

Berechnung der Wärmeverluste erdvergrabener Wärmespeicher

F. Ochs, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen

Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)

Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart

Tel. +49 711 685 63278, Fax: +49 711 685 63242

Email: ochs@itw.uni-stuttgart.de

1 Motivation

Bis heute wurden in Deutschland über zehn Forschungs- und Pilotprojekte mit Langzeit-Wärmespeicher für solar unterstützte Nahwärmesysteme realisiert. International sind ca. 30 Projekte dokumentiert, die überwiegend in Europa und dort in den skandinavischen Ländern betrieben werden. Durch diese Projekte konnte demonstriert werden, dass derartige Systeme technisch machbar sind und funktionieren. Jedoch hat die Mehrzahl der bisher unterirdisch ausgeführten Langzeit-Wärmespeicher höhere Wärmeverluste als bei der Planung prognostiziert wurde [1], [2] und [3]. Die Gründe dafür sind:

1. höhere mittlerer Speichertemperaturen aufgrund geänderter Bebauung und damit Lasten oder Systemkonfigurationen
2. geringere Temperaturschichtung gegenüber dem Planungsstand
3. höherer Rücklauftemperaturen im Nahwärmenetz und damit höhere Speicherbodentemperaturen mit den daraus resultierenden höheren Wärmeverlusten im nur gering oder nicht gedämmten Bodenbereich
4. durch Feuchtigkeit und hohe Temperatur nimmt die effektive Wärmeleitfähigkeit der eingesetzten Wärmedämmung signifikant (vgl. [4]) gegenüber dem bei der Planung als konstant angenommen Wert auf Basis der DIN 4108 [5] zu

Während die drei erst genannten Gründe für die höheren Wärmeverluste systembedingt und somit vorab nicht kalkulierbar sind, ist die Zunahme der Wärmeverluste durch Feuchtigkeit und hohe Temperaturen theoretisch modellierbar. Mit derzeitig verfügbaren Modellen ist dies jedoch nicht möglich. Um die zur Auslegung und Nachrechnung von Nahwärmesystemen erforderlichen (Mehr-) Jahressimulationen in akzeptablen Rechenzeiten durchführen zu können, müssen teilweise starke Vereinfachungen in Kauf genommen werden. Bisher wird für die Planung und Auslegung von solar unterstützten Nahwärmesystemen mit Langzeit-Wärmespeicher fast ausschließlich die Simulationsumgebung TRNSYS [6] verwendet.

Im Rahmen dieses Beitrags wird untersucht, ob die Qualität der vorhandenen Speicher-Modelle ausreichend ist, um erdvergrabene saisonale Wärmespeicher realitätsnah abbilden zu können. Es soll dabei gezeigt werden, mit welchen Vereinfachungen noch akzeptable Ergebnisse erzielt werden können und welche Annahmen und Vereinfachungen nicht tolerierbare Fehler bei der Berechnung der Verluste eines erdvergrabenen Wärmespeichers zur Folge haben. Darauf aufbauend sollen Verbesserungsvorschläge aufgezeigt werden.

2 Berechnungsmodelle

Für die Abbildung des thermo-hydraulischen Verhaltens lassen sich prinzipiell Fein- und Grobstrukturmodelle einsetzen. Feinstrukturmodelle oder CFD-Modelle ermöglichen eine geometrisch exakte, fein aufgelöste 3D Abbildung der Speicherstruktur sowie eine Berücksichtigung aller in Realität vorkommenden Wärmetransportvorgänge. In [16] wurden Kies-Wasser-Wärmespeicher am Beispiel Chemnitz und in [17] Heißwasser-Wärmespeicher mittels CFD-Berechnungen untersucht. Instationäre Berechnungen der Strömungsvorgänge in Langzeit-Wärmespeichern sind in [14] zu finden. Feinstrukturmodelle erfordern die Lösung partieller Differentialgleichungssysteme für die interessierenden physikalischen Größen wie Temperatur, Druck und Geschwindigkeit. Aufgrund des sehr großen Rechenaufwands können mit CFD-Simulationen keine Jahressimulationen von Langzeit-Wärmespeichern durchgeführt werden. Nachteilig ist zudem, dass jede Geometrieänderung eine aufwändige Rechengittergenerierung nach sich zieht.

Grobstrukturmodelle verwenden zur Berechnung abhängig von der vorliegenden Aufgabenstellung vereinfachende Annahmen bei Geometrie, Stoffwerten und Randbedingungen, wodurch sich der Rechenaufwand stark reduzieren lässt.

