

# **Ein Kies/Wasser-Wärmespeicher in Praxis und Theorie**

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

vorgelegt von  
**Rudolf Giebe**  
aus Pforzheim

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. E. Hahne  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. A.Voß  
Tag der Einreichung: 2. 12. 1988  
Tag der mündlichen Prüfung: 17. 4. 1989

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik  
der Universität Stuttgart

1989

Kurzfassung

Giebe, Rudolf:

**EIN KIES/WASSER-WÄRMESPEICHER IN PRAXIS UND THEORIE**

In dieser Arbeit werden Betriebsergebnisse eines künstlich angelegten unterirdischen Kies/Wasser-Wärmespeichers von 1050 m<sup>3</sup> Volumen und Rechnungen zum Wärmetransport in diesem Speicher vorgestellt. Er kann durch den Austausch des Wassers oder durch den Wärmeaustausch über acht Polyethylen-Rohrspiralen in der Kies/Wasser-Schüttung be- und entladen werden.

Nach der Fertigstellung des Speichers wurde sein thermisches Verhalten in zwei Kurzzeitzyklen untersucht; er wurde dabei mit Wärme vom Universitätsheizkraftwerk über den Austausch des Wassers auf Temperaturen von 30 °C und 50 °C aufgeladen. Bei den Aufladungen über die Dauer von 4 und 11 Tagen verlor der Speicher 18 % und 24 % der zugeführten Wärme. Beim ersten Versuch konnten in 17 Tagen 27 % und beim zweiten in 44 Tagen 50 % der zugeführten Wärme zur Beheizung des Institutsgebäudes genutzt werden.

Zwei Jahre wurde der Speicher als saisonaler Wärmespeicher im solar unterstützten Heizungssystem des Institutsgebäudes betrieben. Es lieferten 211 m<sup>2</sup> unverglaster Absorber Wärme in den Speicher, in der Heizperiode entlud ihn eine Wärmepumpe. Die Wärme wurde dem Speicher über die Polyethylenrohre zugeführt bzw. entnommen. Im Sommer stieg die Temperatur im Speicher bis auf ca. 33 °C an; sie fiel durch Wärmeverluste an die Umgebung und das Erdreich bis zum Heizbeginn auf 28 - 30 °C ab. Von diesen Verlusten wurden in beiden Jahren mehr als 50 % wieder zurückgewonnen. Das Verhältnis der entnommenen Wärme zur zugeführten Wärme war in beiden Jahren größer als 0,8.

Die Qualität des Speicherwassers wurde kontinuierlich überwacht, sie ist seit der Erstbefüllung erstaunlich gut. Die Baukosten des Speichers werden detailliert aufgeführt.

Die Rechnungen befassen sich mit dem Wärmetransport bei der Be- und Entladung über den Austausch des Speicherwassers und mit dem Wärmeübergang an den Polyethylenrohren in der wassergesättigten Kiesschüttung. Bei der Durchströmung des Kiesbetts beeinflussen der Volumenstrom, die Wärmeleitfähigkeit der wassergesättigten Kiesschüttung und die Dispersionslänge (Dispersivität) die Wärmeausbreitung im Speicher. Die Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Speichertemperaturen war für eine Dispersionslänge von 12 mm -das entspricht dem mittleren Durchmesser der Kiespartikel- am besten.

Das Buch ist im Verlag für Bauwissenschaften, Berlin, erschienen.

## INHALTSVERZEICHNIS

	<u>Seite:</u>
KURZFASSUNG	4
FORMELZEICHEN	8
<u>1 EINLEITUNG</u>	11
1.1 Entstehungsgeschichte des Pilotprojektes	14
1.2 Untersuchungsschwerpunkte	15
<u>2 LITERATURÜBERBLICK</u>	17
2.1 Studien	17
2.2 Experimentelle Untersuchungen	19
2.3 Theoretische Untersuchungen, Rechenprogramme	21
2.4 Wärme- und Stofftransport in wassergesättigten porösen Medien	22
<u>3 BAU DES SPEICHERS</u>	29
3.1 Vorbereitungen für die meßtechnische Ausstattung	29
3.2 Bautechnik des Speichers	29
3.3 Bauphase und zeitlicher Ablauf	34
3.4 Belade- und Entladeeinrichtungen	36
3.4.1 Wasseraustauschsystem Ringverteiler-Druckkammer (System I)	36
3.4.2 Wasseraustauschsystem Sternverteiler (System II)	37
3.4.3 Wärmeaustauscher-Rohrspiralen (System III)	39
3.5 Kosten	40
<u>4 EINBINDUNG IN DAS HEIZUNGSSYSTEM</u>	44
<u>5 MESSTECHNISCHE AUSSTATTUNG</u>	46
5.1 Meßstellen	46
5.1.1 Temperaturmeßstellen im Speicher und Erdreich	47
5.1.2 Wärmestrommeßstellen	52

