

Berechnung von Kies-Wasser-Speichern

Thorsten Urbaneck*, Bernd Platzer**, Ulrich Schirmer***

Technische Universität Chemnitz

* Professur Technische Thermodynamik, Projektgruppe Solarthermie, 09107 Chemnitz, Tel.: 0371/531-2463, Fax: -2349, E-Mail: thorsten.urbaneck@mb3.tu-chemnitz.de, Internet: <http://www.tu-chemnitz.de/mbv/SolTherm>

** Professur Chemische Verfahrenstechnik, Tel.: 0371/531-2501, Fax: 0371/531-3783, E-Mail: bernd.platzer@mbv.tu-chemnitz.de, Internet: <http://www.tu-chemnitz.de/mbv/>

*** Professur Technische Thermodynamik, Projektgruppe Solarthermie, 09107 Chemnitz, Tel.: 0371/531-2546, Fax: -2349, E-Mail: ulrich.schirmer@hrz.tu-chemnitz.de, Internet: <http://www.solarthermie2000.de>

Motivation

Saisonale Wärmespeicherung ist ein Schlüsselverfahren zur Substitution fossiler Energieträger und zur Reduktion der damit verbundenen Umweltbelastung. An diese Speicher, die im Rahmen des Forschungs- und Demonstrationsprogramms Solarthermie 2000 [1, 2] intensiv untersucht werden, stellt man hohe Anforderungen. So sind die geplanten Be- und Entladeleistung sowie die prognostizierten Verluste einzuhalten, aber auch eine lange Nutzungsdauer soll erreicht werden.

Schon auf Grund der hohen Investition ist die modellseitige Untersuchung der Funktionsweise der Speicher sinnvoll und notwendig. Gleichzeitig können dabei neue Erkenntnisse gesammelt werden, die zu einer Kostenreduktion bei zukünftigen Projekten führen. Die Ziele der vorgestellten Arbeit sind die Weiterentwicklung der Modellierung von Kies-Wasser-Speichern und die Untersuchung des realen Speicherhaltens, da Meßwerte allein nicht ausreichen, um zu bestimmen, wie gut ein Speicher funktioniert.

Ist-Stand

Im Rahmen des Forschungs- und Demonstrationsprogramms Solarthermie 2000 wird das solar unterstützte Nahwärmesystem im Chemnitzer „solarisPark“ vermessen. Zum Meßprogramm zählt auch die Beobachtung und Bewertung des zum Nahwärmesystem gehörigen 8000 m³ Kies-Wasser-Speichers [1, 2]. Gemessen werden 20 Temperaturen im Speicher und 10 Temperaturen an der Speicherwand. Zur Wärmestrombestimmung der Be- und Entladung sind außerdem ein Volumenstrommeßgerät und mehrere Temperaturmeßstellen zwischen dem Speicher und dem Nahwärmesystem vorhanden.

Mit Hilfe dieser Meßwerte kann die Berechnung des Speicherzustandes vereinfacht über die Mittelung der Speichertemperaturen bzw. eine Verlustbestimmung erfolgen. Aus diesen Meßwerten kann jedoch nicht

- das detaillierte Temperaturfeld im Speicher und seiner Umgebung,

- das Strömungsfeld,
 - die Funktionsweise der Be- und Entladeeinrichtung und
 - als inverse Aufgabenstellungen z.B. das Isolationsvermögen
- ermittelt werden. Will man also mehr über die tatsächliche Funktionsweise des Speichers wissen, erweist sich die Verwendung von Modellen als notwendig. Dominierend im Bereich der Anlagensimulationsprogramme sind die Schichtenmodelle wie z.B. das am weitesten entwickelte Modell ICEPIT von HORNBERGER [3] (unter TRNSYS TYPE 143 [4]). Als Modelle, die die Druck-Geschwindigkeits-Gleichung lösen, sind nur die Arbeiten von DANIELS und Mitarbeiter [5] zu nennen. Sie nutzten einen selbst entwickelten und speziellen Programmcode auf der Basis der Finiten-Elemente-Methode. Dieses Programm ist nicht frei verfügbar und wurde bisher nur von den Autoren eingesetzt.

Das an dieser Stelle vorgestellte Modell, basiert auf dem mit Unterprogrammen erweiterten CFX 4.3 [6] (Meshbuild, Solver CFX 4.3, View, User Fortran). Zur Implementierung der Wärmeübertragung standen die Unterprogramme (User Fortran) von HOYAL (AEA Technology, Otterdingen) zur Verfügung. Die Berechnung der Strömung in porösen Stoffsystemen ist mit CFX 4.3 standardmäßig nur isotherm möglich. Diese Routinen mußten deshalb wesentlich verändert und angepaßt werden.

