrom	\dot{V}_f	215	m ³ /h

Für die Diskretisierung des Speichers werden drei Varianten betrachtet. In der ersten Variante werden die Einstellungen in Anlehnung an die von Arkar et al. verwendeten Parameter verwendet. Es werden 40 Knoten in Durchströmungsrichtung und eine Zeitschrittweite von 30 s gewählt. Die zweite Variante soll die Auswirkung einer deutlich feineren zeitlichen Diskretisierung zeigen. Die Knotenzahl in Durchströmungsrichtung beträgt in dieser Variante 40 und die Zeitschrittweite 0,5 s. Für die letzte Variante wird eine deutlich feinere zeitliche und räumliche Diskretisierung gewählt. Es werden eine Knotenzahl von 200 und eine Zeitschrittweite von 0,5 s gewählt.

5.4 Vergleich der Simulationsergebnisse mit Literaturdaten

Die Ergebnisse der Validierungssimulation sind für eine Knotenzahl von 40 und eine Zeitschrittweite von 30 s zusammen mit den Mess- und Simulationsergebnissen von Arkar et al. in Abbildung 5.3 links gezeigt. Um eine Höhe zu betrachten, die der 16. Kapsellage im realen Speicher entspricht, wird der Temperaturverlauf des 18. Knotens im Berechnungsmodell (vom Einlass aus gesehen) dargestellt. Die Verläufe zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen dem Berechnungsmodell und den Simulations- und Messdaten von Arkar et al. Die größte Übereinstimmung ergibt sich mit der Temperatur T_u an der untersten Stelle in der PCM-Kapsel. Der berechnete Temperaturverlauf weist allerdings eine Verzögerung auf. Die Ursache dafür können numerische Fehler und Modellfehler sein.

Der Einfluss der Diskretisierung auf den numerischen Fehler ist in Abbildung 5.3 rechts zu sehen. Die Abbildung zeigt die Ergebnisse der verschiedenen Diskretisierungsvarianten. Aufgrund des geringen Unterschiedes der einzelnen Verläufe, sind die Ergebnisse der verschiedenen Diskretisierungsvarianten nur für einen Temperaturbereich von 20 bis 36 °C und einen Zeitbereich von 2 bis 4 h gezeigt. Für 40 Knoten unterscheidet sich der Temperaturverlauf für eine Zeitschrittweite von 0,5 s nur minimal von dem Verlauf für eine Zeitschrittweite von 30 s.

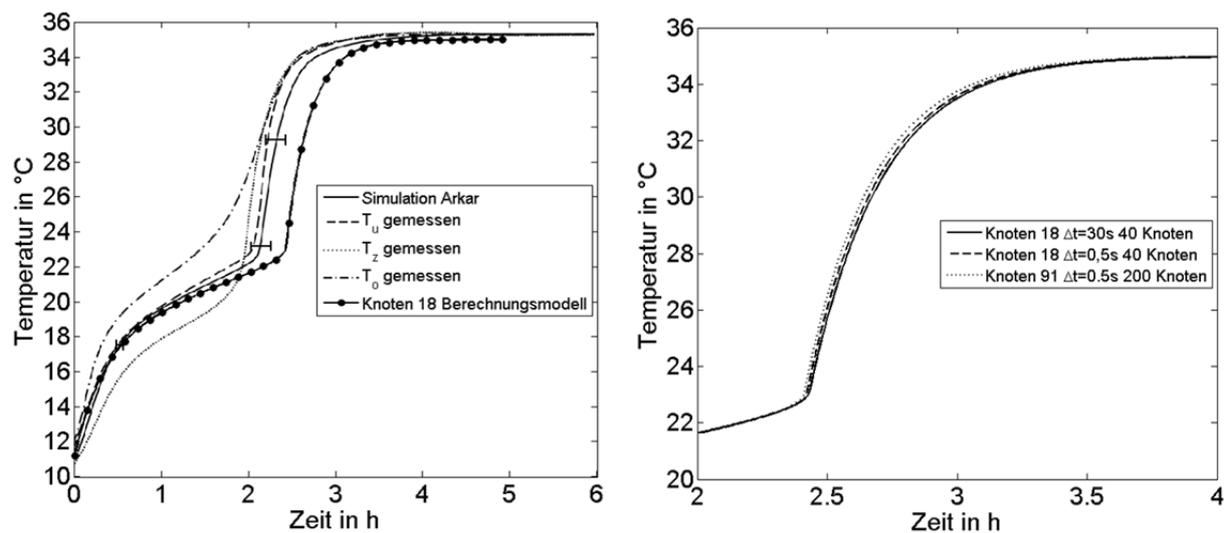


Abbildung 5.3: Links: Vergleich der berechneten Temperaturverläufe mit den von Arkar et al. simulierten und gemessenen Temperaturverläufen innerhalb des Speichers. Rechts: Vergleich der mit verschiedenen Diskretisierungsvarianten berechneten Temperaturverläufe.

Selbst für eine deutlich feinere räumliche Diskretisierung von 200 Knoten ist nur eine geringfügige Verbesserung festzustellen. Die Abbildung zeigt, dass der durch die Diskretisierung entstehende Fehler vernachlässigt werden kann. Die Unterschiede zwischen den Mess- und Simulationsdaten von Arkar et al. zu den Ergebnissen des Berechnungsmodells sind demnach auf Modellierungsfehler zurückzuführen. An dieser Stelle wird auf eine nähere Untersuchung der Modellfehler verzichtet. Es sei allerdings erwähnt, dass das Simulationsmodell von Arkar et al. deutlich aufwändiger gestaltet ist. Das Modell verwendet beispielsweise eine zweidimensionale räumliche Diskretisierung sowie eine Geschwindigkeitsverteilung des Fluids im Speicher. Außerdem werden Wärmeleitung im Fluid und zwischen den PCM-Kapseln berücksichtigt. Das Modell bietet demnach ein besseres Abbild der realen Vorgänge im Speicher.

Im Hinblick auf die durchzuführende Parameterstudie des Verbundspeicherkonzepts soll das im Rahmen dieser Arbeit adaptierte Berechnungsmodell aufgrund der qualitativ gut übereinstimmenden Temperaturverläufe für ausreichend detailliert und als valide betrachtet werden.

6 Parameterstudie zur Untersuchung von Verbundspeichern

Das Verbundspeicherkonzept wird mithilfe des adaptierten Berechnungsmodells untersucht. Die Parameterstudie wird durchgeführt, um den Einfluss verschiedener Parameter auf das thermische Verhalten des Speichers zu analysieren. Zur Bewertung des Verbundspeicherkonzepts werden die Eigenschaften von Verbundspeichern und rein sensiblen Speichern miteinander verglichen. Die Studie ist an die von Odenthal et al. in [4] durchgeführte Studie angelehnt. In dieser Veröffentlichung wurden mit dem bestehenden Berechnungsmodell rein sensible Regeneratorspeicher untersucht.

Nachfolgend werden die ausgewählten Studienparameter sowie die Eigenschaften der gewählten Phasenwechselmaterialien beschrieben. Danach werden die Ergebnisse einer Netzstudie zur Wahl einer angemessenen Diskretisierung der Verbundspeicher erläutert. Abschließend wird in diesem Kapitel die Auswertung der Studienergebnisse vorgenommen.

6.1 Festlegung der Studienparameter

Durch das zur Bewertung der Speicher eingesetzte Kraftwerksmodell (vgl. Abschnitt 2.2.6) werden die Betriebstemperaturen für die Studie vorgegeben. In Tabelle 6.4 sind die von Padilla [15] angegebenen nominellen Betriebsparameter des solarthermischen Kraftwerks aufgeführt. Die gezeigten Be- und Entladetemperaturen des Speichers ergeben sich aus den Betriebstemperaturen des Kraftwerks und der Grädigkeit des Luft-Öl-Wärmeübertragers. Die übrigen Betriebsparameter sind an die Simulationsparameter der Veröffentlichung von Odenthal et al. [4] angelehnt.

Die Leistungsgröße des verwendeten solarthermischen Kraftwerks erfordert den Einsatz von mehreren Speichern. Mit einem Wirkungsgrad des Kraftwerkblocks von 37,6 % muss bei der nominellen elektrischen Kraftwerksleistung eine 2,66-mal höhere thermische Leistung bereitgestellt werden. Um diese thermische Leistung mithilfe von Energiespeichern zur Verfügung zu stellen, müssen bei einer Speicherleistung von 10000 kW 12,87 Speicher verwendet werden. In der Berechnung findet diese Speicheranzahl lediglich bei Berechnung der Ventilatorleistung (vgl. Abschnitt 2.2.6) Berücksichtigung. Hier wird von einer 12,87-mal höheren Ventilatorleistung ausgegangen. Da die Berechnung der Kraftwerksleistung auf Basis der Temperatur des Wärmeträgerfluids erfolgt, muss hier keine Veränderung im Modell vorgenommen werden. Es werden die errechneten Temperaturen des 10000 kW Speichers verwendet.

Tabelle 6.1: Parameter für die Durchführung der Parameterstudie

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Nominelle Temperatur eintretendes Wärmeträgerfluid Kraftwerksblock	$T_{\text{wtf,ein,nom}}$	390	°C
Nominelle Temperatur austretendes Wärmeträgerfluid Kraftwerksblock	$T_{\text{wtf,aus,nom}}$	290	°C
Nominelle elektrische netto Kraftwerksleistung	$P_{\text{netto,nom}}$	48385,90	kW
Nomineller Wirkungsgrad Kraftwerksblock	η_K	37,6	%
Wirkungsgrad Ventilator	η_{vent}	80	%
Referenztemperatur	T_{ref}	400	°C
Beladetemperatur Speicher	T_{be}	380	°C
Entladetemperatur Speicher	T_{en}	280	°C
Grädigkeit Luft-Öl-Wärmeübertrager	$\Delta T_{\text{wü}}$	10	K
Beladezeit	t_{be}	8	h
Thermische Leistung Speicher	\dot{Q}_{sp}	10000	kW
Fluidmassenstrom	\dot{m}_f	100	kg/s
Porosität	ϵ	0,4	-

Als sensibles Speichermaterial wird Basalt verwendet. Die Materialeigenschaften von Basalt sind in Tabelle 6.2 gezeigt.

Tabelle 6.2: Materialeigenschaften von Basalt [30]

Materialeigenschaft	Symbol	Werte	Einheit
Dichte	ρ_{sens}	2992	kg/m ³
Spezifische Wärmekapazität	c_{sens}	820	J/kg/K
Wärmeleitfähigkeit	λ_{sens}	1,69	W/m/K

Bei der Festlegung der zu variierenden Parameter wird sich auf die Studie von Odenthal et al. [4] bezogen. Bei den Haupteinflussparametern für das thermische Verhalten rein sensibler Speicher handelt es sich um den Partikeldurchmesser der Schüttung d_p , die maximal zulässige Änderung der Austrittstemperatur ΔT_{mfa} sowie den Speicherquerschnitt A_{sp} . Für die Untersuchung von Verbundspeichern ist zusätzlich noch der Gesamtanteil des Phasenwechselmaterials im Speicher r_{pcm} entscheidend. Diese vier Parameter sollen in der Studie variiert werden. In jeder Variation

wird die Speicherlänge dahingehend optimiert, die definierte Beladezeit t_{be} zu erreichen. Dadurch wird ein Vergleich der Speichervarianten bei gleichen Randbedingungen möglich. Außerdem wird für jede Speichervariation der Be- und Entladevorgang wiederholt, bis sich der Speicher in einem eingeschwungen Zustand befindet (vgl. Abschnitt 2.2). In der nachfolgenden Tabelle sind die einzelnen Variationen aufgeführt. Insgesamt werden 2800 Speichervariationen berechnet.

Tabelle 6.3: Auflistung der gewählten Parametervariationen

Parameter	Werte										Einheit
d_p	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,7	0,08	0,09	0,10	m
ΔT_{mfa}	15	25	35	45	55	65	75	85			K
A_{sp}	200	400	600	800	1000						m ²
r_{pcm}	0	5	10	20	30	40	50				%

Die Parameterstudie wurde auf mehreren Desktop PCs durchgeführt. Exemplarisch wird hier nur der Hauptrechner beschrieben. Dieser ist mit einem Intel(R) Core(TM) i3-2120 Prozessor mit 3,30 GHz ausgestattet. Der Rechner besitzt einen Arbeitsspeicher von 8 GB und wird mit Windows 7 Enterprise betrieben. Die Berechnungen erfolgten mit Matlab R2012b. Es wurde simultan mit mehreren Matlabinstanzen simuliert. Für alle Instanzen ergibt sich eine gesamte Berechnungszeit von 43,5 Tagen. Auf den Hauptrechner umgerechnet würden bei einem Betrieb von drei Programminstanzen 14,5 Tage für die Berechnung benötigt.

6.2 Auswahl des Phasenwechselmaterials

Im Verbundspeicher werden zwei unterschiedliche Phasenwechselmaterialien eingesetzt. Die beiden Materialien besitzen unterschiedliche Schmelztemperaturen. Ein hochschmelzendes PCM wird, für die Beladung betrachtet, am Speichereintritt und ein niedrighschmelzendes wird am Speicheraustritt verwendet. Für diese Anordnung ergaben sich bei den Untersuchungen von Galione et al. Vorteile für das thermische Verhalten des Speichers [21]. Das niedrig schmelzende PCM soll zu einer längeren niedrigen Austrittstemperatur bei der Beladung führen. Dadurch steht dem Kollektorfeld des solarthermischen Kraftwerks länger eine konstante Eintrittstemperatur zur Verfügung. Die Erwärmung des Wärmeträgerfluids erfolgt kontrollierter. Das hochschmelzende PCM wird zur Stabilisierung der sinkenden Austrittstemperatur bei der Entladung eingesetzt und ermöglicht dadurch eine höhere Effizienz des gekoppelten Kraftwerksprozesses. Um nur den Effekt der unterschiedlichen Schmelztemperatur zu erhalten, werden zwei fiktive

Phasenwechselmaterialien verwendet. Die beiden PCMs sind modifizierte Varianten von Kaliumhydroxid KOH. In Tabelle 6.4 sind die Stoffwerte von KOH und der beiden fiktiven PCMs aufgeführt. Die Schmelztemperatur der Materialien wird auf 370 °C und 290 °C gesetzt. Diese Wahl der Schmelztemperaturen lässt bei der Be- und Entladung für beide PCMs einen vollständigen Phasenwechsel zu. Die übrigen Materialeigenschaften entsprechen denen von KOH. Die beiden Materialien werden entsprechend Ihrer Schmelztemperatur im Folgenden als KOH370 und KOH290 bezeichnet.

Tabelle 6.4: Materialeigenschaften von KOH und der beiden modifizierten PCMs KOH370 und KOH290

Materialeigenschaft	Symbol	KOH	KOH370	KOH290	Einheit
Dichte	ρ_{pcm}	2044	2044	2044	kg/m ³
Schmelztemperatur	T_{sm}	380	370	290	°C
Spezifische Wärmekapazität	$c_{\text{pcm, sf}}$	1488,29	1488,29	1488,29	J/kg/K
Wärmeleitfähigkeit	λ_{pcm}	0,5	0,5	0,5	W/m/K
Schmelzenthalpie	h_{sm}	149700	149700	149700	J/kg

Zur Modellierung der Phasenwechselmaterialien können nach Kapitel 4 die Gauß- und Sinus-Kapazitätsfunktion verwendet werden. Es existiert kein signifikanter Unterschied im Hinblick auf die Genauigkeit der energetischen Bilanzierung und des benötigten Rechenaufwandes zwischen diesen beiden Varianten. Für die Parameterstudie wird das Phasenwechselmaterial mit der in dieser Arbeit entwickelten Sinus-Kapazitätsfunktion modelliert.

6.3 Netzstudie

Damit das thermische Verhalten der unterschiedlichen Speicher ausreichend genau abgebildet werden kann, muss eine hinreichend feine räumliche und zeitliche Diskretisierung verwendet werden. Diese Diskretisierung soll mithilfe einer Netzstudie ermittelt werden. Zur Durchführung der Netzstudie wird ein Verbundspeicher mit den in Tabelle 6.5 gezeigten Parametern verwendet. Es wird der erste Beladevorgang des Speichers bis zum Erreichen der zulässigen Austrittstemperatur betrachtet.

Die Knotenzahl im sensiblen Speicherteil wird konstant eingestellt. Die Knotenzahl im Bereich der Phasenwechselmaterialien wird durch die Knotenzahl pro Meter PCM k_{kpm} variiert. Es wird ein Speicher mit einer niedrigen Querschnittsfläche verwendet, da bei diesen Speichervarianten die größten Fluidgeschwindigkeiten und damit die größten zeitlichen Temperaturgradienten innerhalb des Speichermaterials zu erwarten sind. Der kleine Partikeldurchmesser führt zu den

höchsten Wärmeübergangskoeffizienten und damit ebenfalls zu den stärksten Temperaturgradienten. Für die Speicherlänge und den PCM-Anteil im Speicher wird ein typischer Wert der Parameterstudie verwendet.

Tabelle 6.5: Parameter zur Durchführung der Netzstudie

Betriebsparameter	Symbol	Wert	Einheit
Beladetemperatur Fluid	T_{be}	380	°C
Zulässige Änderung der Fluidaustrittstemperatur	ΔT_{mfa}	85	K
Referenztemperatur	T_{ref}	400	°C
Starttemperatur Speicherinventar	$T_{s,initial}$	280	°C
Fluidmassenstrom	\dot{m}_f	100	kg/s
Partikeldurchmesser	d_p	0,01	m
Porosität	ϵ	0,4	-
Querschnittsfläche des Speichers	A_{sp}	200	m ²
PCM Anteil im Speicher	r_{pcm}	20	%
Länge des Speichers	L_{sp}	10	m
Knoten sensibler Speicherteil	k_{sens}	120	-
Knoten pro Meter PCM	k_{kpm}	50, 150, 250, 350, 450	1/m
Zeitschrittweite	Δt	0.5, 1, 2, 3, 4	s

Zur Bewertung der verschiedenen Parametersätze werden die normierte Feststofftemperatur und die normierte Austrittstemperatur des Speichers verwendet. Die Feststofftemperatur wird für alle Varianten an der gleichen Position im PCM-Abschnitt am Speicheraustritt betrachtet. Es werden die Temperaturen an der Position des letzten Knotens im Speicher für die Diskretisierungsvariante von k_{kpm} gleich 50 verwendet. Für diese Diskretisierungsvariante entspricht dies der Position des 50. Knotens in dem PCM-Abschnitt.