Die Simulationsumgebung TRNSYS verwendet eine umfangreiche Sammlung von Grobstrukturmodellen zur Beschreibung von Solarkollektoren, Wärmespeichern, Rohrleitungen, Kessel und ggf. Wärmepumpe. Weitere kommerzielle Simulationsumgebungen auf Basis von Grobstrukturmodellen sind MINSUN [11], SMILE [13] oder SIMSIS, die allerdings für wissenschaftliche Zwecke weniger geeignet sind, vgl. [12] bzw. [13].

Trotz der erwähnten Einschränkungen und Vereinfachungen von Grobstrukturmodellen sind derzeit für praxisrelevante Berechnungen keine besseren Simulationsumgebungen als TRNSYS vorhanden. Die in TRNSYS vorhandenen Wärmespeichermodelle werden im Folgenden kurz charakterisiert und bewertet.

Speichermodelle in TRNSYS

Für TRNSYS gibt es mehrere Modelle zur Berechnung von Wärmespeichern. Ein sehr flexibles Modell ist das Multiport-Store-Modell (type 340, [7]). Wie bei der Mehrheit der TRNSYS-Speichermodelle kann das Multiport-Store-Modell nur für freistehende zylindrische Speicher verwendet werden. Für die Modellierung erdvergrabener Wärmespeicher stehen in TRNSYS zwei sogenannte Non-Standard-Types zur Verfügung. Das XST-Modell (TYPE 342, [8]) und das ICEPIT-Modell (TYPE 343, [9]).

XST-Modell

Das XST-Modell basiert auf dem SST/MST-Modell (Eftring and Helström: SST-Modell [10] später durch Mazzarella erweitert zum MST-Modell [8]). Detaillierte Be-

schreibungen sind in [12] und [20] zu finden. Das XST-Modell erlaubt die energetische Modellierung erdvergrabener zylindrischer Wärmespeicher. Das Wärmespeichervolumen wird in horizontale Segmente mit einheitlicher Temperatur innerhalb eines Volumensegments aufgeteilt. Dadurch kann lediglich eine vertikale Temperaturschichtung im Speicher berücksichtigt werden.

Wärmeströme durch die Speicherhülle ins umliegende Erdreich werden mittels Wärmedurchgangswiderständen berechnet. Die thermische Masse der Speicherhülle bleibt somit unberücksichtigt. Der Wärmetransport im Erdreich um den Speicher erfolgt durch zweidimensionale Wärmeleitung. Zur numerischen Lösung wird die Finite-Differenzen-Methode (FDM) verwendet. Bild 1 zeigt ein typisches FDM Gitter des XST-Modells.

Der Nutzer hat mit Ausnahme der Definition der Zylindergeometrie (Speichervolumen und -höhe, Höhe der Erdreichüberdeckung) und der Anzahl der Speichersegmente keinen Einfluss auf die Gittergenerierung. Die Betrachtung variabler Dämmstoffdicken und Wärmeleitfähigkeit ist nicht möglich.

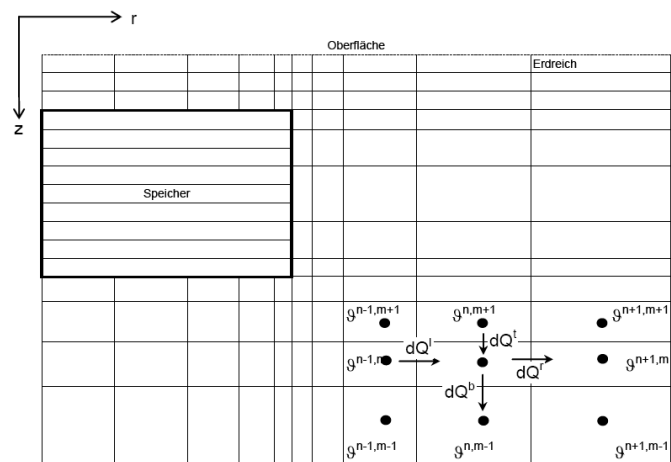


Bild 1: Typisches FDM-Gitter des XST-Modells, radialsymmetrischer Zylinder

Solar unterstützte Nahwärmesysteme mit erdvergrabenen Langzeit-Wärmespeichern wurden beispielhaft von Dalenbäck (1993): Sarö (S) [12], Mahler (2004): Friedrichshafen [19] und Raab (2006): Hannover [20] simuliert.