Ansatz und Modell

Speichergebiet

Im Mittelpunkt steht die Modellierung der physikalischen Vorgänge im Speicherinneren, wobei verschiedene Betrachtungsweisen, Ansätze und daraus folgende Umsetzungsmöglichkeiten bestehen.

Das Stoffsystem setzt sich aus einer flüssigen und festen Phase zusammen. Die feste Phase besteht aus vielen, nahezu runden und ortsfesten Partikeln (Kies) und bildet eine Feststoffmatrix (Kiesschüttung). Der verbleibende Raum wird von der beweglichen flüssigen Phase (Wasser) eingenommen. Hier wird durch das Einführen eines repräsentativen Elementarvolumens (REV) [7, 8], welches viele Partikel enthalten muß, die Möglichkeit genutzt, die reale Struktur des Stoffsystems modellseitig auszublenken. Die abgeleiteten, effektiven Eigenschaften und Zusammenhänge des REV's können auf ein differentiell kleines und ortsfestes Kontrollvolumen (KV) übertragen werden, um die Aufstellung der Erhaltungs- und Übertragungsgleichungen mit Hilfe der Eulerschen Betrachtungsweise zu ermöglichen. Das poröse Stoffsystem wird demzufolge als Kontinuum angesehen.

Wichtige Annahmen sind, daß beide Phasen stofflich inert und die Stoffeigenschaften richtungsunabhängig sind. Die Flächenporosität (Versperrungsgrad) an der jeweiligen Begrenzungsfläche des REV's sei gleich der Volumenporosität im REV.

Zur Beschreibung der Strömung im REV kommt eine gemittelte Fluidgeschwindigkeit zur Anwendung. Unter der Annahme, daß die Dichte der jeweiligen Phase konstant ist, läßt sich folgende Massenerhaltung für die flüssige Phase im KV formulieren:

$$\frac{\partial(\mathbf{e}r_{\beta}w_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial(\mathbf{e}r_{\beta}w_2)}{\partial x_2} + \frac{\partial(\mathbf{e}r_{\beta}w_3)}{\partial x_3} = 0 \quad (1)$$

Im Gegensatz zu vielen Modellen, die aus der Literatur bekannt sind, wird der Wärmeübergang im Stoffsystem zweiphasig berechnet. Damit beschreiben zwei repräsen-

tative Temperaturen den thermischen Zustand. Zur Berechnung der Temperatur der flüssigen Phase wird die Standard-Energiegleichung in CFX 4.3 genutzt. Für die Temperatur der festen Phase und den Wärmeübergang zwischen beiden Phasen im REV werden zusätzliche Variablen (User Skalar in CFX 4.3) verwendet.

Energiebilanz der flüssigen Phase im KV:

$$\mathbf{r}_{fl} \mathbf{e} c_{fl} \frac{\partial T_{KV,fl}}{\partial t} = \mathbf{l}_{eff,fl} \mathbf{e} \left(\frac{\partial^2 T_{fl,1}}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 T_{fl,2}}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 T_{fl,3}}{\partial x_3^2} \right) - \mathbf{r}_{fl} \mathbf{e} c_{fl} \left(w_1 \frac{\partial T_{fl,1}}{\partial x_1} + w_2 \frac{\partial T_{fl,2}}{\partial x_2} + w_3 \frac{\partial T_{fl,3}}{\partial x_3} \right) - \dot{q}_{fl,so} \quad (2)$$

Energiebilanz der feste Phase im KV:

$$\mathbf{r}_{so} (1 - \mathbf{e}) c_{so} \frac{\partial T_{KV,so}}{\partial t} = \mathbf{l}_{eff,so} (1 - \mathbf{e}) \left(\frac{\partial^2 T_{so,1}}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 T_{so,2}}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 T_{so,3}}{\partial x_3^2} \right) + \dot{q}_{fl,so} \quad (3)$$

In Abhängigkeit der Struktur des porösen Stoffsystems erfolgt für jede Phase die Zuordnung der effektiven Wärmeleitfähigkeit (siehe unten). Hier wird die effektive Wärmeleitung allein der flüssigen Phase zugeordnet. Diese abstrakte Zuordnung ist mit der Einführung des REV's und dem unten beschriebenen Wärmeübergang zwischen beiden Phasen möglich. Damit werden die komplexen Wärmeübergangssphänomene [8] und die typisch kapazitive Eigenschaft der festen Phase abgebildet.