Zum Vergleich der einzelnen Varianten sollen als Bezugswerte für die Feststoff- und Fluidaustrittstemperatur die Ergebnisse für ein k_{kpm} von 450 bei einer Zeitschrittweite von 0,5 s dienen. In Abbildung 6.1 sind die Abweichungen der normierten Feststofftemperaturen $\Delta\theta_s^*$ und der Fluidaustrittstemperatur $\Delta\theta_{f,aus}^*$ von diesen Bezugswerten in % über der Knotenzahl in den PCM-Abschnitten k_{pcm} dargestellt. Die maximalen Abweichungen betragen -2,4 % bei der Feststofftemperatur und -1,5 % bei der Fluidaustrittstemperatur. Bei größeren Zeitschrittweiten er-

geben sich niedrigere Temperaturen (vgl. Anhang C), wohingegen mit abnehmender Zeitschrittweite die Knoten- und Fluidaustrittstemperaturen höhere Werte erreichen. Für die Fluidaustrittstemperaturen sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten geringer.

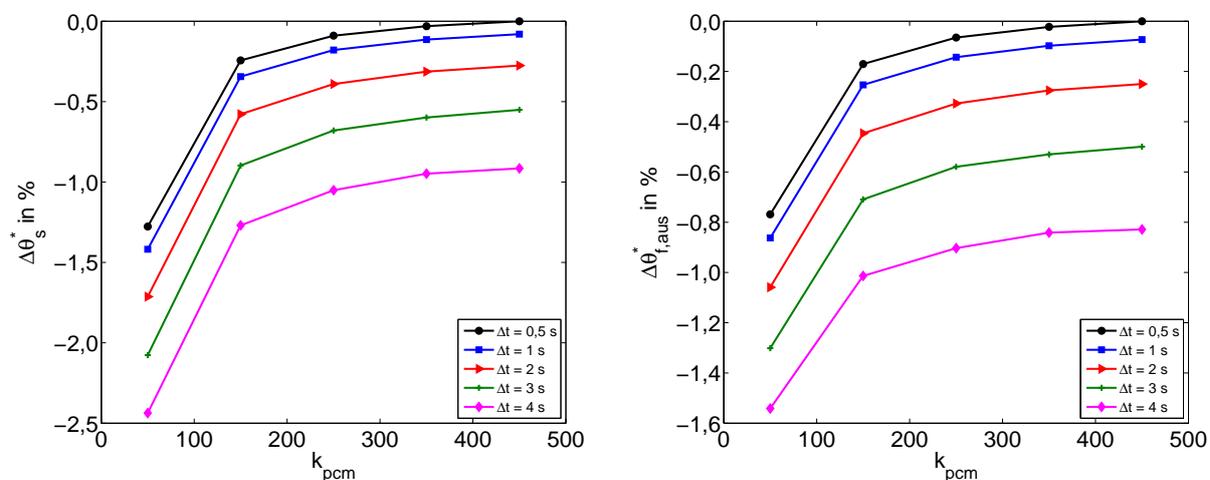


Abbildung 6.1: Prozentuale Abweichungen der Feststofftemperatur $\Delta\theta_s^*$ (links) und der Fluidaustrittstemperatur $\Delta\theta_{f,aus}^*$ (rechts) von der Diskretisierungsvariante für $\Delta t = 0,5$ s und $k_{pcm} = 450$ für ΔT_{mfa} von 85 K. Die Abweichungen sind für die verschiedenen Variationen von Δt über k_{pcm} aufgetragen.

Die Abhängigkeit von der Zeitschrittweite zeigt, dass durch größere Zeitschrittweiten ein verzögerter Temperaturverlauf gegenüber kleineren Zeitschrittweiten auftritt. Die Ursache dieser Verzögerung liegt in den temperaturabhängigen Stoffwerten der Luft. Werden die Temperaturverläufe des ersten Knoten im Speicher für die Zeitschrittweiten von 0,5 s und 4 s miteinander verglichen, ergibt sich bereits für diesen Knoten ein minimal verzögerter Temperaturanstieg bei der größeren Zeitschrittweite. In Anhang D ist dieser Vergleich graphisch für ein k_{kpm} von 50 dargestellt. Im gezeigten Zeitraum kommt es zu keinem Phasenwechsel. Aufgrund der geringen Abweichungen von unter 2,5 % wird der Fehler als akzeptabel angesehen.

Ausgehend von den Ergebnissen dieser Netzstudie und der Analyse der verschiedenen Kapazitätsfunktionen in Kapitel 4, wird für die Parameterstudie eine Zeitschrittweite von 3 s und eine Knotenzahl pro Meter PCM von 50 verwendet.

6.4 Auswertung der Studienergebnisse

Zur Bewertung der thermischen Eigenschaften der Speicher wird der Gesamtwirkungsgrad η_{ges} untersucht. Außerdem werden die Speichermasse m_{sp} und die sich daraus ergebenden Kosten für das Speichermaterial als Bewertungskriterien verwendet.

Alternativ zum Gesamtwirkungsgrad besteht die Möglichkeit das thermische Speicherverhalten mithilfe des exergetischen Wirkungsgrades zu beurteilen. Beide Wirkungsgrade bewerten die

Fluidaustrittstemperatur des Speichers und den entstehenden Druckverlust. Deshalb ergeben sich für beide Wirkungsgrade ähnliche Abhängigkeiten von den Studienparametern. Da die Bewertung durch η_{ges} mithilfe des Kraftwerksmodells und der benötigten Ventilatorleistung in einer anschaulicheren und umfassenderen Form erfolgt (siehe Abschnitt 2.2.6), wird nachfolgend nur eine detailliertere Diskussion des Gesamtwirkungsgrades vorgenommen. Die Diskussion der Abhängigkeiten des exergetischen Wirkungsgrades befindet sich in Anhang E.

Die Speichermasse ist eine wesentliche Größe zur Bewertung der einzelnen Variationen. Sie ist ein Maß für die Größe des Speichers und entscheidend für die Kosten des Speichermaterials.

Eine weitere Bewertungsgröße repräsentiert der Nutzungsgrad η_{nutz} . Dieser beschreibt die Ausnutzung der Speicherkapazität (siehe Abschnitt 3.6). Auf eine detaillierte Beschreibung der Abhängigkeiten des Nutzungsgrades wird in diesem Abschnitt verzichtet, da ein direkter Zusammenhang zwischen Nutzungsgrad und Speichermasse vorliegt. Die Diskussion der Abhängigkeiten von η_{nutz} befinden sich Anhang F. Entscheidend für den Nutzungsgrad ist die Größe der vorhandenen Kapazität, die direkt von der Speichermasse abhängt. Für die definierten Randbedingungen ergibt sich tendenziell für eine große Speichermasse eine schlechtere Ausnutzung der Kapazität und damit ein niedrigerer Nutzungsgrad. Eine kleine Speichermasse führt dagegen zu einem hohen Nutzungsgrad. Dies ist vor allem auf den schlechteren Wärmeübergang bei größeren Speichermassen zurückzuführen. Das Speichermaterial kann schlechter Be- und Entladen werden. Der Zusammenhang zwischen Speichermasse und Wärmeübergang wird in Abschnitt 6.4.3 diskutiert.

Im Folgenden wird der Einfluss der vier Studienparameter ΔT_{mfa} , A_{sp} , d_p und r_{pcm} auf den Gesamtwirkungsgrades η_{ges} diskutiert. Im Anschluss wird der Einfluss des PCM-Gehalts auf die benötigte Speichermasse untersucht. Danach werden die kombinierten Einflüsse mehrerer Studienparameter auf den Gesamtwirkungsgrad und die Speichermasse beschrieben. Abschließend wird in diesem Abschnitt eine Abschätzung der Kosten für das gesamte Speichermaterial durchgeführt.

6.4.1 Gesamtwirkungsgrad

Der Gesamtwirkungsgrad η_{ges} beschreibt, wie viel elektrische Energie durch die Entladung des Speichers mithilfe eines solarthermischen Kraftwerks (siehe Abschnitt 2.2.6) erzeugt werden kann. Dabei werden der Druckverlust, die Austrittstemperatur und die Temperaturverluste durch die Grädigkeit des Wärmeübertragers zur Kopplung des Speichers mit dem Kraftwerksprozess berücksichtigt. Der Gesamtwirkungsgrad repräsentiert damit eine umfassende Bewertungsgröße zum Vergleich der verschiedenen Parametervariationen.

In Abbildung 6.2 ist der Gesamtwirkungsgrad im Bereich zwischen 65 % und 100 % dargestellt. Der Gesamtwirkungsgrad ist in je einem Graphen in Abhängigkeit von ΔT_{mfa} , A_{sp} und d_p gezeigt. Die Graphen sind eingeteilt in die verschiedenen Varianten dieser drei Parameter. Die Variationsnummern der einzelnen Diagramme entsprechen sich nicht und sollen lediglich die Einteilung der verschiedenen Bereiche verdeutlichen. Die Variationen des PCM-Anteils im Speicher r_{pcm} sind durch verschiedene Symbole gekennzeichnet. Im Anhang G sind die Gesamtwirkungsgrade aller Variationen in gleicher Form dargestellt.

Maximal kann mit allen Speichervarianten ein Gesamtwirkungsgrad von 96,17 % erreicht werden. Dieser Wert wird für einen reinen sensiblen Speicher ohne PCM mit einer Querschnittsfläche von 1000 m², einem Partikeldurchmesser von 0,03 m und einer zulässigen Austrittstemperaturänderung von 15 K erreicht. Der geringste berechnete Wert liegt bei -125,65 %. Dieser Wert ergibt sich für einen reinen sensiblen Speicher mit einer Querschnittsfläche von 200 m², einem Partikeldurchmesser von 0,01 m und einer zulässigen Austrittstemperaturänderung von 15 K. Negative Gesamtwirkungsgrade entstehen bei einem sehr hohen Energiebedarf des Ventilators zur Erzeugung des nötigen Luftmassenstroms. Ursache ist demnach ein sehr hoher Druckverlust. Nach Abbildung 6.2 besitzt ΔT_{mfa} einen großen Einfluss auf die maximal erreichbaren Werte für η_{ges} . Die größten Wirkungsgrade ergeben sich für geringe Werte von ΔT_{mfa} bei tendenziell geringerem PCM-Anteil von 0 % bis 10 %. Dies ist vor allem auf die geringe zulässige Temperaturänderung am Speicheraustritt zurückzuführen. Größere PCM-Anteile führen zu niedrigen Wirkungsgraden. Verbundspeicher erreichen für ΔT_{mfa} von 45 K bis 75 K höhere Gesamtwirkungsgrade als sensible Speicher. Demnach führt bei diesen Austrittstemperaturänderungen das Phasenwechselmaterial zu einer effektiven Stabilisierung der Austrittstemperatur bzw. zu einem reduzierten Druckverlust. Bei größeren Werten von ΔT_{mfa} und r_{pcm} nimmt die Spanne der erreichten Wirkungsgrade zu. Dies lässt für η_{ges} auf eine größere Abhängigkeit von A_{sp} bzw. d_p schließen. Der Einfluss von mehreren Parametern auf den Gesamtwirkungsgrad wird in Abschnitt 6.4.3 diskutiert.

Für den Partikeldurchmesser werden bei allen Variationen die höchsten Gesamtwirkungsgrade für 0 % bis 10 % PCM-Anteil erreicht. Für keine Partikeldurchmesser ergibt sich in dieser Darstellung ein Vorteil der Verbundspeicher gegenüber den sensiblen Speichern. Mit größeren Partikeldurchmessern werden überwiegend geringere Maximalwerte erreicht. Größere Partikel führen dazu, dass die Wärmeübertragung verschlechtert und der Druckverlust reduziert wird.

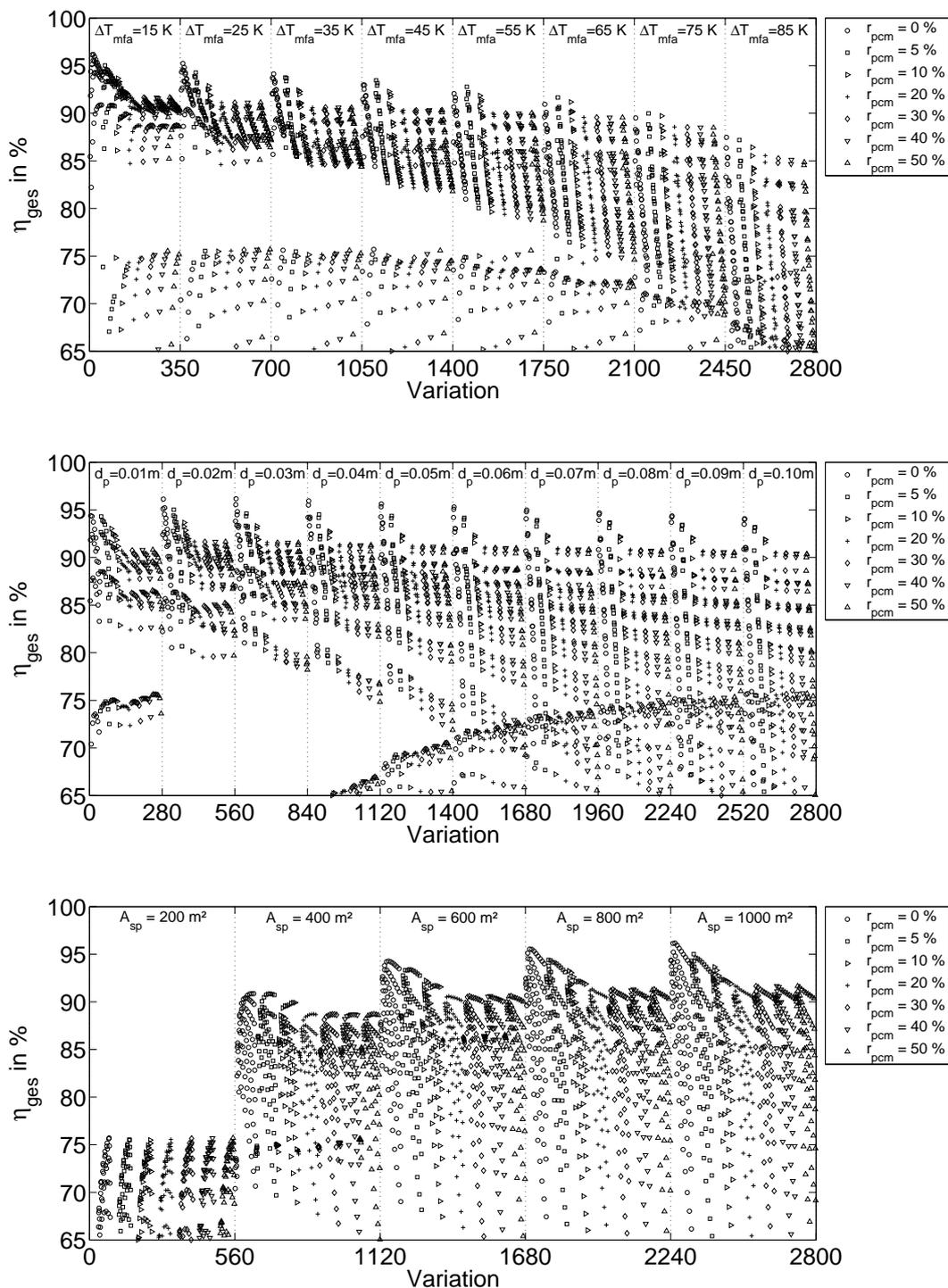


Abbildung 6.2: Gesamtwirkungsgrad zwischen 65 % und 100 % in Abhängigkeit von ΔT_{mfa} (oben), d_p (mittig) und A_{sp} (unten). Die Variationen des PCM-Anteils im Speicher r_{pcm} sind mit unterschiedlichen Symbolen gekennzeichnet.

Zum Beweis ist Anhang H der modifizierte volumetrische Wärmeübergangskoeffizient⁴ $\bar{\alpha}_v$ und in Anhang I der Druckverlust für verschiedene Partikeldurchmesser und Speicherquerschnitte gezeigt. Durch die geringere Wärmeübertragung kann weniger Energie ein- und gespeichert werden. Dies führt zu einem niedrigeren Gesamtwirkungsgrad. Der reduzierte Druckverlust führt zu einer Erhöhung von η_{ges} . Da der maximale Wirkungsgrad mit steigender Partikelgröße abnimmt, kann von einer dominierenden Rolle des Wärmeübergangs ausgegangen werden. Ab einem PCM-Anteil von 20 % ergibt sich keine signifikante Änderung der maximalen Wirkungsgrade mehr. Weiterhin ist bei größeren Partikeldurchmessern eine größere Spanne der erreichten Wirkungsgrade zu erkennen. Dies lässt, wie bei ΔT_{mfa} , auf eine größere Abhängigkeit des Gesamtwirkungsgrades von den übrigen beiden Parameter A_{sp} bzw. ΔT_{mfa} (siehe Abschnitt 6.4.3) schließen.

Bei den Variationen der Speicherquerschnittsfläche werden die größten Werte für eine Querschnittsfläche von 1000 m² erreicht. Für alle PCM-Anteile werden mit größeren Querschnittsflächen höhere Gesamtwirkungsgrade erreicht. Die höchsten Gesamtwirkungsgrade werden für alle A_{sp} bei r_{pcm} von 0 %, 5 % und 10 % erzielt. Ab einem r_{pcm} von 20 % entstehen keine signifikanten Änderungen der maximalen Wirkungsgrade. Die Verbundspeicher führen nach dieser Darstellung zu keiner Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades gegenüber rein sensiblen Speichern. Große Speicherquerschnitte führen durch die eingesetzte Optimierung zu kürzeren Speicherlängen und zu einer reduzierten Strömungsgeschwindigkeit. Dadurch ergeben sich geringere Druckverluste und damit höhere Gesamtwirkungsgrade. Der abnehmende Druckverlust mit steigender Querschnittsfläche ist in Anhang I erkennbar. Alle gezeigten Speichervarianten besitzen die gleichen Abhängigkeiten des Druckverlusts von A_{sp} und d_p . Vor allem bei einem Querschnitt von 200 m² entstehen große Druckverluste und demzufolge geringere Wirkungsgrade. Die Spanne der erreichten Gesamtwirkungsgrade steigt mit zunehmenden Querschnitten (vgl. Anhang G). Bei zunehmenden Querschnitten ist demnach eine verstärkte Abhängigkeit des Wirkungsgrades von ΔT_{mfa} bzw. d_p vorhanden.

