

**Freie Konvektion
am horizontalen Rohr in einer
Kies/Wasser-Schüttung mit
Bildung und Schmelzen von Eis**

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

vorgelegt von

Dieter Streit
aus Schwäbisch Gmünd

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. E. Hahne
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. K. Stephan
Tag der mündlichen Prüfung: 13.11.1996

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik
der Universität Stuttgart

1996

Zusammenfassung

Künstliche Kies/Wasser-Wärmespeicher können zur saisonalen Speicherung von solar erzeugter Wärmeenergie dienen. Auch eine kombinierte Wärme- und Kältespeicherung mit einer teilweisen Vereisung der Speicherbefüllung ist möglich.

Kies/Wasser-Wärmespeicher werden oft über horizontal verlegte Wärmeübertragerrohre be- und entladen. Um einen solchen Speicher dimensionieren zu können, ist unter anderem die Kenntnis des äußeren Wärmeübergangskoeffizienten an den Rohren nötig. Insbesondere das Verhalten des Wärmeübergangskoeffizienten bei Speichertemperaturen zwischen 0 und 25°C, mit Bildung bzw. Schmelzen des Eises, ist hier von Interesse.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden ausführliche Experimente zur Messung des äußeren Wärmeübergangskoeffizienten α_s an den Rohren durchgeführt. Dabei war weniger der Zusammenhang zwischen α_s und dem (Langzeit-)Speicherverhalten von Interesse, als vielmehr eine anwendungsbezogene Darstellung der Meßergebnisse und die Messung von α_s unter möglichst genau bekannten Randbedingungen.

Dazu wurde ein Modellspeicher mit einer wassergesättigten Kiesschüttung befüllt. Der Kies besaß eine Korngrößenverteilung von 8-16 mm und hatte die selben Materialeigenschaften wie die Kiesfüllung eines 1050 m³ fassenden „Aquifer“-Pilotspeichers am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart.

In dem Modellspeicher wurden zur thermischen Be- und Entladung horizontale Wärmeübertragerrohre aus Messing installiert. Die Messungen des äußeren Wärmeübergangskoeffizienten an diesen Rohren wurden auch mit Bildung und Schmelzen von Eis durchgeführt. Zur Bestimmung der Dicke bzw. des Volumens der vereisten Schicht wurden zwei Meßvorrichtungen entwickelt, welche den Unterschied in der elektrischen Leitfähigkeit zwischen Eis und Wasser (bzw. Luft und Wasser) ausnützen. Die erste Vorrichtung (GELATOMETER) wurde in Form von 11 radial von der Längsachse der Wärmeaustauscherrohre ausgehenden Sensorröhrchen realisiert. Die zweite Vorrichtung (PEGLOMETER) maß die Änderung des Wasserpegels in einem Ausgleichsgefäß auf dem Deckel des Modellspeichers.

Es wurden detaillierte Messungen zur Bestimmung des äußeren Wärmeübergangskoeffizienten beim Heizen und Kühlen des Modellspeichers mit verschiedenen Wärmeübertrager-Eintrittstemperaturen vorgenommen. Zuerst wurden Untersuchungen mit einer Befüllung des Modellspeichers aus Wasser durchgeführt. Hierbei konnte das Wachstum der Eisschicht an den Rohren und die Funktion der Meßvorrichtungen optisch kontrolliert werden. Im zweiten Teil der Experimente wurden die Messungen an der Kies/Wasser-Schüttung durchgeführt.

Anhand der Experimente stellte sich heraus, daß die aus den gemessenen Wärmeübergangskoeffizienten gebildeten Nusselt-Zahlen (Nu) nicht mit den in der Literatur vorgeschlagenen Rayleigh-Zahlen (Ra) korreliert werden können (sowohl für Wasser allein, als auch für Kies/Wasser). Der Grund liegt darin, daß Wasser im untersuchten Temperaturbereich ein Dichtemaximum (bei 3,98°C) besitzt. Tritt diese Temperatur in der Grenzschicht der Konvektionsströmung am Rohr auf, so kehrt sich die Richtung der Konvektionsströmung um. Während dieser Richtungsumkehr ist die Konvektion wesentlich schwächer ausgeprägt und geht mit einem Minimum des Wärmeübergangskoeffizienten einher.