$$\mathbf{l}_{eff,fl} = \frac{\mathbf{l}_{eff}}{\mathbf{e}} \quad (4)$$

$$\mathbf{l}_{eff,so} = 0 \quad (5)$$

Bei zweiphasigen Modellen muß der Wärmeübergang zwischen beiden Phasen modelliert werden, der in diesem Fall an einem Fluid-Partikel-Modell hergeleitet wurde. Dieser Wärmeübergang ist von der Porosität, dem gemittelten Partikeldurchmesser bzw. von der inneren Oberfläche abhängig. Ist keine Strömung vorhanden, findet ausschließlich Wärmeleitung statt. Mit beginnender Konvektion steigt das Wärmeübertragungsvermögen stark.

Wärmeübergang zwischen beiden Phasen im KV:

$$\dot{q}_{fl,so} = \left(\frac{(KA)_{fl,so}}{V} \right)_{REV} (T_{KV,fl} - T_{KV,so}) \quad (6)$$

Das Wärmeübergangsvermögen (in W/(m³K)) kann für das vorliegende Kies-Wasser-Stoffsystem mit der empirischen Beziehung nach SCHLÜNDER [9] für Haufwerke beschrieben werden (gemittelte Geschwindigkeit in m/s):

$$\left(\frac{(KA)_{fl,so}}{V} \right)_{REV} = \frac{153}{4,78 \cdot 10^{-4} + \frac{1}{500 + 53,6 \sqrt{39700 w_i + \left(\frac{674 w_i^{0,8}}{1 + 1,43 w_i^{-0,1}} \right)^2}}} \quad (7)$$

Die Wirkungen der Feststoffmatrix auf das Fluid und die Nachbildung der vielfältigen Strömungsformen erfolgt über den phänomenologischen Ansatz des integralen Druckverlustes im REV [10]. Im Gegensatz zu vielen Modellen in der Literatur, die die DARCY-Gleichung [7] verwenden, ist der aufgezeigte Ansatz für einen viel größeren Geschwindigkeitsbereich gültig. Die resultierende und gleichzeitig dominierende Widerstandskraft der Feststoffmatrix in der Kräftebilanz auf die flüssige Phase wird sehr gut durch die Ergun-Gleichung [7] wiedergegeben:

$$-\frac{Dp}{l} = 150 \frac{(1-e)^2}{e^3} \frac{h}{d_p^2} w_f + 1,75 \frac{1-e}{e^3} \frac{r_{fl}}{d_p} w_f^2 \quad (8)$$

Die Gleichung für den integralen Druckverlust (in Pa/m) des Kies-Wasser-Stoffsystems ergibt sich aus Gleichung (8) (Geschwindigkeit in m/s):

$$\frac{\partial p_V}{\partial x_i} = 345 w_i + 103000 w_i^2 \quad (9)$$

Der Einfluß des Auftriebes (freie Konvektion) wird über die Oberbeck-Boussinesq-Annahme berücksichtigt, indem nur in diesen Termen eine von der Temperatur abhängige Fluidichte durch Verwendung des volumetrischen Ausdehnungskoeffizienten berücksichtigt wird.

$$(\mathbf{r} - \mathbf{r}_{ref}) \vec{g} = \mathbf{r}_{ref} \mathbf{b}_{ref} (T_{fl,REV} - T_{ref}) \vec{g} \quad \text{mit} \quad \mathbf{b} = -\frac{1}{\mathbf{r}_{ref}} \left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial T} \right)_{ref} \quad (10)$$

Impulserhaltung der flüssigen Phase im KV:

$$\mathbf{e}_{fl} \frac{\partial w_i}{\partial t} + \mathbf{e}_{fl} \frac{\partial (w_i w_j)}{\partial x_j} = -\mathbf{e} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mathbf{e}_{ref} \mathbf{b}_{ref} (T_{fl,REV} - T_{ref}) \vec{g} - \mathbf{e} \frac{\partial p_V}{\partial x_i} \quad (11)$$

Über die implementierten Geschwindigkeitsrandbedingungen (Inlets) lassen sich in CFX 4.3 Be- und Entladung realisieren. Im Modell werden z.B. bei der Beladung im Eintritt der Be- und Entladeeinrichtung (Abbildung 2) die gemessene Wassereintrittstemperatur und der gemessene Volumenstrom aus dem Meßprogramm verwendet.