	<u>Seite:</u>
5.1.3 Temperaturmeßstellen in den Belade- und Entladekreisläufen	53
5.1.4 Wasserstandsmessung, Wasserentnahme und sonstige Messungen	53
5.2 Datenerfassung	54
5.3 Meßstrategie	54
5.4 Meßfehler	55
 <u>6 KURZZEITVERSUCHE</u>	 57
 <u>7 LANGZEITWÄRMESPEICHERUNG</u>	 63
7.1 Ziel der Langzeitspeicherzyklen	63
7.2 Regelstrategie	63
7.3 Ergebnisse	64
7.3.1 Wärmebilanzen	64
7.3.2 Wärmeverluste an den Begrenzungsflächen des Speichers	68
7.3.3 Temperaturverteilungen im Speicher und Erdreich	71
7.3.3.1 Zweidimensionaler Temperaturverlauf in drei Meßrichtungen	71
7.3.3.2 Vergleich der Temperaturen in den Jahreszyklen	76
7.3.3.3 Temperatúrausgleich nach Beladung	78
7.3.4 Wasserverluste des Speichers	80
7.3.5 Wasserqualität	81
 <u>8 VERSUCHE ZUR BESTIMMUNG DES ÄUSSEREN WÄRMEÜBERGANGS BEI DER BE- UND ENTLADUNG ÜBER ROHRSPIRALEN</u>	 84
8.1 Ziel und Ablauf der Versuche	84
8.2 Versuchsparameter	85
8.3 Grenzen bei der Versuchsdurchführung	85
 <u>9 DETAILUNTERSUCHUNGEN</u>	 87
9.1 Stoffwerte des Speichermediums	87
9.1.1 Zusammensetzung der Kiespartikel	87
9.1.2 Stoffwerte der Kiesbestandteile	87
9.1.3 Stoffwerte der Kiespartikel	89
9.1.4 Stoffwerte der Kies/Wasser-Schüttung	93

	<u>Seite:</u>
9.1.4.1 Dichte	94
9.1.4.2 Spezifische Wärmekapazität	94
9.1.4.3 Wärmeleitfähigkeit	95
9.2 Das Erdreich in Speicherumgebung	95
9.2.1 Dichte und Wassergehalt	97
9.2.2 Spezifische Wärmekapazität	97
9.2.3 Wärmeleitfähigkeit	98
9.3 Theoretische Betrachtungen zur thermischen Be- und Entladung des Speichers durch Austausch des Wassers	101
9.3.1 Wärmetransport in wassergesättigten porösen Schüttungen	101
9.3.1.1 Dispersion	101
9.3.1.2 Effektive Wärmeleitfähigkeit	103
9.4 Berechnungen zur thermischen Be- und Entladung des Speichers durch Wasseraustausch	106
9.4.1 Das SST-Rechenprogramm	106
9.4.2 Validierung des Programms mit Meßdaten	111
9.4.2.1 Eingabeparameter	111
9.4.2.2 Ergebnisse	114
9.4.2.3 Einfluß der Rechenparameter auf das Ergebnis	119
<b><u>10 DER WÄRMEÜBERGANG BEI BE- UND ENTLADUNG ÜBER ROHRSPIRALEN</u></b>	<b>126</b>
10.1 Berechnung von Wärmeübergang und Wärmedurchgang	127
10.1.1 Äußerer Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_a$	127
10.1.2 Innerer Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_i$	131
10.1.3 Wärmedurchgangskoeffizient und Berechnungsverfahren	132
10.1.4 Speichertemperatur entlang der Rohrspirale	133
10.2 Rechenprogramm ALFA	135
10.2.1 Eingabeparameter	136
10.2.2 Programmablauf und Ausgabe	137
10.3 Ergebnisse und Vergleich mit Messungen	139
10.4 Parametereinfluß auf das Ergebnis	143
10.5 Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_a$ für unterschiedliche Betriebsparameter	152
<b><u>11 ZUSAMMENFASSUNG</u></b>	<b>159</b>
<b><u>12 LITERATUR</u></b>	<b>163</b>