Sowohl der Speicherquerschnitt als auch der Partikeldurchmesser besitzen großen Einfluss auf den Wärmeübergang sowie auf den Druckverlust. Deshalb müssen für hohe Gesamtwirkungsgrade diese beiden Parameter in Abhängigkeit voneinander gewählt werden. Für die Beschreibung des gleichzeitigen Einflusses mehrerer Parameter auf den Gesamtwirkungsgrad wird an dieser Stelle auf Abschnitt 6.4.3 verwiesen.

⁴ Der volumetrische Wärmeübergangskoeffizient beschreibt, wie viel Wärme pro Volumen im Speicher übertragen werden kann.

Die niedrigeren maximalen Gesamtwirkungsgrade für Verbundspeicher mit hohen PCM-Anteilen lassen sich anhand der Verläufe der Fluidaustrittstemperatur erklären. In Abbildung 6.3 ist exemplarisch die Austrittstemperatur für r_{pcm} von 0 %, 5 %, 10 % und 20 % über der Zeit t aufgetragen. Die Graphen für höhere PCM-Anteile sind nicht gezeigt, da sich diese von den Verläufen bei 20 % PCM-Anteil kaum unterscheiden.

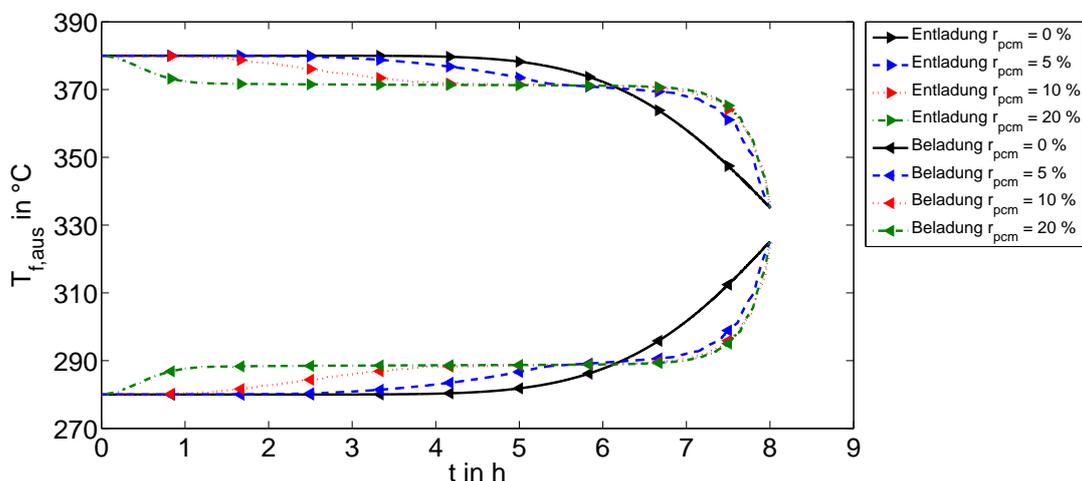


Abbildung 6.3: Fluidaustrittstemperaturen für den Be- und Entladevorgang von Speichern mit den Parametern $\Delta T_{\text{mfa}} = 45 \text{ K}$, $A_{\text{sp}} = 600 \text{ m}^2$ und $d_{\text{p}} = 0,02 \text{ m}$. Es sind die Temperaturverläufe für verschiedene PCM-Anteile im Speicher gezeigt.

Es ist jeweils der Be- und Entladevorgang gezeigt. Je höher r_{pcm} , desto früher beginnt die Austrittstemperatur im Entladevorgang sich auf das Temperaturniveau des Schmelzbereichs von KOH370 zu senken. Im Beladevorgang nähern sich die Austrittstemperaturen dem Schmelzbereich von KOH290 an. In den letzten 60 Minuten der Be- und Entladephasen entstehen große Temperaturgradienten. Die Austrittstemperaturen der Verbundspeicher nähern sich sehr schnell dem zulässigen Endwert an. Die Verläufe des rein sensiblen Speichers bleiben für den längsten Zeitraum auf dem Anfangstemperaturniveau. Erst nach ca. 5 h beginnt die Temperatur sich zu verändern. Ab diesem Zeitpunkt nähert sich die Temperatur mit einem geringen Gradienten ohne Verharren auf einem weiteren Temperaturniveau dem Endwert an.

Die vorzeitige Veränderung der Austrittstemperatur bei den Verbundspeichern gegenüber rein sensiblen Speichern ist auf den Phasenwechsel zurückzuführen. Der Phasenwechsel führt sowohl bei der Be- bzw. Entladung zu einer Austrittstemperatur auf dem Niveau der Schmelztemperatur von KOH370 bzw. KOH290. Bei einem PCM-Anteil von 5 % ist für die gezeigte Speichervariante eine leichte Stabilisierung der Austrittstemperatur im Vergleich zu dem sensiblen Speicher erkennbar. Durch diese Stabilisierung ergibt sich für diesen Verbundspeicher ein höherer Gesamtwirkungsgrad von 91,70 % im Vergleich zu 91,17 % für den rein sensiblen Speicher. Außerdem

trägt auch ein leicht reduzierter Druckverlust für diesen Verbundspeicher zu der Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades bei. Höhere PCM-Anteile führen für einen größeren Zeitraum zu niedrigeren Austrittstemperaturen. Dadurch verschlechtert sich der Gesamtwirkungsgrad. Bei PCM-Anteilen von mehr als 10 % wird zusätzlich der Phasenwechsel nicht vollständig durchlaufen. Bei der Beladung kann bei zu großen PCM-Anteilen im Speicher durch den Luftmassenstrom nicht genügend Wärme eingebracht werden, um das PCM vollständig aufzuschmelzen. Als Beispiel dafür sind in Abbildung 6.4 die Feststofftemperaturen innerhalb zweier Speicher im letzten Beladezeitschritt gezeigt. Es sind Speicher mit einem PCM-Anteil von 10 % und 40 % dargestellt. Die Temperaturen sind über der auf die Speicherlänge normierten Position im Speicher x^* aufgetragen.

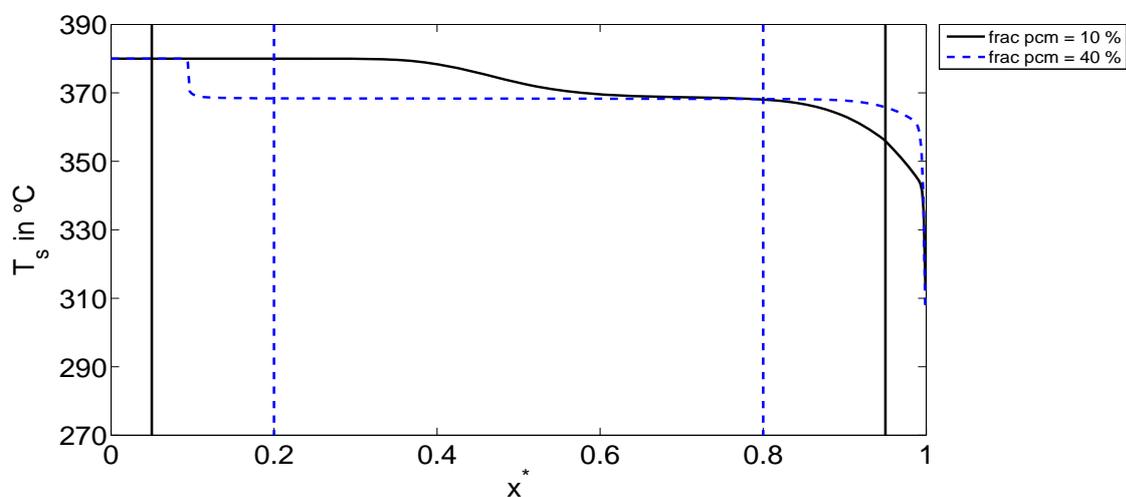


Abbildung 6.4: Feststofftemperaturen im letzten Zeitschritt der Beladung von Speichern mit den Parametern $\Delta T_{mfa} = 45$ K, $A_{sp} = 200$ m² und $d_p = 0,01$ m. Es sind die Temperaturverläufe für verschiedene PCM-Anteile im Speicher gezeigt. Die vertikalen Linien entsprechen jeweils den Grenzen der PCM-Abschnitte in den beiden Verbundspeichern.

Für einen PCM Anteil von 10 % lässt sich erkennen, dass das Phasenwechselmaterial am Einlass und Auslass des Speichers die Schmelztemperaturen von 370 °C und 290 °C überschritten hat. Der Phasenwechsel ist vollständig durchgeführt. Ein PCM-Anteil von 40 % führt dazu, dass das PCM am Eintritt des Speichers nicht vollständig aufgeschmolzen wird. Der Phasenwechsel wird bis zu einem x^* von ca. 0,1 vollständig durchlaufen. Bei PCM-Anteilen von 20 %, 30 % und 50 % wird der Phasenwechsel ebenfalls nur bis zu x^* von 0,1 vollständig durchlaufen. Der Luftmassenstrom kann demzufolge nur genügend Wärme für eine bestimmte PCM-Menge einbringen. Die Grenze des vollständigen Phasenwechsels ist stark von der Wärmeübertragung abhängig und damit von dem Partikeldurchmesser und Querschnitt. Je nach Speichervariante verändert sich diese Grenze. Der unvollständige Phasenwechsel führt zu einer nahezu gleichbleibenden Temperatur des aus dem ersten PCM-Bereich austretenden Fluids. Die Temperaturfront

kann den Speicher deswegen nicht mit maximaler Temperatur durchlaufen. Dies führt zu einer niedrigeren Austrittstemperatur.

Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Austrittstemperatur bei der Entladung von Verbundspeichern ist die Verwendung von Phasenwechselmaterialien mit höherer Schmelztemperatur. Aufgrund einer geringeren Temperaturdifferenz zwischen Luft und Feststoff während des Phasenwechsels, würde allerdings die durch den Luftstrom eingebrachte Wärmemenge sinken. Dies führt zu einem langsameren Phasenwechsel und damit möglicherweise auch zu einem unvollständigen Phasenwechsel. Dies gilt auch für eine niedrigere Austrittstemperatur bei der Beladung bei Einsatz von PCM mit niedrigerer Schmelztemperatur. Für die optimale Wahl des Phasenwechselmaterials muss demnach der PCM-Anteil im Speicher und die Schmelztemperatur optimiert werden. Die Variation der Schmelztemperatur ist allerdings nicht Teil dieser Arbeit.

Zusammenfassend sollten für hohe Gesamtwirkungsgrade geringere Austrittstemperaturänderungen, geringe Partikeldurchmesser und große Speicherquerschnitte verwendet werden. Das Verbundspeicherkonzept zeigt für zulässige Austrittstemperaturen von 45 K, 55 K, 65 K und 75 K verbesserte Gesamtwirkungsgrade gegenüber rein sensiblen Speichern. Für die Varianten von A_{sp} und d_p sind keine Verbesserungen durch Verbundspeicher feststellbar. Zum Erreichen hoher Gesamtwirkungsgrade sollte für Verbundspeicher maximal ein PCM-Anteil von 10 % verwendet werden.

6.4.2 Speichermasse

Bei alleiniger Betrachtung des Gesamtwirkungsgrades ergeben sich für das Verbundspeicherkonzept nur für bestimmte Varianten der zulässigen Austrittstemperaturänderungen Vorteile gegenüber rein sensiblen Speichern. Zusätzlich ist durch das Phasenwechselmaterial im Speicher eine Reduktion der benötigten Speichermasse möglich. Die Speichermasse ist für alle Variationen in Abhängigkeit des PCM-Gehalts in Abbildung 6.5 gezeigt. Die angegebenen Variationsnummern verdeutlichen die Einteilung in die verschiedenen Bereiche des PCM-Anteils.

Die Abbildung zeigt eine abnehmende Tendenz der benötigten Speichermasse für höhere PCM-Gehalte. Geringere Speichermassen führen zu kompakteren Bauformen und zu geringeren Kosten für das Speichermaterial. Dies ist ein großer Vorteil des Verbundspeicherkonzepts gegenüber rein sensiblen Speichern.

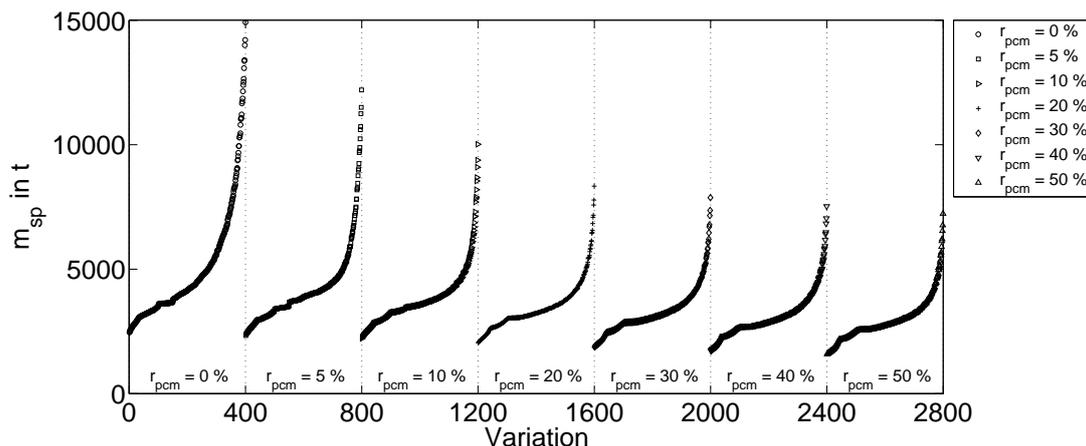


Abbildung 6.5: Speicher- m_{sp} für die verschiedenen Varianten des PCM-Gehalts r_{pcm} . Die verschiedenen Varianten von r_{pcm} sind mit unterschiedlichen Symbolen gekennzeichnet.

Die Massenreduktion bietet allerdings nur Vorteile, wenn diese Speicher gleichzeitig hohe Gesamtwirkungsgrade erzielen. Dazu ist in Abbildung 6.6 die Speicher- m_{sp} über η_{ges} für die verschiedenen PCM-Anteile im Speicher aufgetragen. Die Darstellung enthält nur die Speichervarianten mit gleichzeitig hohem Gesamtwirkungsgrad und geringer Speicher- m_{sp} . Die Unstetigkeiten sind auf die Schrittweite der gewählten Parametervariationen zurückzuführen.

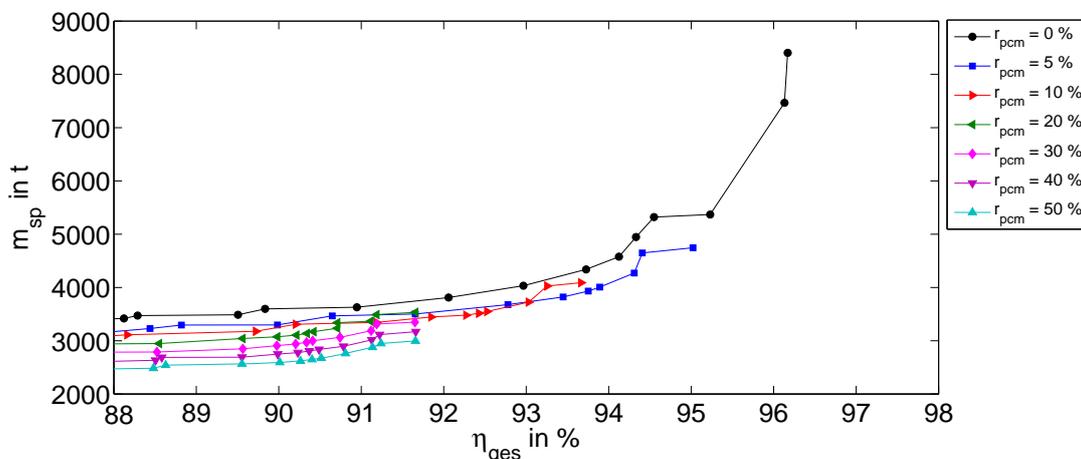


Abbildung 6.6: Speicher- m_{sp} aufgetragen über dem Gesamtwirkungsgrad η_{ges} . Es sind für die verschiedenen PCM-Anteile r_{pcm} im Speicher nur die Speichervarianten mit hohen Gesamtwirkungsgraden bei gleichzeitig geringen Speicher- m_{sp} gezeigt.

Nach dieser Abbildung wird für höhere Gesamtwirkungsgrade eine größere Speicher- m_{sp} benötigt. Der maximale Gesamtwirkungsgrad von 96,17 % wird von einem rein sensiblen Speicher erreicht. Die benötigte Speicher- m_{sp} ist mit 8405 t im Vergleich zu den übrigen gezeigten Varianten deutlich größer. Die Verbundspeicher erreichen keinen gleichwertigen Wirkungsgrad. Für

das Erreichen von leicht reduzierten Wirkungsgraden von ca. 95 % wird mit einem rein sensiblen Speicher bereits eine um ca. 36 % geringere Speichermasse benötigt. Ausgehend von diesem Speicher kann durch einen Verbundspeicher mit 5 % PCM-Anteil bei gleichem Wirkungsgrad eine zusätzliche Massenreduktion von ca. 11 % erreicht werden. Für höhere PCM-Gehalte wird je nach Variante eine kleinere bzw. größere Einsparung gegenüber sensiblen Speichern mit gleichen Gesamtwirkungsgraden erzielt. Gleichzeitig reduzieren sich allerdings die Gesamtwirkungsgrade.

Zusammenfassend kann für die Speichermasse festgehalten werden, dass Verbundspeicher zu geringeren Speichermassen führen. Für eine Speicherauswahl muss der Gesamtwirkungsgrad gegen die Kosten für das Speichermaterial abgewogen werden. Die Kosten für das Speichermaterial werden in Abschnitt 6.4.4 abgeschätzt.