Parameter

Neben dem Modell haben auch die Modellparameter einen wesentlichen Einfluß auf die Genauigkeit der Berechnungen. Aus diesem Grund sind experimentelle Untersuchungen an einer dem Speicher entnommenen Probe des 16/32 Kieses durchgeführt worden.

Tabelle 1: Untersuchungsergebnis für das Kies-Wasser-Stoffsystem

Porosität	0,43
mittlere Dichte, Kies-Wasser	1928 kg/m ³
volumetrische Wärmekapazität, Kies-Wasser	$2,98 \cdot 10^6$ J/m ³ K
effektive Wärmeleitfähigkeit, Kies-Wasser	2,4 W/mK
mittlerer Partikeldurchmesser, Kies	22,3 mm

Speicherumgebung

In der Speicherumgebung (3,5 m Speicheroberkante bis Erdoberfläche, 20 m von der seitlichen und unteren Speicherbegrenzungsfläche bis zur Modellgrenze) und in der Speicherbegrenzung (Wärmedämmung) wird ausschließlich mit Wärmeleitung gerechnet [6]. An der Erdoberfläche ist die Konvektion (Wind über dem Erdboden) und die Absorption der Globalstrahlung zu berücksichtigen. Auch hier werden Meßwerte dem Modell über die in CFX 4.3 verfügbare Wärmestrom-Temperatur-Randbedingungen aufgeprägt. An der seitlichen und unteren Modellgrenze wird mit einer konstanten Temperatur von 10 °C angesetzt.

Initialisierung

Der Speicher und seine nähere Umgebung (ca. 1 m um die Speicherberandung) wurden ebenfalls mit Hilfe der Meßwerte initialisiert. Für die Anfangsbedingungen der weiteren Umgebung ist das Temperaturfeld aus TRNSYS-Berechnungen mit dem Modell ICEPIT vorgegeben worden.

Validierung

In das oben beschriebene Modell fließen viele Annahmen, Vorstellungen und experimentelle Ergebnisse ein. Deshalb wurde besonderer Wert auf die Validierung gelegt. Die Gültigkeit des komplexen Modells ist mit Berechnungen zur Wärmeleitung, zur erzwungenen und freien Konvektion überprüft worden. Alle Vergleiche bestätigen oben aufgezeigten Ansatz bzw. die verwendeten Parameter. Es lassen sich extrem empfindliche, physikalische Vorgänge wie z.B. die freie Konvektion bei sehr geringen Temperaturdifferenzen abbilden.

Erste Ergebnisse der Speicherberechnung

Die ersten Berechnungen im Tagesbereich zeigen, daß das vorgestellte Konzept anwendbar ist. Zur Untersuchung wurde ein Tag (03.06.2000) gewählt, bei dem eine intensive Beladung bei Temperaturen unterhalb und oberhalb der oberen Speichertemperatur stattfand (Probetrieb). Der in Abbildung 1 dargestellte Vergleich zwischen Meßwerten und berechneten Werten enthält neben eintrittsfernen Temperaturverläufen auch einen Temperaturverlauf nahe des Eintrittes mit der größten Änderung aller Speichertemperaturen. Die maximale Abweichung zwischen Modell und Rechnung beträgt 0,7 K. Weitergehende Aussagen zu den Ursachen für diese Differenz und zur Genauigkeit sind erst nach Langzeitberechnungen möglich.

Anhand von Berechnungen zum Strömungsverhalten im Speicher (Berechnungsbeispiel siehe Abbildung 2) sind erste Aussagen möglich:

- Der Speicher zeigt ein Schichtverhalten, d.h. zuerst eine dominierende vertikale Bewegung des eintretenden Fluides, welches durch den Dichteunterschied verursacht (freie Konvektion) und durch den Wärmeübergang in der Nähe des Eintrittes beeinflusst wird (Temperaturunterschiede über 1/100 K bewirken freie Konvektion [11]).
- Die Beladeströmungen erzeugen Rezirkulationsströmungen, die die Form einer flachen und ausgedehnten horizontalen Walze haben. Sie werden ebenfalls durch Dichteunterschiede hervorgerufen.
- Das abgesaugte Fluid wird auf Grund der stabilen Schichtung und der hohen Permeabilität vorwiegend horizontal aus der untersten Speicherschicht entnommen.
- Nach Beendigung der Beladung finden Ausgleichsströmungen statt (Abbildung 2). Diese sind auf horizontale Dichteunterschiede und den instationären Wärmeübergang zwischen beiden Phasen zurückzuführen.

