

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Herausgebers III

Vorwort des AutorsIV

Kurzfassung V

Abstract VI

NomenklaturXI

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