Nach theoretischen Überlegungen konnte die Existenz des Dichtemaximums in einem mathematischen Ausdruck berücksichtigt werden, und so wurde eine modifizierte Rayleigh-Zahl Ra^* für Wasser:

$$Ra^* = \frac{gD^3}{\nu a} \cdot |\beta_2(\vartheta_W - \vartheta_\infty) [(b\vartheta^* - c\vartheta_W) + (b\vartheta^* - \vartheta_\infty)]|$$

und eine sog. Darcy-Inversions-Rayleigh-Zahl Ra_D^* für Kies/Wasser:

$$Ra_D^* = \frac{gKD}{\nu a} \cdot |\beta_2(\vartheta_W - \vartheta_\infty) [(b\vartheta^* - c\vartheta_W) + (b\vartheta^* - \vartheta_\infty)]|$$

definiert. Hierbei ist ϑ^* die Temperatur, an der das Dichtemaximum von Wasser auftritt. Die Faktoren b und c wurden empirisch in die Gleichungen eingebracht, um eine optimale Anpassung an die Messdaten zu erreichen. Es ergaben sich für Wasser allein und für Kies/Wasser dieselben Werte für diese Faktoren, nämlich:

$$b = 0,725 \qquad c = 0,6 \qquad (0.1)$$

Während der Richtungsumkehr der Konvektionsströmung durchläuft das Auftriebsglied (Term zwischen den Betragsstrichen) in Ra^* und Ra_D^* den Wert Null, für die modifizierten Rayleigh-Zahlen wird daher ein Minimum gemessen. Durch das Einführen von Ra^* und Ra_D^* konnten die Meßdaten so transformiert werden, daß das Minimum der Nusselt-Zahl mit dem Minimum der modifizierten Rayleigh-Zahl zusammenfällt.

Die Eisschicht am Wärmeübertragerrohr wurde ebenfalls berücksichtigt, indem im Falle der Eisbildung als charakteristische Überströmlänge l nicht mehr der Rohrdurchmesser, sondern der Durchmesser des Eiszylinders um das Rohr eingesetzt wurde. Dabei war zu beachten, daß die Temperatur an der Phasengrenze zwischen Eis und Wasser konstant 0°C beträgt.

Es konnten neue Korrelationsgleichungen für den Wärmeübergangskoeffizienten an horizontalen Rohren in Wasser allein und in der Kies/Wasser-Schüttung im untersuchten Temperaturbereich, mit Berücksichtigung der Richtungsumkehr der Konvektionsströmung, vorgeschlagen werden. Die neue Korrelation für Wasser lautet:

$$Nu = 5,73 + 0,012 Ra^{*0,5}$$

Diese Gleichung gibt die gemessenen Daten für $50 \leq Ra^* \leq 2,3 \cdot 10^6$ bis auf eine mittlere Abweichung von $\pm 11\%$ wieder. Die neue Korrelationsgleichung für die Kies/Wasser-Schüttung lautet:

$$Nu = 0,95 + 0,09 Ra_D^{*0,86}$$

Sie ist im Bereich $0,09 \leq Ra_D^* \leq 150$ durch die Meßdaten verifiziert und gibt diese mit einer mittleren Abweichung von $\pm 23\%$ wieder.

Die neuen Korrelationsgleichungen wurden in das Computer-Programm „STOSIM“ eingearbeitet. Damit konnten Größen wie Rohrwandtemperatur, Kühl- bzw. Heizleistung und zeitliche Änderung der Eisdicke bzw. des Eisvolumens in Abhängigkeit von der Rohreintrittstemperatur berechnet werden.