Die großräumigen Wirbel äußern sich im Temperaturverlauf, der sich von dem bei idealer Schichtung (nur Wärmeleitung) unterscheidet. Messungen bestätigen dieses Phänomen.

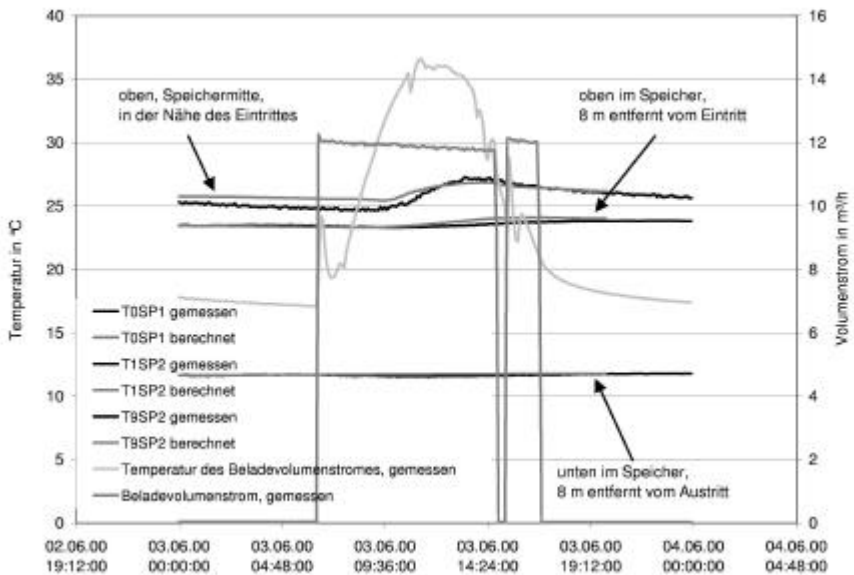


Abbildung 1: Vergleich der gemessenen und berechneten Temperatur, 03.06.2000

Als Demonstration im Vortrag (auch unter [1]) wird die berechnete Entwicklung des Temperaturfeldes im Speicher und seiner Umgebung über mehrere Tage realen Speicherbetriebes im Jahr 2000 gezeigt.

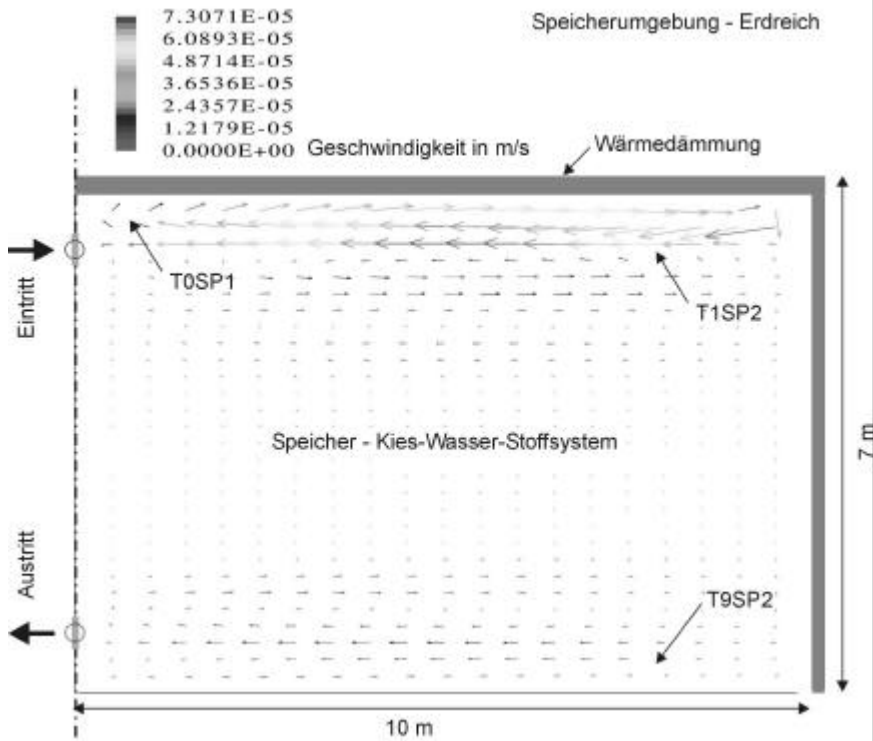


Abbildung 2: Geschwindigkeitsfeld nach 20 Stunden am 03.06. 2000, zweidimensionale Berechnung, repräsentativer Schnitt senkrecht zur Beladeeinrichtung, Ein- bzw. Austritt erfolgt über je ein Rohr senkrecht zur Blattebene