6.4.3 Kombinierte Parameterabhängigkeiten

Im Abschnitt 6.4.1 wird die Abhängigkeit des Gesamtwirkungsgrades von dem PCM-Anteil im Speicher und ΔT_{mfa} , A_{sp} oder d_p gezeigt. In diesem Abschnitt wird der gemeinsame Einfluss von mehreren Parametern untersucht. Dazu werden der Gesamtwirkungsgrad und die benötigte Speichermasse betrachtet. Aufgrund der Vielzahl der Speichervariationen werden nur exemplarische Speichervarianten betrachtet. Diese Varianten werden anhand der vorangegangenen Diskussion des Gesamtwirkungsgrades ausgewählt. Die höchsten Gesamtwirkungsgrade werden für eine zulässige Austrittstemperaturänderung ΔT_{mfa} von 15 K bei geringen PCM-Anteilen erreicht. Für den Verbundspeicher ergeben sich bei ΔT_{mfa} von 55 K die größte Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades gegenüber rein sensiblen Speichern. Da der Partikeldurchmesser und die Querschnittsfläche in Abhängigkeit voneinander zu wählen sind (vgl. Abschnitt 6.4.1), werden im Folgenden exemplarisch die Speichervarianten bei festen Werten für ΔT_{mfa} von 15 K und 55 K und r_{pcm} von 0 %, 5 % und 10 % untersucht. Für diese sechs Speichervarianten wird jeweils der Einfluss des Partikeldurchmessers und der Querschnittsfläche auf η_{ges} und m_{sp} analysiert. In Abbildung 6.7 ist für jede der sechs Speichervarianten ein Diagramm gezeigt. Die Gesamtwirkungsgrade und die Speichermasse sind als Kontur über dem Speicherquerschnitt und dem Partikeldurchmesser aufgetragen.

Für alle gezeigten Varianten ist der Gesamtwirkungsgrad stark von der Speicherquerschnittsfläche und der Partikelgröße abhängig. Tendenziell werden für alle gezeigten Speichervarianten die geringsten Gesamtwirkungsgrade für einen Partikeldurchmesser von 0,01 m und einen Speicherquerschnitt von 200 m² erreicht.

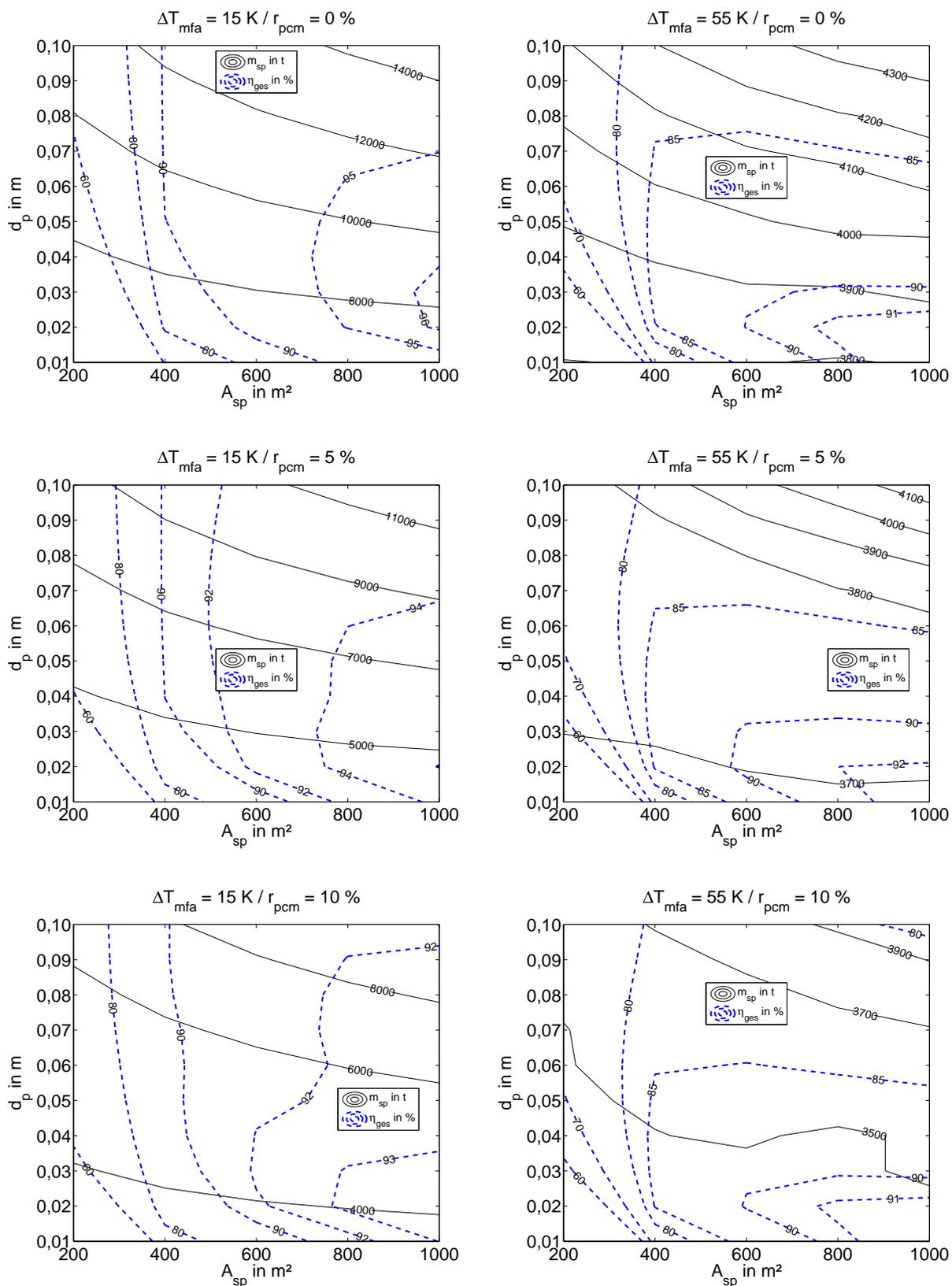


Abbildung 6.7: Gesamtwirkungsgrad η_{ges} und Speichermasse m_{sp} in Abhängigkeit von dem Partikeldurchmesser d_p und dem Speicherquerschnitt A_{sp} . Die Graphen sind für verschiedene Varianten von ΔT_{mfa} und r_{pcm} gezeigt.

Die maximalen Werte für η_{ges} werden für einen Querschnitt von 1000 m² und je nach ΔT_{mfa} und r_{pcm} bei Partikeldurchmessern von 0,01 m bis 0,03 m erreicht. Bei ΔT_{mfa} von 55 K werden für einen Speicher mit 5 % höhere Gesamtwirkungsgrade als für die sensiblen Speicher erreicht. Kleine Partikeldurchmesser führen bei Variation der Speicherquerschnittsfläche zu starken Gradienten von η_{ges} . Mit größerem Partikeldurchmesser reduziert sich diese Abhängigkeit.

Für hohe Gesamtwirkungsgrade werden eine geringe Ventilatorleistung sowie eine gute Wärmeübertragung benötigt. Bei kleinen Querschnitten sind diese Bedingungen für große Partikeldurchmesser erfüllt. Bei größeren Querschnitten führen kleinere Partikeldurchmesser zu höheren Gesamtwirkungsgraden. Kleine Querschnitte erreichen allerdings aufgrund des dominanten Druckverlusts geringere Gesamtwirkungsgrade. Die Kombinationen aus großem Speicherquerschnitt und kleinen Partikeldurchmessern führt demnach zu Speicherkonfigurationen mit niedrigem Energieaufwand für den Ventilator sowie einer guten Wärmeübertragung.

Für steigende PCM-Anteile verringert sich für ΔT_{mfa} von 15 K gleichzeitig der Maximalwert und der Wertebereich von η_{ges} . Der Gesamtwirkungsgrad wird demnach für zunehmende PCM-Gehalte unabhängiger von A_{sp} und d_{p} . Erklärt werden kann dieses Verhalten mit dem entstehenden Druckverlust. Bei höheren PCM-Anteilen verringert sich bei diesem Wert von ΔT_{mfa} der Druckverlust (vgl. Anhang I) bei sonst gleichen Parametern durch eine geringe Speichergröße. Besonders der große Einfluss des Druckverlustes auf η_{ges} bei kleinen Partikeln und kleinen Querschnitten sinkt dadurch. Bei ΔT_{mfa} von 55 K ist dieses Verhalten nicht feststellbar. Der Druckverlust verändert sich für diesen Wert von ΔT_{mfa} nicht mit Variation des PCM-Gehalts (vgl. Anhang I). Der Druckverlust spielt demnach bei höheren Werten von ΔT_{mfa} eine untergeordnete Rolle. Für ΔT_{mfa} von 55 K werden, wie bereits in Abschnitt 6.4.1 gezeigt, aufgrund der größeren Temperaturänderung geringere Gesamtwirkungsgrade erreicht. Allerdings ergeben sich dafür höhere Wirkungsgrade für den Verbundspeicher mit 5 % im Vergleich zu den rein sensiblen Speichern.

In allen Diagrammen der Abbildung 6.7 zeigt sich eine starke Abhängigkeit der Speichermasse von d_{p} . Der Einfluss der Querschnittsfläche ist im Vergleich dazu geringer. Bei größeren Partikeldurchmessern ergeben sich für alle Variationen größere Speichermassen. Dies ist auf den reduzierten Wärmeübergang bei größeren Partikeln zurückzuführen. Im Anhang J ist ergänzend dazu die Speichermasse zusammen mit dem volumetrischen Wärmeübergangskoeffizienten im Speicher über dem Partikeldurchmesser und der Querschnittsfläche gezeigt. Die Verläufe der Isolinien stimmen für Speichermasse und Wärmeübergangskoeffizient überein. Der direkte Zusammenhang der beiden Größen ist damit bewiesen. Bei größeren Partikeln ist aufgrund der

schlechteren Wärmeübertragung eine größere Speichermasse nötig, um einen Speicher mit der geforderten Beladezeit (siehe Abschnitt 6.1) zu erhalten.

Die Diagramme der verschiedenen PCM-Anteile bei gleichen ΔT_{mfa} zeigen die bereits diskutierte Reduktion der benötigten Speichermasse bei größeren PCM-Anteilen. Für einen höheren Wert für ΔT_{mfa} von 55 K ergeben sich ebenfalls geringere Speichermassen, da eine geringere Speicherkapazität benötigt wird, um die Austrittstemperatur ausreichend lange innerhalb der zulässigen Temperaturgrenzen zu halten.

Um die Verbundspeichereigenschaften direkt mit den rein sensiblen Speichern vergleichen zu können, sind in Abbildung 6.8 η_{ges} und m_{sp} in Abhängigkeit von zulässigen Austrittstemperaturänderung und dem PCM-Gehalt gezeigt. Die Austrittstemperaturänderung wird gewählt, da sich für die Variationen von ΔT_{mfa} die größten Unterschiede zwischen Verbundspeichern und sensiblen Speichern ergeben. Aufgrund der höchsten erreichten Gesamtwirkungsgrade sind die Variationen für d_p von 0,02 m und 0,03 m sowie für A_{sp} von 1000 m², 800 m² und 600 m² dargestellt.

Die Diagramme verdeutlichen, dass die Verbundspeicher vor allem bei größeren Werten von ΔT_{mfa} höhere Gesamtwirkungsgrade als rein sensible Speicher erreichen. Das gilt allerdings nur bis zu einem PCM-Anteil von 10 %. Bei PCM-Anteilen von mehr als 10 % werden tendenziell niedrige Wirkungsgrade erreicht. Der größte Vorteil des Verbundspeicherkonzepts gegenüber rein sensiblen Speichern ergibt sich für zulässige Austrittstemperaturänderungen zwischen 45 K und 75 K. Bei einer zulässigen Austrittstemperatur von 85 K ergibt sich eine leichte Reduktion für η_{ges} mit steigendem r_{pcm} . Für den größeren Partikeldurchmesser von 0,03 m vergrößert sich für alle gezeigten Speicherquerschnitte der Wertebereich des erreichten Gesamtwirkungsgrades. Dadurch reduzieren sich in dem Vorteilsbereich der Verbundspeicher für ΔT_{mfa} zwischen 45 K und 75 K die erreichten Gesamtwirkungsgrade. Die Querschnittsvariationen führen bei gleichem Partikeldurchmesser zu keiner Veränderung der Gesamtwirkungsgrade.

Die Speichermasse reduziert sich bei höheren zulässigen Austrittstemperaturänderungen und höheren PCM-Anteilen. Der Wertebereich der Speichermassen erhöht sich mit steigendem Partikeldurchmesser. Vor allem im Bereich von kleinen Werten für ΔT_{mfa} und geringen PCM-Anteilen werden größere Speichermassen benötigt. Die Querschnittsvariationen zeigen, wie auch für den Gesamtwirkungsgrad, keinen deutlichen Einfluss.

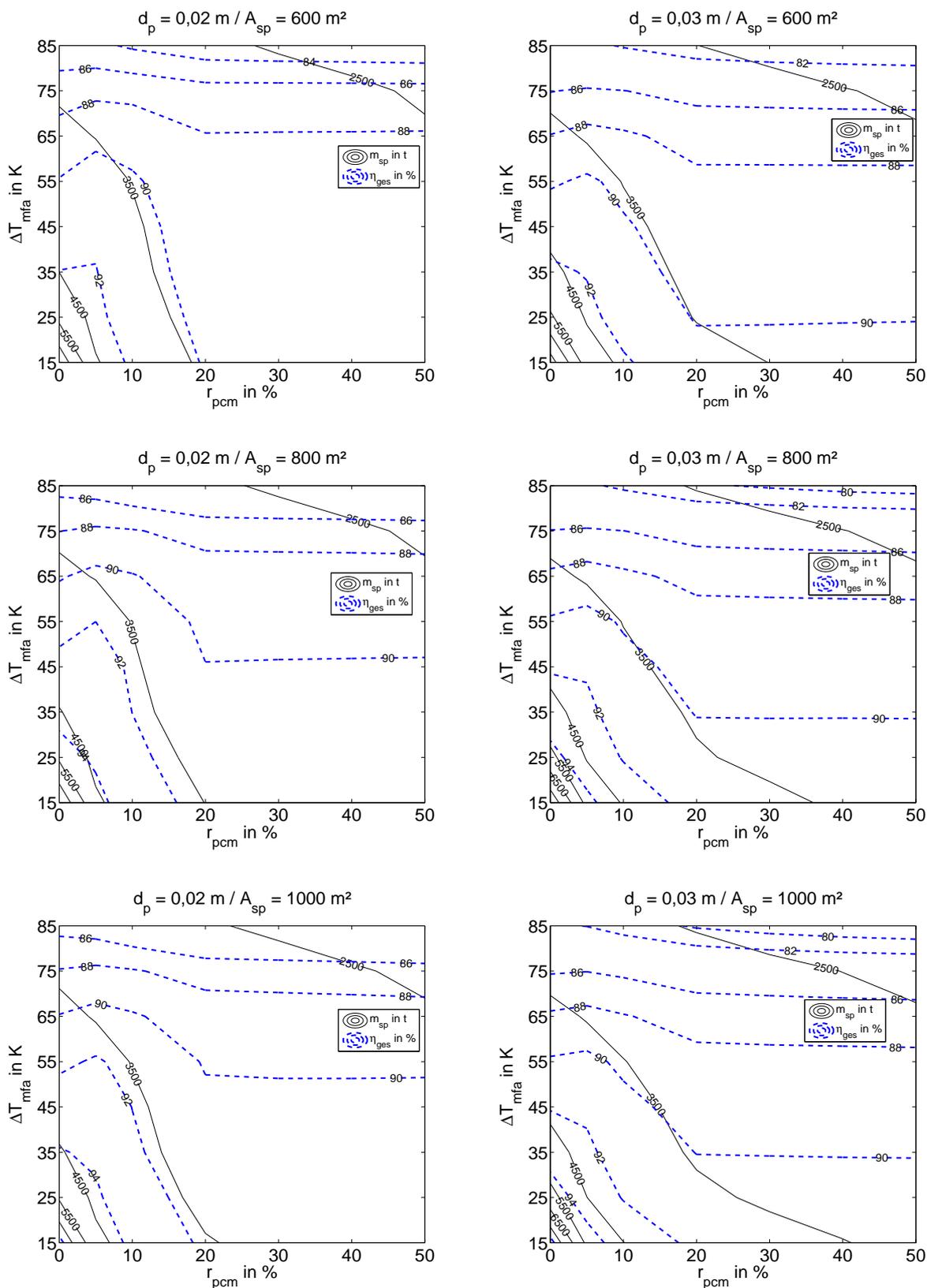


Abbildung 6.8: Gesamtwirkungsgrad η_{ges} und Speichermasse m_{sp} in Abhängigkeit von der zulässigen Austrittstemperaturänderung ΔT_{mfa} und dem PCM-Gehalt r_{PCM} . Die Graphen sind für verschiedene Varianten von d_p und A_{sp} gezeigt.

6.4.4 Kostenabschätzung

Durch die Parameterstudie wird in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt, dass für Verbundspeicher geringere Speichermassen benötigt werden. Diese Reduktion der Speichermasse kann zu reduzierten Kosten für den Speicher führen. Mithilfe einer Kostenabschätzung für das Speichermaterial soll das Verbundspeicherkonzept abschließend bewertet werden.