ICEPIT-Modell

Eine detaillierte Beschreibung des ICEPIT Modells findet sich in [9]. Im Unterschied zum XST-Modell erlaubt das ICEPIT-Modell von Hornberger die Berücksichtigung eines einfachen Kegelstumpfs als Speichergeometrie, wobei der Böschungswinkel β variabel ist. Während die Wärmedämmung des Speicherdeckels bei der Berechnung der transienten Temperaturfelder mit thermischer Masse berücksichtigt wird, erfolgt die Berechnung der Wärmeströme durch die Wärmedämmung der Seitenwand und des Bodens analog

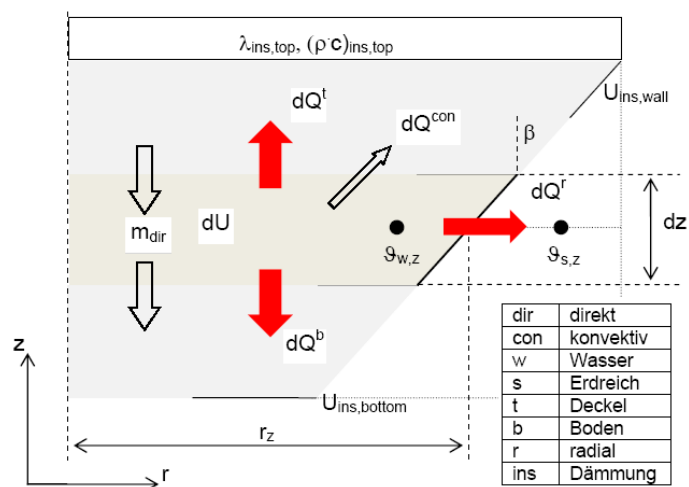


Bild 2: Speicheraufbau und Energieströme des ICEPIT-Modells, Kegelstumpf mit Böschungswinkel β

zum XST-Modell durch Wärmedurchgangswiderstände ($1/U$). Es ergeben sich die radialen Wärmeverluste durch die Speicherhülle nach Gl. (1).

$$d\dot{Q}^r = U \cdot (\vartheta_w - \vartheta_s) \cdot 2\pi \cdot r_z \cdot \frac{dz}{\cos\beta} \quad (1)$$

Die Betrachtung variabler Dämmstoffdicken und Wärmeleitfähigkeit ist auch beim ICEPIT-Modell nicht möglich. Das ICEPIT-Modell ermöglicht die Modellierung eines indirekten Beladesystems mittels Rohrschlangen. Zudem kann Latentwärmespeicherung simuliert werden. Mit dem ICEPIT-Modell wurde der Kieswasser-Wärmespeicher in Stuttgart [9] und in Chemnitz [16] berechnet.

3 Validierung von Simulationsergebnissen mit Messdaten

Bisher wurden die in TRNSYS verfügbaren Wärmespeichermodelle nicht validiert, sondern vielmehr den Gegebenheiten einer vorliegenden Anlage angepasst. Dazu wurden mittels Parameteridentifikation freie (physikalische oder empirische) Parameter derart angepasst (gefittet), dass sich eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen Mess- und Rechenwert einstellt. Mathematisch gesehen muss eine vorab definierte Zielfunktion z.B. nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate minimiert werden. Die Lösung des Optimierungsproblems können z.B. die entsprechenden Werte der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung und des Erdreichs darstellen.

3.1 Einfluss der Zielfunktion auf die Modellgüte

Als zu minimierende Zielfunktion wurde bei bisherigen Arbeiten [9], [12], [19], [20] die Differenz aus mit TRNSYS berechneten und gemessenen Be- und Entlade-Wärmemengen verwendet. Je nach der Vertrauenswürdigkeit der vorhandenen Messdatensätze ist es besser stattdessen gemessene und simulierte Wärmestromdichten oder Temperaturen in einer Schicht der Speicherhülle und/oder im umgebenden Erdreich oder beides zu verwenden. Theoretisch sollte die Güte der Modellanpassung unabhängig von der verwendeten Zielfunktion sein. Aufgrund von Messungenauigkeiten bzw. numerischen Fehlern dürfte dies in der Praxis allerdings in den seltensten Fällen zutreffen, wie im Folgenden gezeigt werden soll.

Die Wärmeströme durch die Speicherhülle bzw. die Wärmeverluste können entweder durch energetische Bilanzierung des Wärmespeichers oder direkt mittels Wärmestrommessplatten ermittelt werden. Beispielhaft sind für die Langzeit-Wärmespeicher und Hannover und Friedrichshafen jeweils die mit den beiden Methoden bestimmten jährlichen Speicher-Wärmeverluste über 6 bzw. 8 Jahre in (Bild 3) aufgetragen.