Als zeitabhängige Vorgänge waren für diese Arbeit nur das Wachstum bzw. die Abnahme der Eisschicht von Interesse. Die Meßwerte zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffi-

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Zusammenfassung | 1 |
| Inhaltsverzeichnis | 3 |
| Formelzeichen | 6 |
| 1 Einleitung | 9 |
| 2 Aufbau des Modellspeichers | 11 |
| 2.1 Versuchsaufbau | 11 |
| 2.1.1 Modellspeicher | 11 |
| 2.1.2 Temperaturmessung | 14 |
| 2.1.3 Kreislauf des Wärmeträgerfluids | 16 |
| 2.1.4 Methoden zur Bestimmung der Eisdicke bzw. des Eisvolumens | 17 |
| 2.1.4.1 Gelatometer | 18 |
| 2.1.4.2 Peglometer | 19 |
| 2.2 Wärmedämmung des Modellspeichers | 21 |
| 2.3 Innerer Wärmeübergangskoeffizient | 21 |
| 2.4 Versuchsdurchführung | 22 |
| 3 Wärmetransport durch freie Konvektion | 25 |
| 3.1 Grashof- und Rayleigh-Zahl | 25 |
| 3.2 Nusselt-Zahl | 29 |
| 3.3 Richtungsumkehr der Konvektionsströmung | 32 |
| 4 Wärmetransport in porösen Medien | 38 |
| 4.1 Strömung durch ein poröses Medium | 38 |
| 4.2 Freie Konvektion in porösen Medien | 42 |
| 4.2.1 Wärmeübergangsbeziehungen nach Fand, Steinberger, Cheng | 43 |
| 4.2.2 Stoffwert-Bezugstemperatur | 44 |
| 4.3 Berücksichtigung der Strömungsumkehr | 44 |
| 4.4 Stoffwerte des Speichermediums | 45 |
| 4.4.1 Zusammensetzung des Kieses | 45 |
| 4.4.2 Porosität (Hohlraumanteil) | 46 |
| 4.4.2.1 Wandkorrigierte Porosität | 47 |
| 4.4.3 Permeabilität | 47 |
| 4.4.4 Dichte | 48 |
| 4.4.4.1 Dichte der Kies/Wasser-Schüttung | 48 |
| 4.4.4.2 Dichte der vereisten Kies/Wasser-Schüttung | 49 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.4.5.1 | Spezifische Wärmekapazität der Kies/Wasser-Schüttung | 49 |
| 4.4.5.2 | Spezifische Wärmekapazität der vereisten Schüttung | 50 |
| 4.4.6 | Wärmeleitfähigkeit | 50 |
| 4.4.6.1 | Wärmeleitfähigkeit der Kies/Wasser-Schüttung | 52 |
| 4.4.6.2 | Wärmeleitfähigkeit der vereisten Kies/Wasser-Schüttung | 52 |
| 4.4.6.3 | Messung der Wärmeleitfähigkeit mit der Plattenapparatur | 53 |
| 4.4.6.4 | Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit | 56 |
| 5 | Erstarrungs- und Schmelzvorgang in der Kies/Wasser-Schicht | 58 |
| 5.1 | Eisbildung in der Kies/Wasser-Schicht | 59 |
| 5.1.1 | Konvektionsparameter | 62 |
| 5.1.2 | Rohrwandtemperatur und Wärmeleistung | 64 |
| 5.1.3 | Berücksichtigung der zeitlichen Änderung von ϑ_{∞} | 67 |
| 5.2 | Schmelzen des Eises in der Schüttung | 68 |
| 5.2.1 | Mathematisches Modell | 74 |
| 5.3 | Numerische Berechnungen mit dem Programm „STOSIM“ | 78 |
| 6 | Ergebnisse der Versuche mit Wasser allein | 80 |
| 6.1 | Temperaturschichtung im Modellspeicher | 80 |
| 6.2 | Kühlen des Modellspeichers - Eisbildung | 82 |
| 6.2.1 | Temperatur ϑ_{∞} und Wandtemperatur | 82 |
| 6.2.2 | Treibende Temperaturdifferenz und entzogene Wärmeleistung beim Kühlen | 84 |
| 6.2.3 | Messung der Eisdicke | 85 |
| 6.2.4 | Der äußere Wärmeübergangskoeffizient beim Kühlen | 87 |
| 6.3 | Heizen des Modellspeichers - Schmelzen von Eis | 89 |
| 6.3.1 | Temperatur ϑ_{∞} und Rohrwandtemperatur beim Heizen | 89 |
| 6.3.2 | Treibende Temperaturdifferenz und Heizleistung | 92 |
| 6.3.3 | Äußerer Wärmeübergangskoeffizient beim Heizen | 94 |
| 6.3.4 | Messung des Eisvolumens | 96 |
| 6.4 | Die neue Korrelation Nu/Ra^* | 97 |
| 7 | Ergebnisse der Versuche mit der Kies/Wasser-Schüttung | 100 |
| 7.1 | Temperaturschichtung im Modellspeicher | 100 |
| 7.2 | Meßergebnisse beim Kühlen - ohne Eisbildung | 102 |
| 7.2.1 | Temperatur ϑ_{∞} und Wandtemperatur | 102 |
| 7.2.2 | Treibende Temperaturdifferenz und entzogene Wärmeleistung | 102 |
| 7.2.3 | Äußerer Wärmeübergangskoeffizient | 105 |
| 7.3 | Meßergebnisse mit Eisbildung - die Eisdicke | 106 |
| 7.3.1 | Äußerer Wärmeübergangskoeffizient mit Eisbildung | 108 |
| 7.4 | Meßergebnisse beim Heizen - ohne Tauen | 109 |
| 7.4.1 | Temperatur außerhalb der Strömungsgrenzschicht und Wandtemperatur | 109 |
| 7.4.2 | Die treibende Temperaturdifferenz | 111 |
| 7.4.3 | Zugeführte Wärmeleistung | 111 |
| 7.4.4 | Äußerer Wärmeübergangskoeffizient | 112 |
| 7.5 | Meßergebnisse beim Tauen der Schüttung | |