Das PCM-Material und die Verkapselung besitzen einen großen Einfluss auf die Kosten für das gesamte Speichermaterial. Im Folgenden werden mithilfe eines einfachen Modells die Kosten für das gesamte Speichermaterial in Abhängigkeit des PCM-Gehalts im Speicher bestimmt. Die Kosten der sonstigen Speicherkomponenten, wie Speicherbehälter, Wärmeübertrager und Fundamentkosten, sind nicht Teil der Kostenabschätzung. Durch das Phasenwechselmaterial wäre allerdings aufgrund der geringen Speichermasse von geringeren Behälter- und Fundamentkosten auszugehen. Für die Gesamtkosten des Speichermaterials K_{ges} werden die Kosten für das sensible Speichermaterial K_{sens} , das Phasenwechselmaterial K_{pcm} und die Verkapselungskosten K_{verk} berücksichtigt. Für K_{ges} gilt:

$$K_{ges} = K_{sens} + K_{pcm} + K_{verk} \quad (6.1)$$

Die einzelnen Komponenten ergeben sich aus den spezifischen Kosten für das sensible Speichermaterial km_{sens} , das Phasenwechselmaterial km_{pcm} und für die Verkapselung km_{verk} . Das Modell zur Berechnung der Kosten für die Verkapselung des Phasenwechselmaterials ist der Veröffentlichung von Nithyanandam et al. [31] entnommen. Es basiert auf einer kugelförmigen Verkapselung der Firma Terrafore Inc [32]. Ausgehend von den Verkapselungskosten für einen Partikeldurchmesser von 0,01 m werden die Kosten pro Tonne verkapseltes PCM km_{verk} in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers berechnet. Es gilt:

$$km_{verk} = km_{verk,d0} \left(\frac{d_p}{0,01 \text{ m}} \right)^{0,3} \quad (6.2)$$

mit $km_{verk,d0}$ = Kosten pro Tonne verkapseltes PCM in 0,01 m großen Partikeln

Das Modell berücksichtigt steigende Kosten für die Verkapselung bei größeren Partikeldurchmessern. Die höheren Kosten entstehen bei größeren Partikeln zum einem durch einen erhöhten Energieaufwand bei der Herstellung und zum anderen werden größere Wandstärken für die Verkapselung benötigt [31].

Für die Kostenabschätzung wird die Reduzierung des Phasenwechselmaterials durch die Dicke der Verkapselung nicht berücksichtigt. Um zu überprüfen, wie sich die Gesamtkosten in Abhängigkeit der Kosten für das Phasenwechselmaterial und der Verkapselungskosten verhalten, wird

eine Sensitivitätsanalyse der Gesamtkosten durchgeführt. Es werden verschiedene spezifische Kosten für das Phasenwechselmaterial und die Verkapselung angenommen. Die betrachteten Varianten sind in Tabelle 6.6 gezeigt. Die Variation der Kosten ist vor allem aufgrund der großen Preisunterschiede zwischen verschiedenen Phasenwechselmaterialien sinnvoll [33]. Für die Kosten des PCMs werden typische Werte verwendet. Die Verkapselungskosten für einen Partikeldurchmesser von 0,01 m $km_{verk,d0}$ werden ausgehend von den in [31] angegebenen Kosten von 750 €/t reduziert.

Tabelle 6.6: Spezifische Materialkosten für sensibles Speichermaterial, Phasenwechselmaterial und Verkapselung

Spezifische Kosten	Symbol	Werte			Einheit
Sensibles Speichermaterial [4]	km_{sens}	50			€/t
Phasenwechselmaterial	km_{pcm}	750	500	250	€/t
Verkapselung	$km_{verk,d0}$	750	500	250	€/t

Die Kostenabschätzung wird für die verschiedenen PCM-Anteile durchgeführt. Für die Wahl eines Speichers müssen die Kosten für das Speichermaterial und die Gesamtwirkungsgrade gegeneinander abgewogen werden. Dazu sind in Abbildung 6.9 die Kosten für das Speichermaterial über dem Gesamtwirkungsgrad dargestellt. Es sind die Kosten für Speicher mit 0 %, 5 % und 10 % PCM-Anteil gezeigt. Höhere PCM-Anteile führen zu deutlich geringeren Gesamtwirkungsgraden und sind deshalb nicht für diese Betrachtung relevant. Die Verkapselungskosten $km_{verk,d0}$ werden für einen festen Wert von 500 €/t betrachtet. Niedrige bzw. höhere Kosten führen zu enger liegenden bzw. weiter entfernten Kurvenverläufen (vgl. Anhang K). In dem Diagramm sind für jeden PCM-Gehalt und Kostenannahme nur die Speichervarianten mit den größten Gesamtwirkungsgraden bei gleichzeitig geringeren Kosten für das Speichermaterial aller Speichervariationen gezeigt. Diese Werte sind jeweils mit einer Hüllkurve dargestellt. Mithilfe des Diagramms kann eine einfache Speicherauswahl getroffen werden.

Wie erwartet, verschieben sich bei geringeren PCM-Kosten die Kurvenverläufe für die gezeigten Verbundspeichervarianten zu niedrigeren Kosten. Werden Speicher mit gleichen Gesamtwirkungsgraden verglichen, ergibt sich für keinen gezeigten Verbundspeicher, für keine getroffene Kostenannahme eine Kostenreduktion gegenüber rein sensiblen Speichern. Dies gilt auch für niedrigere Verkapselungskosten (vgl. Anhang K).

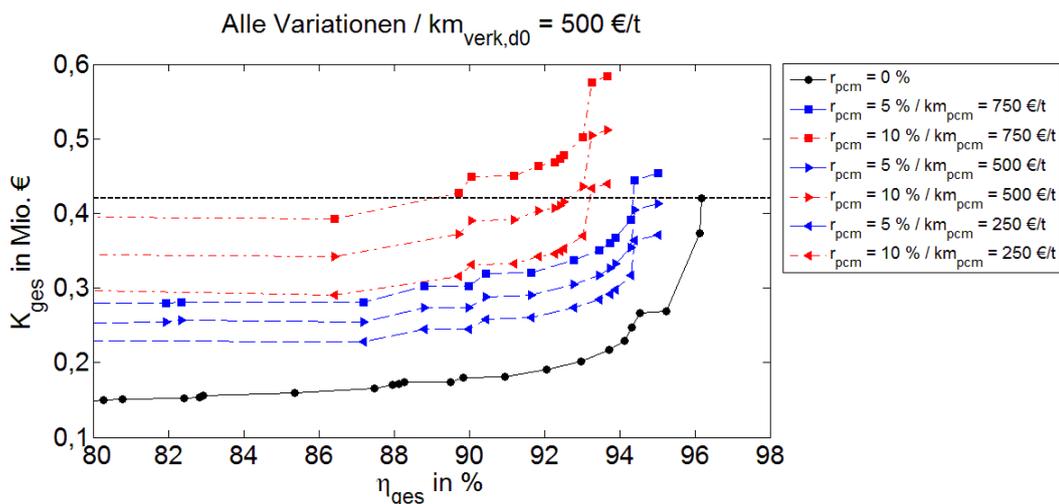


Abbildung 6.9: Gesamtkosten für das Speichermaterial K_{ges} für $km_{verk,d0}$ von 500 €/t aufgetragen über dem Gesamtwirkungsgrad η_{ges} . Die verschiedenen PCM-Gehalte sind durch unterschiedliche Linien gekennzeichnet. Die drei Varianten für km_{pcm} von 750 €/t, 500 €/t und 250 €/t werden durch verschiedene Symbolen markiert. Die unterbrochenen Linien repräsentieren die Kosten des rein sensiblen Speichers mit dem maximalen Gesamtwirkungsgrad aller Variationen

Die Verläufe der verschiedenen Kostenannahmen lassen weiterhin darauf schließen, dass für vergleichbare Kosten für Verbundspeicher und rein sensible Speicher die PCM-Kosten und Verkapselungskosten deutlich geringer sein müssen. Für alle Annahmen besitzen die Kosten über dem Gesamtwirkungsgrad für 0 %, 5 % und 10 % PCM-Anteil im Speicher ähnliche Verläufe. Für einen steigenden PCM-Anteil sind die Verläufe zu höheren Kosten und niedrigen Gesamtwirkungsgraden verschoben. Die Verläufe der Verbundspeicher werden die Kostenlinie der sensiblen Speicher nur für deutlich niedrige PCM- und Verkapselungskosten unterschreiten können. Für einen Speicher mit 5 % PCM-Anteil sind beispielsweise $km_{verk,d0}$ und km_{pcm} von 100 €/t nötig, um ähnliche Kosten zu sensiblen Speichern zu ermöglichen. Die zugehörigen Kurvenverläufe sind im Anhang K gezeigt.

Mithilfe von Abbildung 6.10 wird untersucht, ob eine Begrenzung der betrachteten Bereiche der zulässigen Austrittstemperatur, der Partikelgröße oder Querschnittsfläche Einfluss auf die Kosten des Speichermaterials besitzt. Diese Begrenzung der Bereiche entsteht zum Beispiel, wenn aus gegebenen Umständen nur Speicher bis zu einem gewissen Querschnitt realisiert werden können. Die Abbildung enthält drei Diagramme. Im obersten Diagramm sind die Hüllkurven für zulässige Austrittstemperaturänderungen größer gleich 45 K erstellt. Die Verbundspeicher bieten nach dieser Darstellung keinen Kostenvorteil gegenüber den rein sensiblen Speichern. Allerdings ist der erreichte Gesamtwirkungsgrad für den effizientesten Verbundspeicher bei 5 % PCM-Gehalt um 2,52 % absolut höher als für rein sensible Speicher. Für 10 % PCM ergeben sich wiederum niedrigere Gesamtwirkungsgrade.

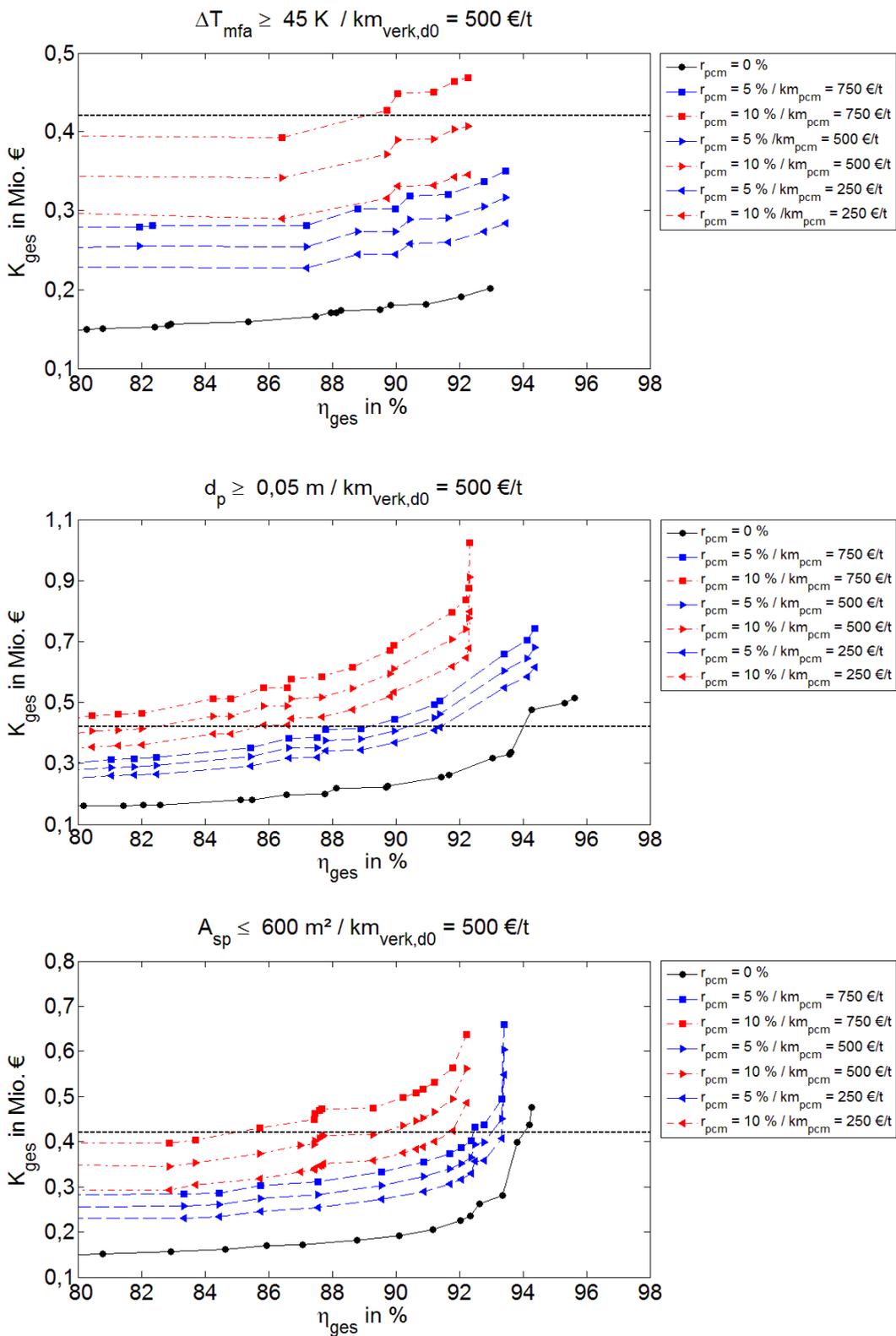


Abbildung 6.10: Gesamtkosten für das Speichermaterial K_{ges} für $\text{km}_{verk,d0}$ von 500 €/t aufgetragen über dem Gesamtwirkungsgrad η_{ges} für verschiedene Parametereinschränkungen. Die unterbrochenen Linien repräsentieren die Kosten des rein sensiblen Speichers mit dem maximalen Gesamtwirkungsgrad aller Variationen. Oben: Zulässige Austrittstemperaturänderung $\Delta T_{mfa} \geq 45 \text{ K}$; Mittig: Partikeldurchmesser $d_p \geq 0,05 \text{ m}$; Unten: Speicherquerschnittsfläche $A_{sp} \leq 600 \text{ m}^2$

Das mittlere Diagramm zeigt die Hüllkurven für den Fall, dass nur Partikel mit einem Durchmesser größer gleich 0,05 m eingesetzt werden können. Vor allem bei hohen Gesamtwirkungsgraden ergeben sich für alle Kostenannahmen höhere Materialkosten für die Verbundspeicher und die rein sensiblen Speicher. Die Verbundspeicher sind in allen gezeigten Varianten teurer als der effizienteste rein sensible Speicher.

Im unteren Diagramm sind die Hüllkurven für den Fall erstellt, dass nur Speicher mit einer Querschnittsfläche kleiner gleich 600 m² realisiert werden können. Für diese Verläufe besitzen die Verbundspeicher geringere Gesamtwirkungsgrade als rein sensible Speicher. Die maximalen Gesamtwirkungsgrade sinken für alle dargestellten Speicher im Vergleich zu Abbildung 6.9. Für keine Kostenannahme sind die Verbundspeicher günstiger als die gezeigten rein sensiblen Speicher.

Die Kostenabschätzung zeigt, dass das Verbundspeicherkonzept für keinen PCM-Anteil mit den Kosten für die rein sensiblen Speicher konkurrieren kann. Bei maximal zulässigen Austrittstemperaturen von mehr als 45 K können allerdings geringfügig höhere Gesamtwirkungsgrade erreicht werden. Das Verbundspeicherkonzept ist nach dieser Analyse im Vergleich zu sensiblen Speichern mit gleichen Gesamtwirkungsgraden nicht kosteneffektiv.

7 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden mithilfe eines numerischen Modells die Kombination aus einem sensiblen Regeneratorspeicher und einem Phasenwechselfpeicher untersucht. Beide Technologien sind in einem sogenannten Verbundspeicher integriert. Das Phasenwechselmaterial sollte zur Stabilisierung der Austrittstemperatur des sensiblen Regeneratorspeichers eingesetzt werden, um den exergetischen Wirkungsgrad zu erhöhen.

Ein bereits bestehendes Berechnungsmodell wurde für das Verbundspeicherkonzept erweitert. Das adaptierte Berechnungsmodell betrachtet Verbundspeicher, die jeweils aus einem PCM-Abschnitt am Anfang und am Ende des Speichers sowie aus einem dazwischen liegenden Abschnitt mit sensiblem Speicher material bestehen. Das gesamte Speicher material ist in Form einer Partikelschüttung ausgeführt. Sowohl für das sensible Speicher material als auch für das Phasenwechselmaterial werden kugelförmige Partikel mit gleichen Durchmessern angenommen. Das PCM wird in verkapselter Form eingesetzt. Die Verkapselung findet in der Berechnung allerdings keine Berücksichtigung.

Mit dem adaptierten Modell kann das transiente thermische Verhalten von Verbundspeichern untersucht werden. Grundlage dafür ist ein 2-Phasenmodell zur energetischen Bilanzierung der Feststoff- und Fluidphase im Speicher. Das Phasenwechselmaterial wird mithilfe der Kapazitätsmethode modelliert. Für die benötigten Kapazitäts-Temperaturfunktionen wurden verschiedene Varianten untersucht. Im Hinblick auf die Genauigkeit der energetischen Bilanzierung sowie des Berechnungsaufwandes erweisen sich der Verlauf einer Sinus-Funktion und der einer Gauß-Verteilung als besonders geeignet.

Das Berechnungsmodell wurde anhand von Literaturdaten zu einem reinen Phasenwechselfpeicher validiert. Da die berechneten Temperaturverläufe qualitativ gut mit den in der Literatur angegebenen übereinstimmen, wurde das Modell als geeignet für die Berechnung von Verbundspeichern eingestuft.

Mithilfe des validierten Berechnungsmodells wurde eine Parameterstudie mit insgesamt 2800 Speichervariationen durchgeführt. Es wurden die Partikeldurchmesser, zulässige Austrittstemperaturänderung, Speicherquerschnittsfläche und der PCM-Anteil im Speicher variiert. Für alle Varianten wurde der gleiche Fluidmassenstrom sowie die gleichen Be- und Entladetemperaturen verwendet. Die Speicherlänge wurde bei jeder Konfiguration mit einem Optimierungsalgorithmus für eine feste Beladezeit von 8 h optimiert. Dadurch ergeben sich die gleichen Betriebsparameter für alle Speicherkonfigurationen. Dies ermöglicht eine direkte Vergleichbarkeit der einzelnen Varianten. Zur Wahl einer ausreichenden feinen Diskretisierung wurde eine Netzstudie durchgeführt.

Als Bewertungsgröße wird ein Gesamtwirkungsgrad eingesetzt. Durch einen Kraftwerksprozess bewertet dieser Gesamtwirkungsgrad die auftretenden Druckverluste und Temperaturverläufe umfassender als der exergetische Wirkungsgrad. Die höchsten Wirkungsgrade werden nicht von Verbundspeichern erreicht, sondern von rein sensiblen Speichern. Dazu sind kleine Partikeldurchmesser, niedrige zulässige Austrittstemperaturen und große Speicherquerschnitte notwendig. Das Verbundspeicherkonzept bietet vor allem bei höheren zulässigen Austrittstemperaturen Vorteile für den Gesamtwirkungsgrad. Durch das Phasenwechselmaterial kann für die höheren Austrittstemperaturänderungen die Austrittstemperatur zeitweise stabilisiert werden. Der größte Effekt auf den Gesamtwirkungsgrad wird dabei mit einem PCM-Gehalt von 5 % im Speicher erzielt. Höhere PCM-Anteile führen zu keiner weiteren Verbesserung. Für die Variation des Partikeldurchmessers und des Speicherquerschnitts ergeben sich keine veränderten Abhängigkeiten des Gesamtwirkungsgrades von Verbundspeichern im Vergleich zu sensiblen Speichern.

