



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Berechnung des thermischen Verhaltens von Kies-Wasser-Speichern

Von der Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Chemnitz

genehmigte Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt

von Dipl.-Ing. Thorsten Urbaneck
geboren am 29. April 1969 in Karl-Marx-Stadt

eingereicht am 22. September 2003

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Platzer

Prof. Dr.-Ing. habil. Karl-Heinrich Baumann

Prof. Dr. techn. Wolfgang Streicher

Chemnitz, den 05. April 2004

Urbaneck, Thorsten

Berechnung des thermischen Verhaltens von Kies-Wasser-Speichern

Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz, Professur Technische Thermodynamik, Chemnitz

- Seitenzahl: 219
- Anzahl der Abbildungen: 145
- Anzahl der Tabellen: 53
- Anzahl der Literaturzitate: 143

Referat

Die Berechnung des thermischen Verhaltens von Kies-Wasser-Speichern mit direkter Beladung spielt bei der Planung und Überwachung derartiger Speicher eine wichtige Rolle. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Modell für die Berechnung des Wärmeübergangs und Stofftransportes entwickelt. Das Modell beinhaltet die Massenerhaltungsgleichung, die Energieerhaltungsgleichung für die flüssige und feste Phase und die Impulserhaltung. Berücksichtigt wurde auch der Wärmeübergang an der Erdoberfläche und vom Speicher ins umgebende Erdreich sowie die Be- und Entladung des Speichers. Für die Implementierung dieses Modells in CFX 4.4, einem kommerziellen Programmpaket, waren spezielle Anpassungen bzw. Erweiterungen notwendig. Die Parameter zur Beschreibung des vorliegenden Speicherbaumaterials stammen nur zum Teil aus der Literatur. Eigene Untersuchungen lieferten Werte für die Porosität, die Gesteinsdichten und den mittleren Partikeldurchmesser. Außerdem stand die Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit des gegebenen Kies-Wasser-Stoffsystems im Mittelpunkt der experimentellen Arbeiten. Die dafür in einer Versuchsanordnung gewonnenen Ergebnisse dienten ebenfalls zur Überprüfung des aufgestellten Berechnungsmodells. Durch die Nachrechnung konnte die modellseitige Abbildung der instationären Wärmeleitung bestätigt werden. Weitere Validierungsrechnungen für die erzwungene und freie Konvektion lieferten Aussagen zur Genauigkeit, zum Modellverhalten und zu numerischen Effekten. Die Berechnungen des thermischen Verhaltens eines 8000 m³ Kies-Wasser-Speichers beziehen sich auf das Projekt „Solar unterstützte Nahwärmeversorgung – solarisPark Chemnitz“ des Forschungs- und Demonstrationsprogramms Solarthermie 2000. Meß- und Berechnungsergebnisse fließen in die Auswertung ein. Ergebnisse liegen für verschiedene Temperatur- und Strömungsfelder sowie für den Energieverlust des Speichers vor. Messungen und Berechnungen tragen gleichermaßen zur Erforschung und Auswertung des thermischen Speicherverhaltes bei.

Schlagwörter

- thermische Speicher
- saisonale Wärmespeicherung
- Wärmeübertragung
- Strömung
- Schüttung
- Kies
- Stoffwert
- Modell
- Simulation
- Computational Fluid Dynamics

Vorwort

Diese Arbeit entstand an der Professur Technische Thermodynamik der Technischen Universität Chemnitz. Ich möchte mich bei allen bedanken, die zu dieser Arbeit beigetragen haben.

