

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Herausgebers	III
Vorwort des Autors	IV
Kurzfassung	V
Abstract	VI
Nomenklatur	XI
1 Einleitung.....	1
2 Energieversorgung von Nichtwohngebäuden	5
2.1 Versorgungskonzepte.....	5
2.1.1 Wärme- und Kälteerzeugung	5
2.1.2 Thermische Energiespeicher	9
2.2 Eis-Energiespeicher	11
2.2.1 Technologien.....	11
2.2.2 Betriebsweisen	13
2.2.3 Modellierung	16
2.2.4 Optimierung	19
2.3 Beschreibung von Nichtwohngebäuden	23
2.3.1 Kategorisierung und Einordnung	24
2.3.2 Definition der untersuchten Referenzgebäude	27
3 Entwicklung einer systematischen Methode zur Bewertung und Optimierung von Eis-Energiespeichern in Verbundsystemen.....	29
3.1 Bewertungsmodell	29
3.1.1 Ökonomisch	29
3.1.2 Ökologisch	31
3.1.3 Multikriteriell	32
3.2 Ansätze zur Optimierung des Anlagenbetriebs	33
3.2.1 Konstante Regelung – Jahr	33
3.2.2 Konstante Regelung – Woche.....	33
3.2.3 Saisonale Regelung	33
3.2.4 Wöchentlich angepasste Regelung.....	35
3.3 Optimierung der Speichergröße und Anlagenkonfiguration	35
3.3.1 Optimierung der Anlagendimensionierung.....	35
3.3.2 Simulationsplan.....	37
3.4 Übertragbarkeit auf andere Gebäudetypen	37
3.4.1 Berechnung synthetischer Lastprofile von Nichtwohngebäuden.....	38
3.4.2 Vorabsimulation zur Auswahl der zu untersuchenden Fälle	40

3.5	Sensitivitätsanalyse	42
4	Aufbau der Simulationsmodelle	43
4.1	Numerisches Model des Speichers	44
4.1.1	Enthalpie-Methode.....	44
4.1.2	Diskretisierung	48
4.1.3	Konvektiver Wärmeübergang	51
4.1.4	Anbindung an das umliegende Erdreich	52
4.1.5	Stoffdaten	53
4.2	Analytische Validierung	54
4.2.1	Zwei-Phasen-Stefan-Problem in kartesischen Koordinaten	54
4.2.2	Quasistationäre Lösung in Zylinderkoordinaten.....	55
4.3	Wärme- und Kälteerzeugung und Verteilung.....	56
4.3.1	Wärmeerzeuger	57
4.3.2	Kälteerzeuger	58
4.3.3	Hydraulik und Verteilung	60
5	Das Universitätsgebäude „TAO“ als Fallbeispiel	61
5.1	Beschreibung des Fallbeispiels	61
5.1.1	Das Versorgungssystem.....	61
5.1.2	Betriebsweisen und hydraulische Einbindung	63
5.1.3	Der Eis-Energiespeicher	64
5.1.4	Messtechnik und Datenaufzeichnung	65
5.1.5	Anlagenregelung	69
5.2	Verbrauchsdaten des Gebäudes	71
5.2.1	Jährlich.....	71
5.2.2	Wöchentlich	75
5.3	Charakterisierung des Eis-Energiespeichers.....	76
6	Verifizierung und Validierung der Modelle.....	81
6.1	Speichermodell	81
6.1.1	Analytische Validierung	81
6.1.2	Einhaltung der Energiebilanz.....	85
6.1.3	Abgleich mit Langzeitmessdaten	85
6.2	Wärme- und Kälteerzeuger	88
6.2.1	Einzelbetrachtung der Anlagen.....	88
6.2.2	Betrachtung des Verbundmodells	91
6.3	Abgleich der entwickelten synthetischen Lastprofile anhand realer Messdaten	92
6.3.1	Analyse der Lastprofile.....	92
6.3.2	Verifizierung der Eignung der Lastprofile für die Speicheroptimierung.....	97
6.3.3	Verifizierung von nPro zur Vorauswahl	100

7	Ergebnisse und Diskussion.....	103
7.1	Anlagenbetrieb am Fallbeispiel des TAO-Gebäudes.....	103
7.1.1	Einfluss der Betriebsweisen.....	103
7.1.2	Optimierung des Anlagenbetriebs.....	108
7.2	Anlagendimensionierung am Fallbeispiel des TAO-Gebäudes.....	118
7.2.1	Ergebnisse der Variationsrechnungen.....	118
7.2.2	Sensitivitätsanalyse der Randbedingungen.....	123
7.3	Übertragbarkeit der Methodik auf andere Gebäudetypen.....	128
7.3.1	Auswahl der betrachteten Referenzgebäude.....	128
7.3.2	Ergebnisse der detaillierten Simulationen.....	132
8	Empfehlungen für die Auslegung und den Betrieb von Eis-Energiespeichern in Nichtwohngebäuden.....	139
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	143
10	Summary and future work.....	149
	Literaturverzeichnis.....	155
	Vorveröffentlichungen.....	168
	Anhang.....	171
A1.	Baupläne.....	171
A2.	Ergebnisse der Speicher- und Anlagensimulation.....	172
A3.	Normierte Lastprofile für Nichtwohngebäude.....	175