Der exergetische Wirkungsgrad verhält sich ähnlich zum Gesamtwirkungsgrad. Nur bei größeren Austrittstemperaturänderungen bietet das Verbundspeicherkonzept Vorteile. Der PCM-Anteil im Speicher sollte auch für maximale exergetische Wirkungsgrade 5 % nicht übersteigen.

Das Verbundspeicherkonzept bietet in Bezug auf die benötigte Speichermasse Vorteile gegenüber rein sensiblen Speichern. Bei Vergleich der Speicher mit gleichen Gesamtwirkungsgraden ergibt sich eine Massenreduktion durch das Verbundspeicherkonzept.

Zur Bewertung der energetischen Ausnutzung des Speichermaterials wird der Nutzungsgrad verwendet. Dieser ergibt sich aus dem Verhältnis von gespeicherter Energiemenge zur maximal speicherbaren Energiemenge. Der Nutzungsgrad steigt mit größeren zulässigen Austrittstemperaturen. Kleine Partikeldurchmesser führen zu erhöhten Nutzungsgraden. Die Speicherquerschnittsfläche besitzt einen geringeren Einfluss. Bei Verbundspeichern ergibt sich vor allem bei geringen zulässigen Austrittstemperaturänderungen eine verbesserte energetische Ausnutzung des Speichermaterials. Zur Bewertung der Masseneinsparung wurde eine Abschätzung der Kosten für das gesamte Speichermaterial durchgeführt. Sowohl die Kosten für Phasenwechselmaterial als auch die Kosten zur Herstellung der Verkapselung wurden anhand von Literaturdaten berücksichtigt. Für keine der gewählten Kostenannahmen kann das Verbundspeicherkonzept mit den Kosten für rein sensible Regeneratoren mit gleichen Gesamtwirkungsgraden konkurrieren. Für höhere zulässige Austrittstemperaturen sind allerdings durch Verbundspeicher höhere Gesamtwirkungsgrade möglich. Nur für niedrige Kosten für das Phasenwechselmaterial und Verkapselungskosten von 100 € pro Tonne Phasenwechselmaterial ergeben sich für niedrige PCM-Anteile von 5 % ähnliche Gesamtkosten.

8 Ausblick

In weiteren Untersuchungen sollten gleichzeitig der PCM-Anteil sowie die Schmelztemperatur optimiert werden. Dadurch könnte die Speicheraustrittstemperatur bei der Be- / Entladung auf einem höheren / niedrigeren Temperaturniveau stabilisiert werden. Der PCM-Anteil sollte im Bereich zwischen 0% und 10% feiner abgestuft variiert werden. Die Schmelztemperaturen der beiden Phasenwechselmaterialien sollten näher an der Be- und Entladetemperatur des Speichers liegen.

Für die Realisierung von Verbundspeichern muss ein kosteneffizientes Verkapselungsverfahren entwickelt werden. Es muss eine geringe Wandstärke ermöglicht werden. Außerdem müssen die verwendeten Materialien hohe Wärmeleitfähigkeiten besitzen. Können diese Bedingungen nicht erfüllt werden, muss der Einfluss der Verkapselung auf das thermische Verhalten detailliert untersucht werden. Weiterhin können alternative Verkapselungsformen, wie zum Beispiel in Form von Hohlzylindern, zur Reduzierung des Druckverlusts eingesetzt werden. Dabei muss allerdings auf einen ausreichenden Wärmeübergang geachtet werden. Außerdem müssen geeignete kostengünstige Phasenwechselmaterialien gewählt werden. Neben den thermischen Eigenschaften sind auch weitere Materialeigenschaften wie beispielsweise die Langzeitstabilität, das Korrosionsverhalten und die Umweltverträglichkeit zu berücksichtigen.

Das entwickelte Berechnungsmodell erlaubt eine vereinfachte Berechnung des thermischen Speicherverhaltens. Das Modell wurde validiert und es konnte eine gute qualitative Übereinstimmung mit Literaturdaten festgestellt werden. Zur Reduktion der vorhandenen Abweichungen könnten beispielsweise detaillierte Modelle für den Phasenwechsel implementiert sowie die auftretenden Wärmeverluste berücksichtigt werden.

Für eine umfassendere Kostenanalyse müssen alle für den Bau und Betrieb nötigen Kosten, wie zum Beispiel die Kosten für den Speicherbehälter, die Behälterisolierung und Fundamentkosten berücksichtigt werden. Nur wenn die Gesamtkosten für Material und Betrieb und die thermischen Eigenschaften von Verbundspeichern Vorteile gegenüber anderen Speichertechnologien bieten, werden Verbundspeicher zu einer konkurrenzfähigen Technologie.

9 Literaturverzeichnis

- [1] W. Bender und H. Hausen, *VDI Wärmeatlas - N1 Wärmeübertragung in Regeneratoren*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011, S. 1589–1595.
- [2] S. Zunft, M. Hänel, M. Krüger, und V. Dreißigacker, „A Design Study for Regenerator-type Heat Storage in Solar Tower Plants—Results and Conclusions of the HOTSPOT Project“, *Energy Procedia*, Bd. 49, S. 1088–1096, 2014.
- [3] D. Laing, W.-D. Steinmann, R. Tamme, und C. Richter, „Solid media thermal storage for parabolic trough power plants“, *Solar Energy*, Bd. 80, Nr. 10, S. 1283–1289, Okt. 2006.
- [4] C. Odenthal, W. D. Steinmann, und M. Eck, „The CellFlux concept as an alternative solution for sensible heat storage“, *Energy Procedia*, Bd. 00, 2015.
- [5] H. Mehling und L. F. Cabeza, *Heat and cold storage with PCM*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008, S. 15–140.
- [6] M. M. Kenisarin, „High-temperature phase change materials for thermal energy storage“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 14, S. 955–970, 2010.
- [7] T. Bauer, D. Laing, und R. Tamme, „Overview of PCMs for Concentrated Solar Power in the Temperature Range 200 to 350°C“, *Advances in Science and Technology*, Bd. 74, S. 272–277, 2010.
- [8] B. Zalba, J. M. Marín, L. F. Cabeza, und H. Mehling, „Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications“, *Applied Thermal Engineering*, Bd. 23, Nr. 3, S. 251–283, 2003.
- [9] C. Odenthal, Dissertation, Universität Stuttgart erscheint 2015.
- [10] J. C. Lagarias, J. a. Reeds, M. H. Wright, und P. E. Wright, „Convergence Properties of the Nelder–Mead Simplex Method in Low Dimensions“, *SIAM Journal on Optimization*, Bd. 9, Nr. 1, S. 112–147, 1998.
- [11] N. Wakao und S. Kaguei, *Heat and Mass Transfer in Packed Beds*. New York London Paris: Gordon and Breach, Science Publishers, Inc., 1930, S. 293.
- [12] H. Hausen, *Wärmeübertragung im Gegenstrom, Gleichstrom und Kreuzstrom*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 1976, S. 267–270.
- [13] F. W. Schmidt und A. J. Willmott, *Thermal Energy Storage and Regeneration*. Washington New York London: Hemisphere Publishing Corporation, 1981, S. 27–29.
- [14] S. Ergun, „Fluid Flow Through Packed Columns“, *Chemical Engineering Progress*, Bd. 48, S. 89–94, 1952.
- [15] R. V. Padilla, *Simplified Methodology for Designing Parabolic Trough Solar Power Plants*. Dissertation, University of South Florida 2011.

-
- [16] G. Scheffknecht, *Ein Beitrag zur Dynamik des Latentwärmespeichers*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1988.
- [17] V. Alexiades und A. D. Solomon, *Mathematical Modeling of Melting and Freezing Processes*. Washington Philadelphia London: Hemisphere Publishing Corporation, 1993.
- [18] L. Klimes, P. Charvat, und M. Ostry, „Challenges in the Computer Modeling of Phase Change Materials“, *Materials and Technology*, Bd. 46, Nr. 4, S. 335–338, 2012.
- [19] D. Okello, C. W. Foong, O. J. Nydal, und E. J. K. Banda, „An experimental investigation on the combined use of phase change material and rock particles for high temperature (~350°C) heat storage“, *Energy Conversion and Management*, Bd. 79, S. 1–8, 2014.
- [20] G. Zanganeh, M. Commerford, A. Haselbacher, A. Pedretti, und A. Steinfeld, „Stabilization of the outflow temperature of a packed-bed thermal energy storage by combining rocks with phase change materials“, *Applied Thermal Engineering*, Bd. 70, S. 316–320, 2014.
- [21] P. a. Galione, C. D. Pérez-Segarra, I. Rodríguez, O. Lehmkuhl, und J. Rigola, „A New Thermocline-PCM Thermal Storage Concept for CSP Plants. Numerical Analysis and Perspectives“, *Energy Procedia*, Bd. 49, S. 790–799, 2014.
- [22] S. Karthikeyan, G. Ravikumar Solomon, V. Kumaresan, und R. Velraj, „Parametric studies on packed bed storage unit filled with PCM encapsulated spherical containers for low temperature solar air heating applications“, *Energy Conversion and Management*, Bd. 78, S. 74–80, 2014.
- [23] I. Dincer und M. A. Rosen, *Thermal Energy Storage - System and Application*, 2. Aufl. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2011, S. 243–244.
- [24] D. Wasser und W. W. H. Kretzschmar, *VDI-Wärmeatlas - D2 Stoffwerte von bedeutenden reinen Fluiden*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013, S. 196.
- [25] T. Bauer, D. Laing, U. Kröner, und R. Tamme, „Sodium Nitrate for High Temperature Latent Heat Storage“, in *11th International Conference on Thermal Energy Storage - Effstock*, Juni 14-17, Stockholm, 2009, S. 1–8.
- [26] A. Stückle, *Analyse und Modellierung gekoppelter Regeneratoren zur Speicherung sensibler und latenter Wärme für den Einsatz in Dampfkraftwerken*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2013, S. 41.
- [27] F. Samara, D. Groulx, und P. H. Biwole, „Natural Convection Driven Melting of Phase Change Material: Comparison of Two Methods“, in *COMSOL Conference*, Okt. 3-5, Boston, 2012, S. 1-8.
- [28] C. Arkar und S. Medvec, „Influence of accuracy of thermal property data of a phase change material on the result of a numerical model of a packed bed latent heat storage with spheres“, *Thermochimica Acta*, Bd. 438, S. 192–201, 2005.
- [29] Rubitherm Technologies GmbH, „Technisches Datenblatt RT 20“, 2013.

-
- [30] C. Odenthal, W. Steinmann, und M. Eck, „Simulation and experimental results of the CellFlux storage concept“, in *Eurotherm Seminar 99*, Mai 28-30, Lleida, 2014, S. 1–10.
- [31] K. Nithyanandam und R. Pitchumani, „Cost and performance analysis of concentrating solar power systems with integrated latent thermal energy storage“, *Energy*, Bd. 64, S. 793–810, 2014.
- [32] A. Mathur, R. Kasetty, J. Oxley, J. Mendez, und K. Nithyanandam, „Using Encapsulated Phase Change Salts for Concentrated Solar Power Plant“, *Energy Procedia*, Bd. 49, S. 908–915, 2014.
- [33] U. Herrmann und D. W. Kearney, „Survey of Thermal Energy Storage for Parabolic Trough Power Plants“, *Journal of Solar Energy Engineering*, Bd. 124, Nr. 2, S. 145–152, 2002.

Anhang

A Eingabeparameter des bestehenden Berechnungsmodells

Tabelle A.1: Zu definierende Eingabeparameter im bestehenden Berechnungsmodell

Betriebsparameter	Symbol	Einheit
Beladetemperatur Fluid	T_{be}	°C
Entladetemperatur Fluid	T_{en}	°C
Zulässige Änderung der Fluidaustrittstemperatur	ΔT_{mfa}	K
Starttemperatur Speicherinventar	$T_{s,initial}$	°C
Fluidmassenstrom	\dot{m}_f	kg/s
Beladezeit	t_{be}	h
Querschnittsfläche des Speichers	A_{sp}	m ²
Länge des Speichers	L_{sp}	m
Materialeigenschaften Speicherinventar		
Wärmeleitfähigkeit	λ_s	W/m/K
Spezifische Wärmekapazität	c_s	J/kg/K
Dichte	ρ_s	kg/m ³
Partikeldurchmesser	d_p	m
Porosität	ε	-
Simulationseinstellungen		
Gesamtanzahl der Berechnungsknoten	k_{ges}	-
Zeitschrittweite	Δt	s
Maximale Berechnungszeit	t_{end}	s

B StoffwertROUTINEN für LUFT

Die Stoffwertkorrelation wurden aus den Stoffwerttabellen des VDI-Wärmeatlas für trockene Luft bei einem Druck von 1 bar ermittelt.

Tabelle B.1: Stoffwertkorrelation für Luft

Korrelation	Einheit
$\rho_f(T) = 6,9292 \cdot 10^{-12}T^4 - 1,3333 \cdot 10^{-8}T^3 + 1,0136 \cdot 10^{-5}T^2 - 0,0042353T + 1,2692$	kg/m ³
$\eta_f(T) = 1,2533 \cdot 10^{-14}T^3 - 2,7079 \cdot 10^{-11}T^2 + 4,8953 \cdot 10^{-8}T + 1,7245 \cdot 10^{-5}$	kg/m/s
$c_{p,f}(T) = -3,9426 \cdot 10^{-7}T^3 + 0,00053053T^2 + 0,0069362T + 1005,9$	J/kg/K
$\lambda_f(T) = -1,7216 \cdot 10^{-8}T^2 + 7,1388 \cdot 10^{-5}T^2 + 0,024557$	W/m/K

C Normierte Feststoff- und Fluidtemperaturen der Netzstudie

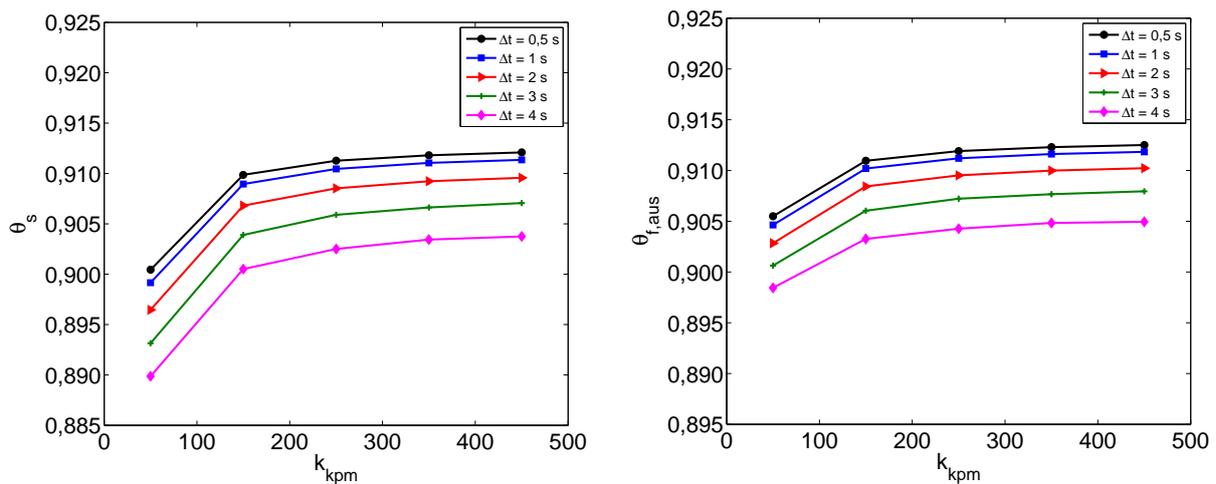


Abbildung C.1: Ergebnisse der Netzstudie für ΔT_{mfa} von 85 K bei Variation der Zeitschrittweite Δt und Knotenzahl pro Meter PCM k_{kpm} . Links: Normierte Feststofftemperaturen an der Position des letzten Knotens im Speicher für k_{kpm} von 50; Rechts: Normierte Fluidaustrittstemperatur

D Verzögerter Temperaturanstieg bei größerer Zeitschrittweite

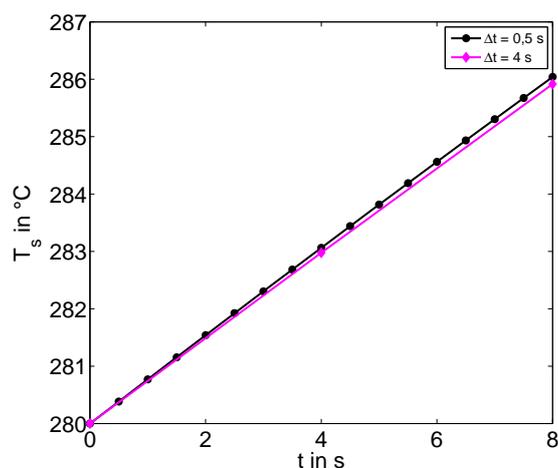


Abbildung D.1: Vergleich der Feststofftemperaturen des ersten Knotens für eine Zeitschrittweite von 0,5 s und 4 s bei einer Knotenzahl pro Meter PCM von 50. Es ergibt sich ein leicht verzögerter Temperaturanstieg bei der größeren Zeitschrittweite.

E Diskussion der Abhängigkeiten des exergetischen Wirkungsgrades

Der exergetische Wirkungsgrad ist in Abbildung E.1 im Bereich zwischen 65 % und 100 % dargestellt. Wie für den Gesamtwirkungsgrad enthält die Abbildung drei Graphen, um die Abhängigkeit des exergetischen Wirkungsgrades von ΔT_{mfa} , A_{sp} , d_p zu zeigen. Die PCM-Anteile sind mit verschiedenen Symbolen gekennzeichnet. In Abbildung E.2 sind die exergetischen Wirkungsgrade aller Variationen in gleicher Form dargestellt.