Ich danke

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. B. Platzer von der Technischen Universität Chemnitz für seine intensive wissenschaftliche Betreuung, die zahlreichen, interessanten Diskussionen und die hilfreichen Ratschläge,

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. K.-H. Baumann von der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg und Herrn Prof. Dr. techn. W. Streicher von der Technischen Universität Graz für die Übernahme der Gutachten,

Herrn Dr.-Ing. U. Schirmer und Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Herwig für die Schaffung der optimalen Bedingungen an der Professur Technische Thermodynamik,

Herrn Dr. V. Lottner vom Projektträger Jülich und den zuständigen Mitarbeitern für die Unterstützung des zugrundeliegenden Vorhabens (Förderkennzeichen 0329606 G/F/O/P), welches mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit sowie des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit innerhalb des Forschungs- und Demonstrationsprogramms Solarthermie 2000 gefördert wurde,

Herrn Dipl.-Ing. G. Aßmann und Herrn Dipl.-Ing. D. Gerbeth für die engagierte Durchführung der Experimente in ihrer Diplom- und Projektarbeit,

den Mitarbeitern der Professur Technische Thermodynamik und

vor allem meiner Familie, die mich stets unterstützt hat.

Chemnitz, den 22.09.2003

Thorsten Urbaneck

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	vi
1 Einleitung	1
1.1 Situation	1
1.2 Stand der Technik	1
1.2.1 Solar unterstützte Nahwärmesysteme	1
1.2.2 Kies-Wasser-Speicher	5
1.3 Stand der Modellierung	9
1.4 Präzisierte Aufgabenstellung	12
2 Modell	15
2.1 Kies-Wasser-Stoffsystem	15
2.1.1 Überblick zur Modellentwicklung	15
2.1.2 Schüttungseigenschaften	17
2.1.3 Strömung	21
2.1.4 Wärmeübergang im Stoffsystem	28
2.1.5 Dispersion	37
2.1.6 Grundgleichungen	41
2.2 Speicherrandgebiet und -umgebung	45
2.2.1 Erdreich, Wärmedämmung	45
2.2.2 Erdoberfläche	46
2.3 Implementierung	47
2.3.1 Allgemeine Optionen	47
2.3.2 Zweiphasiges Modell	47
2.3.3 Strömung	51
2.3.4 Spezifische Anpassungen	52
3 Parameter	53
3.1 Übersicht zu untersuchten Kiesschüttungen	53
3.2 Komponentenorientierte Untersuchungen des Kies-Wasser-Stoffsystems	57
3.2.1 Wasser	57
3.2.2 Kiespartikel	58
3.3 Schüttungsorientierte Untersuchungen des Kies-Wasser-Stoffsystems	62
3.3.1 Schüttung	62
3.3.2 Effektive Wärmeleitfähigkeit	65
3.4 Begrenzungsfläche und Umgebung des Speichers	69
3.4.1 Wärmedämmung	69
3.4.2 Wärmeübergang im Erdreich	70
3.4.3 Wärmeübergang an der Erdoberfläche	73

4	Validierung	75
4.1	Wärmeleitung	76
4.2	Eindimensionale, erzwungene Konvektion mit instationärem Temperaturfeld	82
4.3	Zweidimensionale Bernard-Rayleigh-Konvektion	86
5	Untersuchung des Chemnitzer Kies-Wasser-Speichers	93
5.1	Meßtechnische Überwachung	93
5.2	Berechnungen zur Voruntersuchung	96
5.3	Auswertungsmethode	99
5.4	Ergebnisse	104
5.4.1	Diskussion zu Fehlerquellen	104
5.4.2	Temperaturverlauf	105
5.4.3	Vertikale Temperaturprofile	109
5.4.4	Be- und Entladeverhalten	110
5.4.5	Einfluß der räumlichen Diskretisierung	157
5.4.6	Vergleich von ein- und zweiphasiger Berechnung	163
5.4.7	Bilanzierung des Speichers	164
5.4.8	Verteilung der Verlustwärmeströme im Modell	168
5.4.9	Parameterstudie zur effektiven Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung	170
6	Zusammenfassung	179
7	Literaturverzeichnis	183
A 1	Energieerhaltung	191
A 2	Wärmeleitfähigkeitsversuchsstand	194
A 3	Behandlung der konvektiven Terme in CFX 4.4	196
A 4	Ergebnisse zum Speicherverhalten	198
A 4.1	Meßergebnisse	198
A 4.2	Berechnungsergebnisse	201
	Erklärung	204
	Lebenslauf	205