Fazit und Ausblick

Oben aufgezeigter Ansatz mit der Einführung eines REV unter der Verwendung der Finiten-Volumen-Methode (CFX 4.3 konfiguriert und erweitert mit Unterprogrammen) ist für weitere Berechnungen des thermischen Verhaltens von Kies-Wasser-Speichern im Langzeitbereich erfolgsversprechend. Dabei erwiesen sich besonders das zweiphasige Modell für die thermische Energie im REV und der integrale Druckverlust in der Bewegungsgleichung zur präzisen Beschreibung der physikalischen Vorgänge in Kies-Wasser-Speichern als geeignet.

Durch die Berechnungen konnten erste Phänomene, wie z.B. die Existenz bisher nicht bekannter großräumiger Strömungen, aufgezeigt werden. Eine Ursache dafür ist, daß z. B. der gut vermessene Stuttgarter Speicher mit höherer Permeabilität in der obersten und untersten Speicherschicht ausgeführt wurde, die diesen Effekten entgegenwirkt. Diese und andere Effekte sollen bei zukünftigen Rechnungen detaillierter untersucht werden, um bei technischen Anlagen ein noch besseres Schichtungsverhalten zu erzielen.

Symbolverzeichnis

A	Fläche	m^2	Δ	Differenz	-
c	spezifische Wärmekapazität	$J/(kg\ K)$	ε	Porosität	-
d	Durchmesser	m	η	dynamische Viskosität	$kg/(m\ s)$
g	Erdbeschleunigung	m/s^2	λ	Wärmeleitfähigkeit	$W/(m\ K)$
l	Länge	m	ρ	Dichte	kg/m^3
K	Wärmedurchgangskoeffizient	$W/(m^2K)$	Abkürzungen		
p	Druck	Pa	eff	effektiv	
\dot{Q}	Wärmestrom	W	f	Filtergeschwindigkeit, DARCY-Gesetz	
T	Temperatur	K	fl	flüssige Phase (Fluid)	
t	Zeit	s	KV	Kontrollvolumen	
V	Volumen	m^3	P	Partikel	
w	Geschwindigkeit	m/s	REV	repräsentatives Elementarvolumen	
x	Länge	m	so	feste Phase (Solid)	
β	thermischer Ausdehnungskoeffizient	$1/K$	V	integraler Druckverlust	

Quellen

- [1] <http://www.tu-chemnitz.de/mbv/SolTherm>
- [2] <http://solarthermie2000.de>
- [3] Hornberger, M.: Solar unterstützte Heizung und Kühlung von Gebäuden. Forschungsberichte des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins Nr. 47, 1989
- [4] Klein, S. A. et. al.: TRNSYS - A transient system simulation program. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin--Madison, Madison, WI 53706 USA, 1994
- [5] Daniels, H.: Numerische Berechnungen instationärer Strömungsvorgänge in Wärmespeichern. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, 1990
- [6] AEA Technology plc: CFX 4.3 und CFX-4.2 SOLVER-Manual. CFX International, 8.19 Harwell, Didcot, Oxfordshire OX11 0RA, United Kingdom, 1997
- [7] Bear, J.: Dynamics of Fluids in porous media. Elsevier, New York, 1972
- [8] Kaviany, M.: Principles of heat transfer in porous media. Springer, New York, Second Edition, 1999
- [9] Schlünder, E. U.: Einführung in die Wärmeübertragung. Vieweg, Braunschweig, 7. überarbeitete Auflage, 1991
- [10] Wagner, P. W.: Strömungsverläufe in porösen Medien. Dissertation, Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, 1990
- [11] Combarous, M. A.; Borjes, S.: Hydrothermal Convection in Saturated Porous Media Adv. in Hydroscience. Vol. 10, Academic Press, New York, S. 231 - 307, 1977

Dank

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Forschung und Technologie bzw. des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 0329606 G/F/O/P gefördert. Besonderer Dank gilt auch dem Projektträger PTJ für die Unterstützung des Vorhabens.