Der maximale und minimale Wert für den exergetischen Wirkungsgrad aller Parametervariationen beträgt 97,00 % und 50,24 %. Diese Werte ergeben sich für rein sensible Speicher ohne Phasenwechselmaterial. Für den maximalen Wirkungsgrad wird eine maximal zulässige Austrittstemperaturänderung von 15 K, ein Speicherquerschnitt von 800 m² und ein Partikeldurchmesser von 0,01 m benötigt. Der Minimalwert dagegen wird für einen Speicher mit einer maximal zulässigen Austrittstemperaturänderung von 85 K, einem Speicherquerschnitt von 1000 m² und einem Partikeldurchmesser von 0,10 m erreicht.

Die Abhängigkeiten des exergetischen Wirkungsgrades von den vier Parametern stimmen prinzipiell mit denen des Gesamtwirkungsgrades überein. Ebenso sind diese Abhängigkeiten auf dieselben Ursachen zurückzuführen. Die Verbundspeicher führen bei ΔT_{mfa} von 55 K, 65 K und 75 K zu höheren maximalen exergetischen Wirkungsgraden als rein sensible Speicher. Der PCM-Gehalt beträgt dabei je nach ΔT_{mfa} maximal 5 % bzw. 10 %. Für die Varianten von A_{sp} und d_p bietet das Phasenwechselmaterial im Speicher keine Verbesserungen.

Verglichen mit dem Gesamtwirkungsgrad, ergeben sich die höchsten exergetischen Wirkungsgrade für andere Speicherkonfigurationen. Dies resultiert aus dem verstärkten Einfluss des Druckverlusts auf den Gesamtwirkungsgrad.

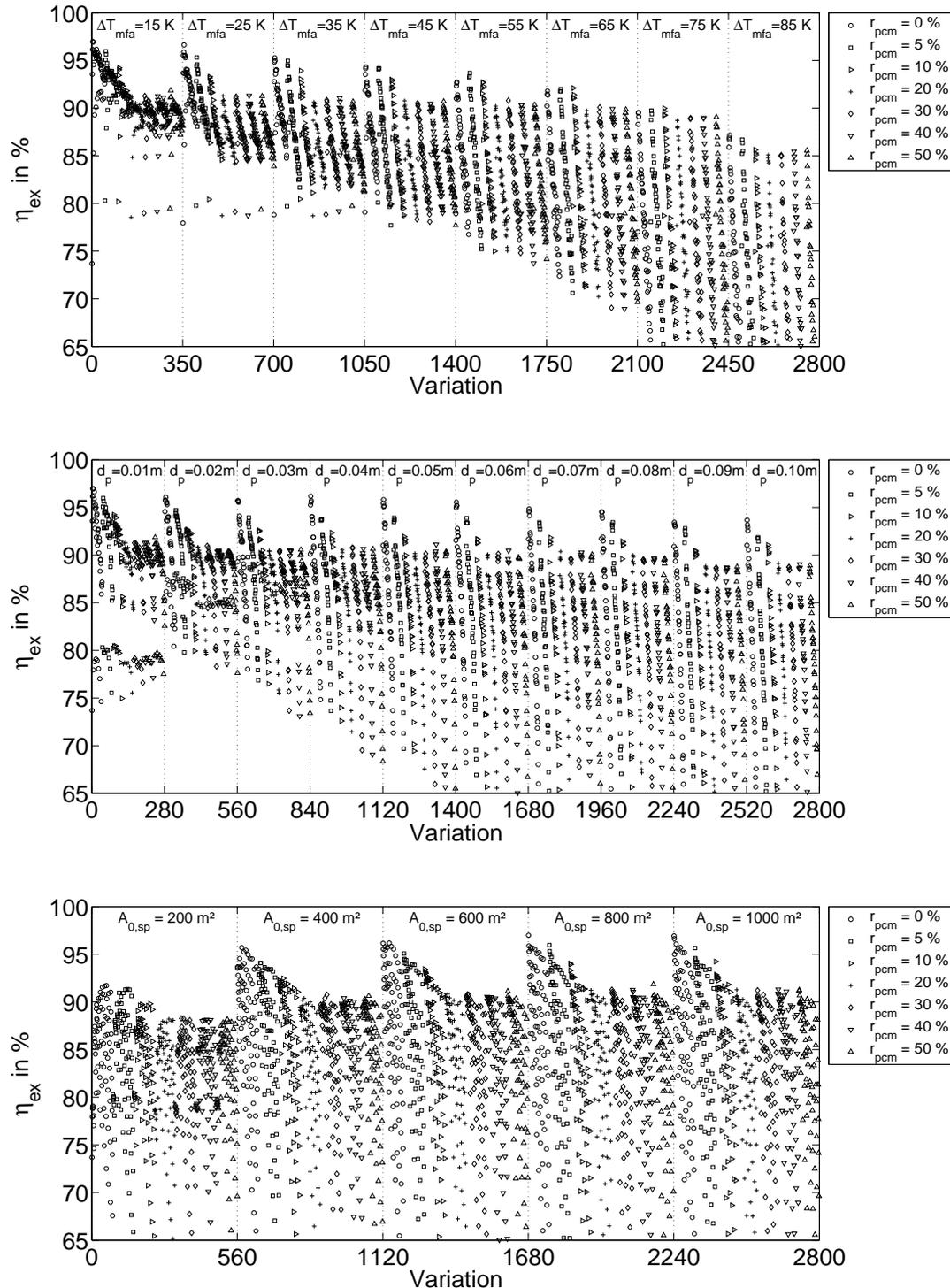


Abbildung E.1: Exergetischer Wirkungsgrad zwischen 65 % und 100 % in Abhängigkeit von ΔT_{mfa} (oben), d_p (mittig) und A_{sp} (unten). Die Variationen des PCM-Anteils im Speicher r_{pcm} sind mit unterschiedlichen Symbolen gekennzeichnet.

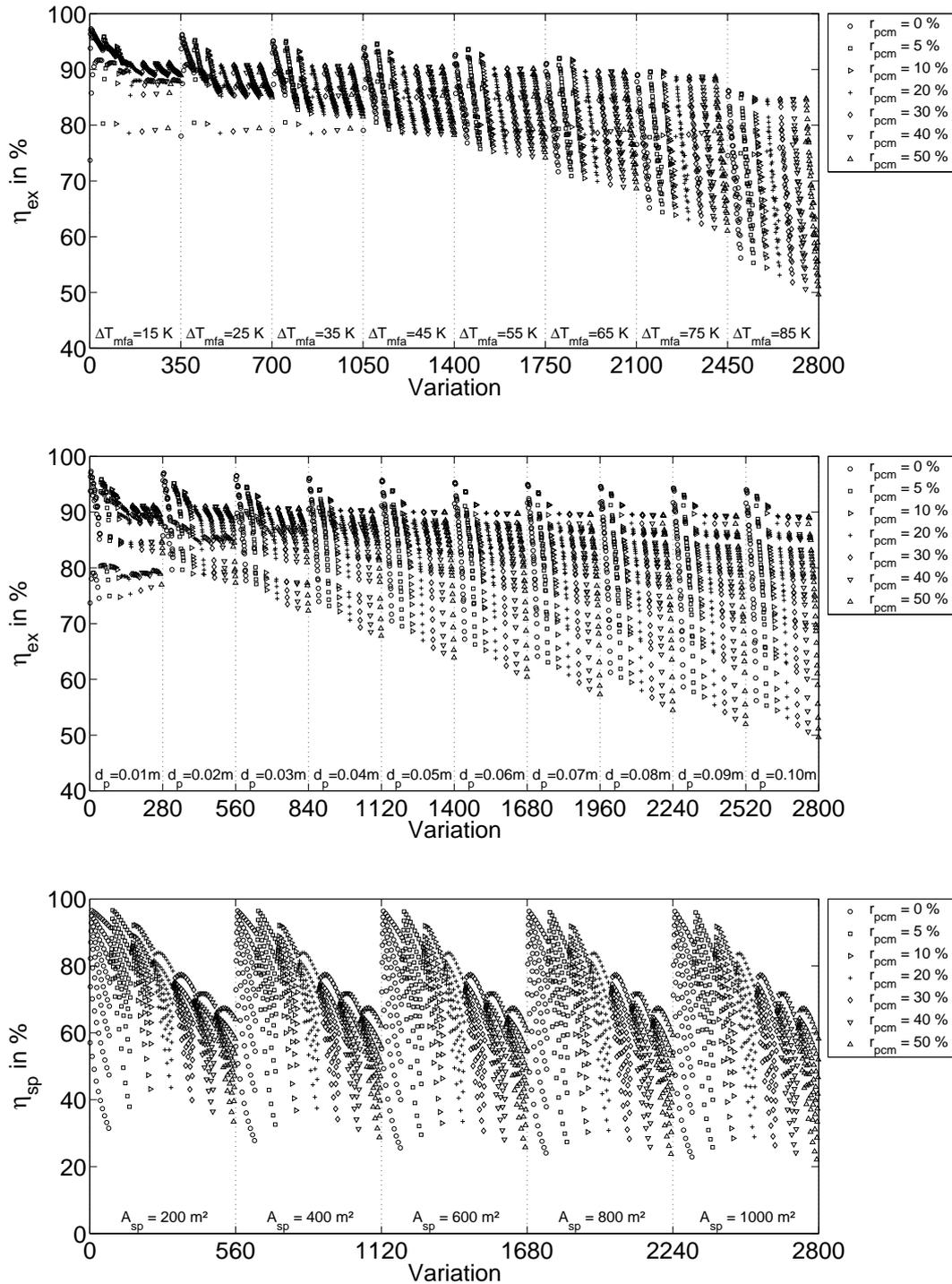


Abbildung E.2: Exergetischer Wirkungsgrad aller Variationen in Abhängigkeit von ΔT_{mfa} (oben), d_p (mittig) und A_{sp} (unten). Die Variationen des PCM-Anteils im Speicher r_{pcm} sind mit unterschiedlichen Symbolen gekennzeichnet.

F Diskussion der Abhängigkeiten des Nutzungsgrades

Der Nutzungsgrad η_{nutz} gibt Auskunft darüber, wie gut die Kapazität eines Speichers ausgenutzt wird. Die Ausnutzung einer vorhandenen Kapazität ist bei den definierten Randbedingungen von den Wärmeübergangsverhältnissen abhängig. Deshalb lässt der Nutzungsgrad bei den definierten Studienparametern eine Aussage über den Wärmeübergang im Speicher zu.

Die Nutzungsgrade sind für alle Varianten in Abbildung F.1 gezeigt. Die Darstellung der Abhängigkeit von η_{nutz} von den verschiedenen Studienparametern erfolgt wie für den exergetischen Wirkungsgrad und den Gesamtwirkungsgrad in getrennten Graphen für ΔT_{mfa} , A_{sp} und d_p .

Anders als bei η_{ges} wird der maximale Nutzungsgrad bei einer hohen zulässigen Austrittstemperaturänderung von 85 K erreicht. Dieser beträgt 96,63 %. Der Partikeldurchmesser beträgt für den maximalen Nutzungsgrad 0,01 m, der Speicherquerschnitt 1000 m² und der PCM-Anteil 5 %. Der minimale Wert von 22,10 % wird für einen Speicher mit einer zulässigen Austrittstemperaturänderung von 15 K, einem Partikeldurchmesser von 0,10 m und einer Querschnittsfläche von 1000 m² erreicht. Der PCM-Anteil beträgt für diesen Speicher 50 %.

Wird das Diagramm für ΔT_{mfa} betrachtet, ergeben sich die größten Nutzungsgrade für hohe Werte von ΔT_{mfa} bei PCM-Anteilen von 0 %, 5 % und 10 % im Speicher. Das Speichermaterial durchläuft für große ΔT_{mfa} die größte Temperaturveränderung. Die Speicherkapazität wird demzufolge am besten ausgenutzt. Mit niedrigen Werten für ΔT_{mfa} von 15 K und 25 K werden die größten Nutzungsgrade für Speicher mit PCM-Anteilen von 5 %, 10 % und 20 % erzielt. Das Verbundspeicherkonzept führt demzufolge zu höheren Werten als rein sensible Speicher. Durch das Phasenwechselmaterial sinkt die maximal speicherbare Energiemenge durch eine Massenreduktion (siehe Abschnitt 6.4.2). Die eingespeicherte Energiemenge bleibt für alle Varianten nahezu gleich. Nach Gleichung (3.14) steigt demnach η_{nutz} . Je geringer die zulässige Austrittstemperaturänderung, desto größer wird die Spanne der auftretenden Nutzungsgrade bei verschiedenen PCM-Anteilen. Demzufolge steigt die Abhängigkeit von den anderen beiden Studienparametern.

Für die Variation des Partikeldurchmessers ergeben sich die größten Nutzungsgrade und der schmalste Wirkungsgradbereich für kleine Partikelgrößen und geringe PCM-Anteile. Die kleinen Werte für d_p führen zu einer großen Oberfläche innerhalb des Speichermaterials. Dadurch ergeben sich hohe Wärmeübergangskoeffizienten, die eine gute Wärmeübertragung gewährleisten. Bei kleinen Partikeln ergeben sich durch die gute Wärmeübertragung kleinere Speicher und damit niedrigere Werte für die maximal speicherbare Energiemenge. Nach Gleichung (3.14) werden dadurch höhere Nutzungsgrade erreicht. Bei größeren Partikeln reduziert sich die Oberfläche.

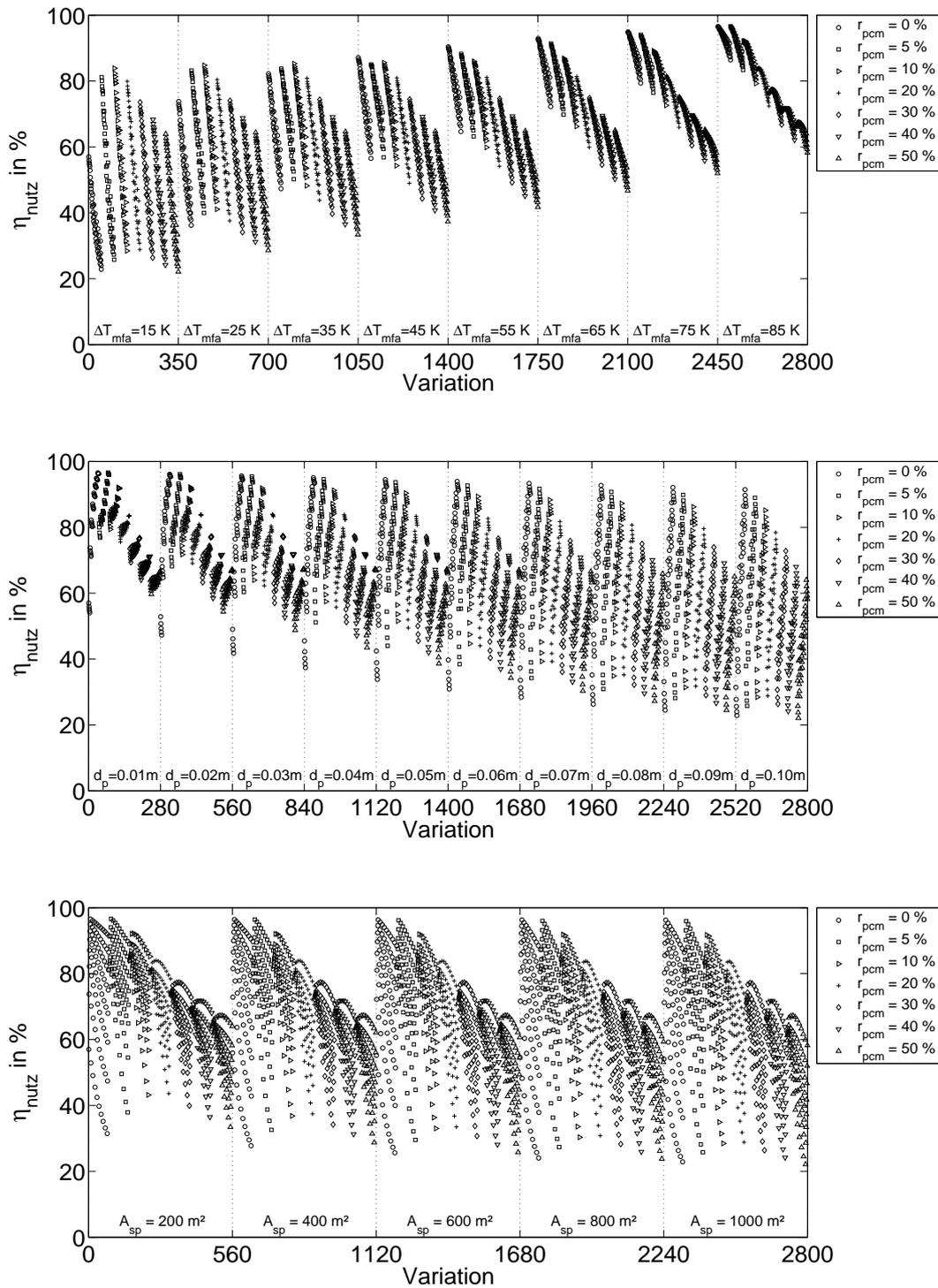


Abbildung F.1: Nutzungsgrad zwischen 0 % und 100 % in Abhängigkeit von ΔT_{mfa} (oben), d_p (mittig) und A_{sp} (unten). Die Variationen des PCM-Anteils im Speicher r_{pcm} sind mit unterschiedlichen Symbolen gekennzeichnet.

Mit der vorherigen Überlegung führt dies zu einem schlechteren Wärmeübergang und demzufolge zu geringeren Nutzungsgraden. Bei steigendem Anteil von Phasenwechselmaterial sinkt ab einem r_{pcm} von 5 % der Nutzungsgrad für alle Partikelgrößen. Der reduzierte Nutzungsgrad

resultiert aus größeren Speicherkapazitäten bei höheren PCM-Anteilen. Außerdem werden die Speicher mit höheren PCM-Anteilen zu immer geringer werdenden Teilen vollständig Be- und Entladen (vgl. Abbildung 6.4).

