

Speicherung thermischer Energie im Temperaturbereich bis 1000°C mit Salz/Keramik als Speichermedium

von der Fakultät Energietechnik der
Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von
Ulrich Taut
aus Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. E. Hahne
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. M. Groll
Tag der mündlichen Prüfung: 28.2.97

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik
der Universität Stuttgart

1997

Kurzfassung

Speicherung thermischer Energie im Temperaturbereich bis 1000°C mit Salz/Keramik als Speichermedium

Ein neu entwickeltes Salz/Keramik-Material basiert auf der Einlagerung von Salzpartikeln in eine feste Keramikmatrix. Durch einen Phasenwechsel der Salzkomponente kann zusätzlich zu fühlbarer Wärme auch Latentwärme gespeichert werden. Es können Strukturen (Gittersteine) hergestellt werden, wie sie aus der Hochtemperatur-Regeneratortechnologie bekannt sind. Es handelt sich also um Feststoffspeicher, die mit einem gasförmigen Wärmeträger betrieben werden (in der Regel Luft). Technische Regeneratoren sind auf kurze Zykluszeiten ausgelegt. Im Unterschied dazu muß bei einem Wärmespeicher die volumetrische Energiedichte im Material optimiert werden. Durch den zyklischen Betrieb der Wärmespeicher entstehen charakteristische lokale Temperaturverläufe, die stark von den Betriebsrandbedingungen, insbesondere von den zulässigen Gasaustrittstemperaturen beim Be- und Entladen abhängig sind.

Zur Beschreibung der Vorgänge im Speicher wurde ein Rechenprogramm auf der Basis eines Finite-Differenzen-Verfahrens erstellt und anhand verschiedener Meßergebnisse validiert. Es zeigt sich, daß durch den gezielten Einsatz von Salz/Keramik-Schichten an den Enden des Speichers die Temperaturverläufe günstig beeinflusst werden können. Der mittlere Bereich des Speichers bleibt dabei mit herkömmlicher Keramik besetzt. Durch eine Anpassung der Randbedingungen an die Schmelztemperatur des verwendeten Salzes oder umgekehrt wird ein Puffereffekt an den Speicherenden erreicht. Dadurch werden die Gasaustrittstemperaturen auf konstantem Niveau gehalten und das Erreichen festgelegter Grenztemperaturen verzögert. Der Anteil der gespeicherten fühlbaren Wärme im Mittelteil des Speichers kann enorm gesteigert werden und die volumetrische Energiedichte um den Faktor 2 bis 3 verbessert werden.

Dieser Puffereffekt wird von vielen Faktoren begünstigt oder behindert. Es folgt deshalb eine ausführliche Untersuchung der verschiedenen Einflußparameter auf die Steigerung der Speicherkapazität. Durch den Einsatz von Salz/Keramik werden Wirkungs- und Nutzungsgrade deutlich verbessert und die übertragenen Wärmeströme werden gleichmäßiger. Auch eine exergetische Untersuchung zeigt die Vorteile der neuen Speichertechnik. Anstatt die Speicherkapazität zu erhöhen, kann auch das Speichervolumen theoretisch um bis zu 60% reduziert werden. Am Beispiel eines projektierten Speichers für solar erzeugte Hochtemperaturwärme wird eine detaillierte Untersuchung über die erreichbare Energiedichte und eine Optimierung der geometrischen Speicherparameter durchgeführt.

Abstract

Thermal Energy Storage using Salt/Ceramic Phase-Change Material in Temperature Ranges up to 1000°C

A newly developed salt/ceramic phase-change material is based on the encapsulation of salt particles in a solid ceramic matrix. During phase-change in the salt both sensible and latent heat can be stored. This new material is formed in checker bricks, as known in high-temperature regenerator technique. A direct contact heat exchange between gas (usually air) and the surface of the storage material can be achieved. During operation, a typical temperature distribution is established after about 10-20 identical storage cycles. These temperature profiles are mainly a function of the operation modes, especially the gas outlet temperatures during charging and discharging.

For modeling the thermal behaviour of the storage, a simulation code has been developed based on a finite-difference-method. The program is validated with various measurements received from a test storage unit. An advanced storage configuration is suggested where only a small region at the extremities of the storage unit consists of salt/ceramic. The large middle part is packed with conventional ceramic material. It can be shown that the salt-ceramic layer acts as a buffer which keeps the gas outlet temperatures on a constant level during storage operation. The sensible heat stored in the middle part can be significantly increased and the overall heat capacity improves by a factor of 2-3.