| | | |
|----------|--|------------|
| 7.5.1 | Volumen der getauten Schüttung | 114 |
| 7.5.2 | Rohrwandtemperatur und Heizleistung während des Tautvorgangs | 116 |
| 7.5.3 | Wärmeübergangskoeffizient während des Tautvorgangs | 118 |
| 7.6 | Vergleich der Meßdaten mit den Korrelationsgleichungen von Fand et al. | 119 |
| 7.7 | Darcy-Inversions-Rayleigh-Zahl | 121 |
| 7.7.1 | Die neue Korrelation Nu/Ra_D^* | 122 |
| 8 | Numerische Berechnungen | 125 |
| 8.1 | Numerische Berechnungen zum Kühlen des Modellspeichers | 125 |
| 8.1.1 | Kühlleistung und Wandtemperatur des Wärmeübertragerrohres | 126 |
| 8.1.2 | Zeitliche Zunahme der Eisdicke | 128 |
| 8.2 | Numerische Berechnungen zum Heizen des Modellspeichers | 130 |
| 8.2.1 | Kühlleistung und Wandtemperatur des Wärmeübertragerrohres | 130 |
| 8.2.2 | Zeitliche Zunahme des getauten Volumens | 131 |
| 9 | Fehlerrechnung und abschließende Bewertungen | 133 |
| 9.1 | Fehler beim Wärmeübergangskoeffizienten | 133 |
| 9.2 | Weitere Fehlerquellen | 135 |
| 9.3 | Ausblick | 137 |
| | Literaturverzeichnis | 138 |