Die Abhängigkeit des Nutzungsgrades von dem Speicherquerschnitt A_{sp} ist verglichen mit ΔT_{mfa} und d_p am geringsten. Für alle Querschnitte werden ähnliche Werte für η_{nutz} erreicht. Mit einem PCM-Anteil von 5 % im Speicher ergeben sich ähnlich hohe Nutzungsgrade wie bei rein sensiblen Speichern. Mit größerem PCM-Anteil sinkt für alle Varianten des Querschnitts η_{nutz} . Die Ursache ist auf die erhöhte Speicherkapazität und die unvollständigere Be- und Entladung zurückzuführen.

Zusammenfassend kann zum Erreichen eines hohen Nutzungsgrades festgehalten werden, dass eine möglichst hohe zulässige Austrittstemperaturänderung, eine geringe Partikelgröße und ein geringer PCM-Anteil im Speicher gewählt werden sollte. Für die Wahl des Speicherquerschnitts kann kein Einfluss auf den Speichewirkungsgrad festgestellt werden. Das Verbundspeicherkonzept bietet vor allem bei geringen zulässigen Austrittstemperaturänderungen eine höhere energetische Ausnutzung des gesamten Speichermaterials als rein sensible Speicher. Zu große Anteile von PCM im Verbundspeicher wirken sich, wie auch für den Gesamtwirkungsgrad, negativ aus. Je nach Speicherkonfiguration sollte für hohe Nutzungsgrade ein PCM-Anteil von maximal 20 % verwendet werden.

G Gesamtwirkungsgrad aller Speichervariationen

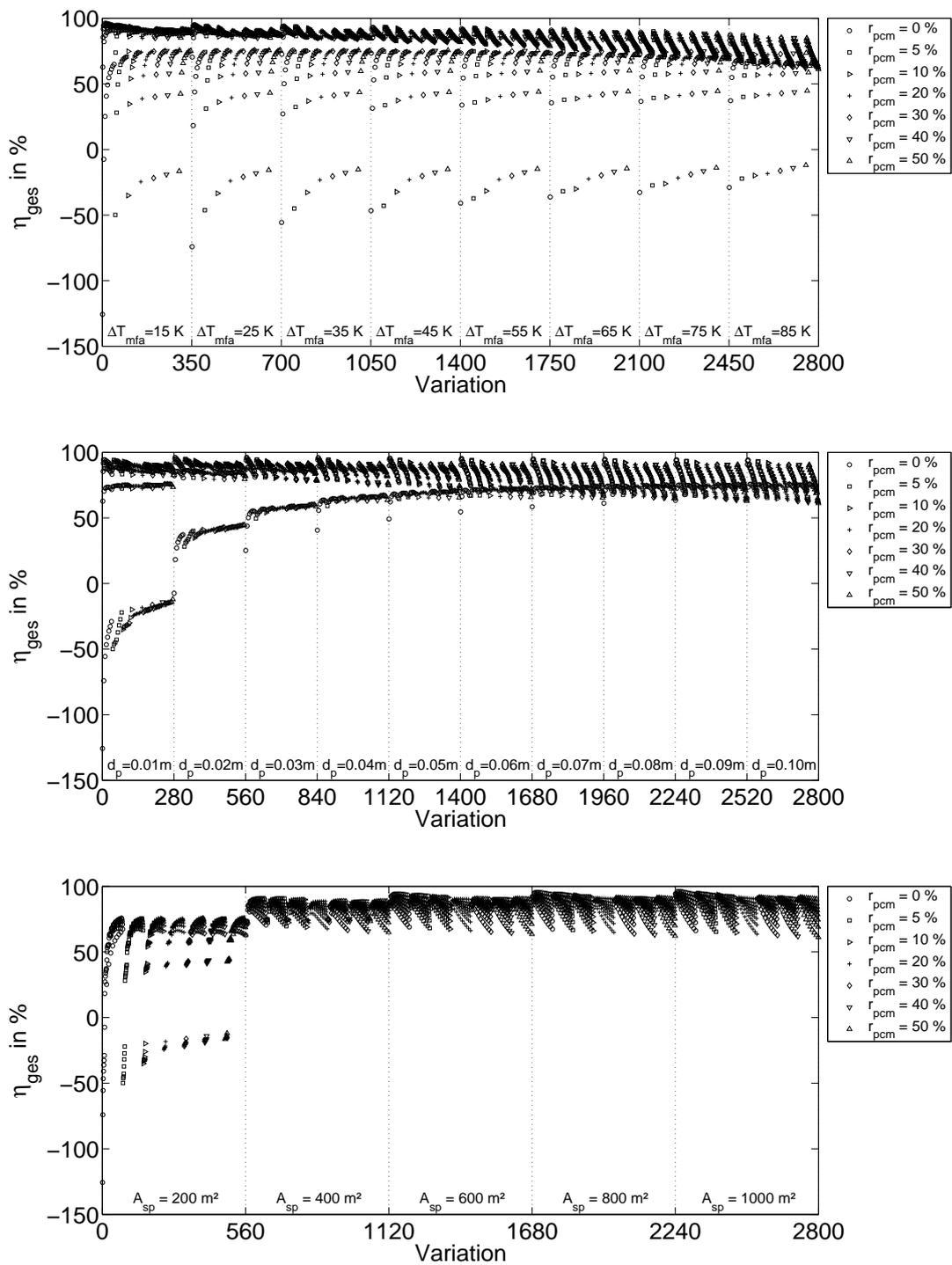


Abbildung G.1: Gesamtwirkungsgrad aller Variationen in Abhängigkeit von ΔT_{mfa} (oben), d_p (mittig) und A_{sp} (unten). Die Variationen des PCM-Anteils im Speicher r_{pcm} sind mit unterschiedlichen Symbolen gekennzeichnet.

H Volumetrischer Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit von Partikelgröße und Speicherquerschnitt

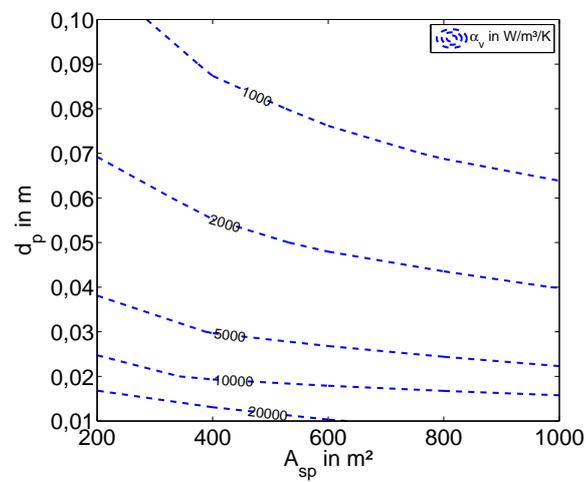


Abbildung H.1: Modifizierter volumetrischer Wärmeübergangskoeffizient $\bar{\alpha}_v$ in einem Speicher über dem Partikeldurchmesser und der Speicherquerschnittsfläche. Der Wärmeübergangskoeffizient ist für eine mittlere Fluidtemperatur von 330 °C, einen Fluidmassenstrom von 100 kg/s und den Stoffeigenschaften von Basalt erstellt.

I Druckverlust in Abhängigkeit von Partikelgröße und Speicherquerschnitt

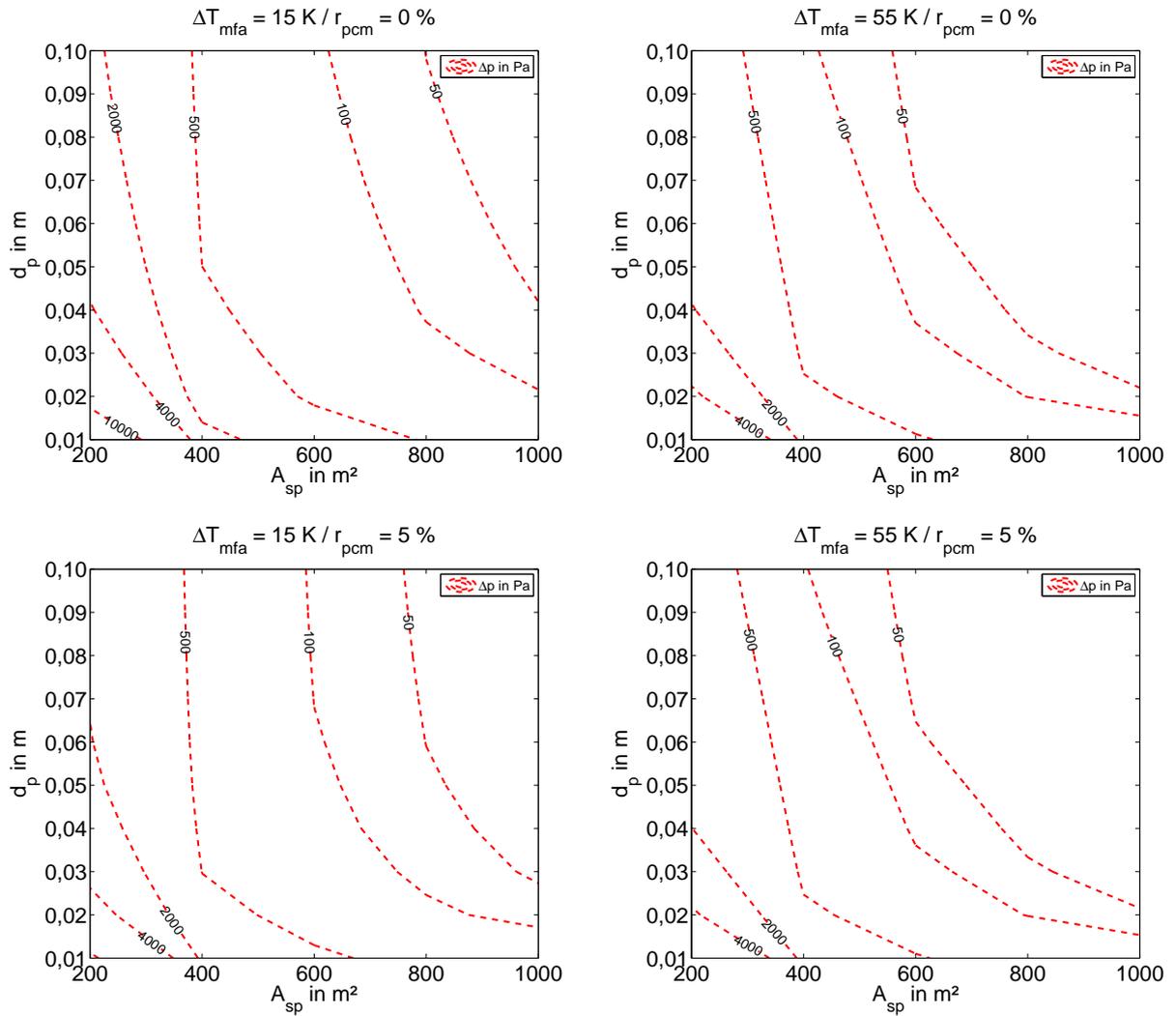


Abbildung I.1: Druckverlust Δp in einem Speicher über dem Partikeldurchmesser und der Speicherquerschnittsfläche. Der Druckverlust ist für die Varianten für ΔT_{mfa} von 15 K und 55 K sowie r_{pcm} von 0 % und 5 % gezeigt.

J Speichermasse und volumetrischer Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit von Partikeldurchmesser und Speicherquerschnitt

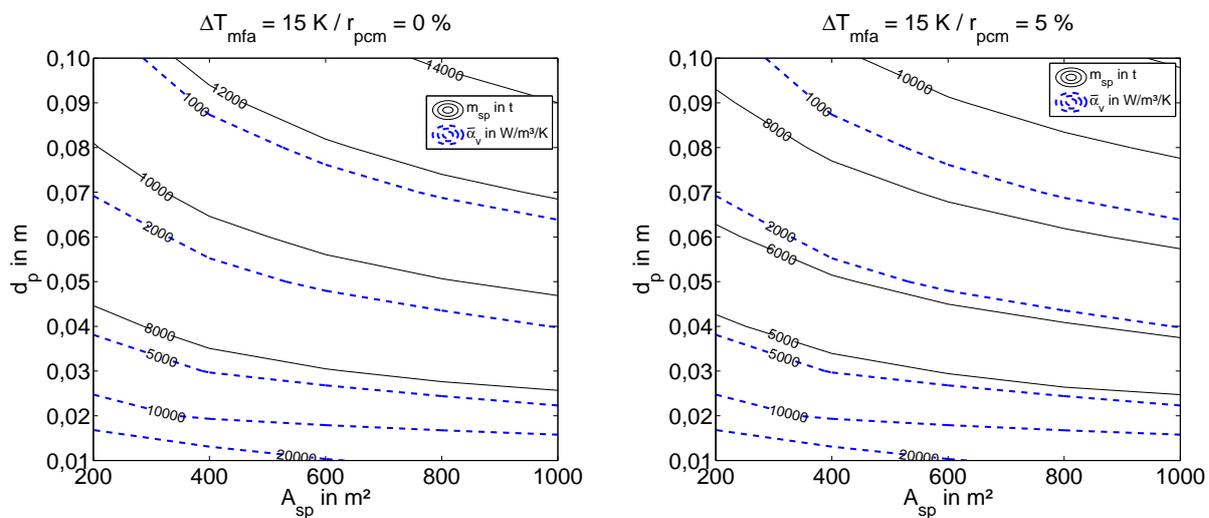


Abbildung J.1: Speichermasse und modifizierter volumetrischer Wärmeübergangskoeffizient für die Variationen von d_p und A_{sp} . Die Speichermasse ist links für bei ΔT_{mfa} von 15 K und r_{pcm} von 0 % und rechts für r_{pcm} von 5 % gezeigt. Der modifizierte volumetrische Wärmeübergangskoeffizient ist für beide Graphen für eine mittlere Fluidtemperatur von 330 °C, einen Fluidmassenstrom von 100 kg/s und für die Stoffeigenschaften von Basalt dargestellt.

K Speichermaterialkosten für verschiedene Kostenannahmen

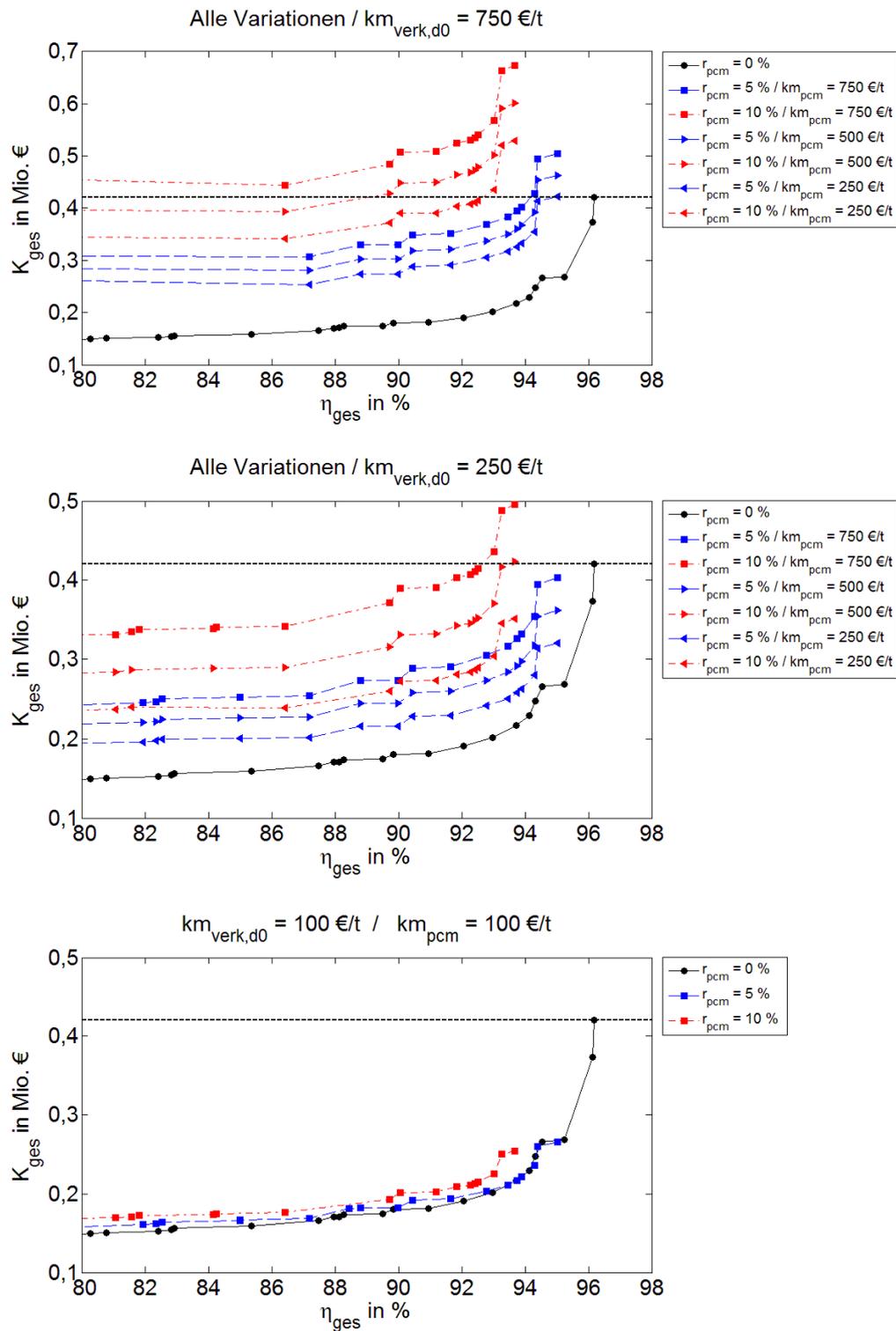


Abbildung K.1: Gesamtkosten für das Speichermaterial K_{ges} für $km_{verk,d0}$ von 750 €/t (oben) und 250 €/t (mittig) aufgetragen über dem Gesamtwirkungsgrad η_{ges} . Die verschiedenen PCM-Gehalte sind durch unterschiedliche Linien gekennzeichnet. Die drei Varianten für km_{pcm} von 750 €/t, 500 €/t und 250 €/t werden durch verschiedene Symbole markiert. Unten sind die Gesamtkosten für ein $km_{verk,d0}$ und km_{pcm} von 100 €/t gezeigt. Die unterbrochenen Linien repräsentieren die Kosten des rein sensiblen Speichers mit dem maximalen Gesamtwirkungsgrad aller Variationen