This buffer-effect depends on various parameters. These are carefully investigated throughout this theses. By using salt-ceramic, the energetic and exergetic efficiencies can be improved. After investigating the maximizing of heat capacity for a given storage volume, the possibility of reducing the volume up to 60% for a given heat capacity is examined. For a planned 250 MW unit, the energy density and the geometrical shape is optimized.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	3
Kurzfassung	4
Abstract.....	5
Inhaltsverzeichnis.....	6
Formelzeichen.....	8
1 Einleitung und Aufgabenstellung.....	11
2 Speicherung von Wärme bei hohen Temperaturen.....	13
2.1 Definitionen.....	13
2.1.1 Betriebsrandbedingungen.....	13
2.1.2 Speicherparameter.....	15
2.1.3 Nutzungs- und Wirkungsgrad-Definitionen.....	16
2.2 Speicherung von fühlbarer Wärme.....	18
2.2.1 Anwendungen im Bereich der Solarenergie.....	21
2.3 Speicherung von Latentwärme.....	22
2.4 Salz/Keramik in Hochtemperaturwärmespeichern.....	23
2.4.1 Geforderte Merkmale hier untersuchter Hochtemperaturwärmespeicher.....	24
2.4.2 Beschreibung des Salz/Keramik-Speichermaterials.....	25
2.4.3 Gleichzeitige Speicherung von fühlbarer und latenter Wärme.....	28
3 Berechnungsgrundlagen und Modellierung von Wärmespeichern mit Salz/Keramik-Speichermaterial.....	33
3.1 Bisherige theoretische Arbeiten.....	33
3.2 Finite-Differenzen-Verfahren und Diskretisierung.....	38
3.2.1 Beschreibung der Grundgeometrie.....	40
3.3 Modellierung der Wärmetransportvorgänge.....	42
3.3.1 Wärmeleitung im Speichermaterial.....	42
3.3.2 Wärmeübergang zwischen Wärmeträger und Speichermaterial.....	44
3.3.3 Beschreibung des Phasenwechsels.....	47
3.3.4 Wärmetransport durch Strahlung.....	49
3.3.5 Freie Konvektion im Speichermedium.....	50
3.4 Beschreibung des Rechenprogramms SPEICHER.....	52
3.4.1 Dateneingabe.....	52

3.4.2	Berechnungsverlauf.....	53
3.4.3	Datenausgabe.....	54
4	Validierung des Rechenprogramms	56
4.1	Beschreibung der Versuchsanlage und der durchgeführten Messungen	56
4.1.1	Fehlerbehaftete Meßgrößen und Unsicherheiten.....	58
4.1.2	Speicherung von fühlbarer Wärme (Versuch 1).....	61
4.1.3	Validierung der Einflüsse des Latentwärme-Materials (Versuch 2).....	63
5	Ergebnisse der Berechnungen	66
5.1	Temperaturverläufe in Hochtemperaturwärmespeichern für fühlbare Wärme	66
5.2	Temperaturverläufe in Wärmespeichern aus Salz/Keramik	73
5.3	Gezielte Beeinflussung der Temperaturverläufe durch geeignete Material- schichtung	75
5.4	Sensitivitätsanalyse zur Ausbildung von Pufferschichten	77
5.5	Einsatz von Salz/Keramik am Beispiel des PHOEBUS-Referenzspeichers.....	83
5.6	Beeinflussung der Wirkungs- und Nutzungsgrade.....	87
5.6.1	Einfluß auf den Gaswirkungsgrad.....	87
5.6.2	Einfluß auf den Speichernutzungsgrad.....	88
5.6.3	Einfluß auf den exergetischen Nutzungs- bzw. Wirkungsgrad.....	89
6	Wärmeübergang bei ortsveränderlichem Phasenwechsel	92
6.1	Wärmeübertragung beim Speicher für fühlbare Wärme	92
6.2	Wärmeübertragung mit Phasenwechsel	94
6.3	Übertragungsverhalten beim geschichteten Wärmespeicher	95
7	Optimierungsberechnungen	98
7.1	Optimierung des Füllfaktors	99
7.2	Optimierung des Strömungskanaldurchmessers und der Speichergeometrie.....	100
8	Zusammenfassung	104
9	Literaturverzeichnis	107
10	Anhang	110