Für beide Wärmespeicher ist eine signifikante Abweichung der auf die verschiedenen Arten bestimmten Wärmeverluste zu erkennen. Im Gegensatz zu den Messwerten für den Wärmespeicher in Friedrichshafen zeigen die Verläufe der Wärmeverluste für den Wärmespeicher in Hannover zumindest ähnliche Tendenzen: beide Kurven wei-

sen 2004 ein Minimum auf und steigen danach wieder an, wenn auch auf sehr unterschiedlichen Niveaus. Als mögliche Gründe für die großen Abweichungen (Hannover: 70 % bzw. Friedrichshafen: 130 %) sind u.a. zu nennen:

- Punktuelle Messung der Wärmestromdichte, wodurch inhomogene Wärmeverluste durch partielle Durchfeuchtung der Wärmedämmung oder Grundwasserströmung und Wärmebrücken nicht erfasst werden können
- Durch Bilanzierung werden Wärmeverluste der Be- und Entladeleitungen erfasst

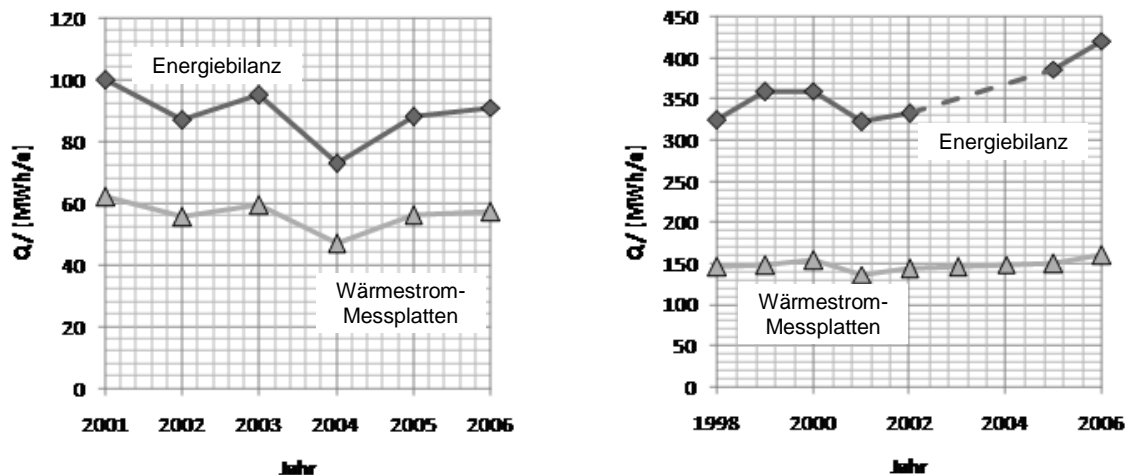


Bild 3: Jährliche Wärmeverluste von Hannover (links, Messdaten: IGS, Braunschweig) und Friedrichshafen¹ (rechts, Messdaten: ITW, Stuttgart) ermittelt über Bilanzierung der Be- und Entlade-Wärmemengen sowie über Messung der Wärmestromdichten mittels Wärmestrom-Messplatten.

Zudem sind Ungenauigkeiten durch Messfehler bei Wärmemengenzählern und Wärmestrom-Messplatten sowie Fehler durch Datenlücken infolge von Sensorausfällen, die durch Interpolation geschlossen werden, zu nennen.

Die Wahl der Zielfunktion für die Parameteridentifikation hängt von der Aufgabenstellung ab. Dient die Parameteridentifikation dazu, ein angepasstes Modell für Systemsimulationen z.B. zur Optimierung der Regelstrategie zu erzeugen, sollte die Minimierung der Abweichung aus gemessenen und berechneten Be- und Entlademengen bzw. Wärmeverlusten aus der Gesamtenergiebilanz im Vordergrund stehen.

Ist demgegenüber das Ziel der Untersuchung die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung und des umgebenden Erdreichs um Detailaussagen zur Speicherkonstruktion oder zu Optimierungsmaßnahmen treffen zu können, sollte für die Parameteridentifikation auf Messwerte der Wärmestrom-Messplatten (Wärmestromdichte) und/oder auf die Temperaturen von Speicherhülle oder Erdreich zurückgegriffen werden.

¹ Die energetische Bilanzierung für Friedrichshafen in den Jahren 2004 und 2005 kann aufgrund fehlender Messwerte der Kollektorfelder des zweiten Bauabschnitts nicht durchgeführt werden.

3.2 Randbedingungen

Wie in Kapitel 2 beschrieben, kann die Gittergenerierung beim XST-Modell nicht beeinflusst werden. Für die Berechnung der transienten Temperaturfelder mittels Finite Differenzen Methode wird eine (Anfangs)-Erdreichtemperatur angesetzt. An den Grenzen des Rechengitters wird entweder eine Dirichlet Randbedingung (Anfangsbedingung gleich Randbedingung mit $\vartheta_{\text{Rand}} = \text{const.}$) oder Neumann Randbedingung ($q = 0$) angenommen. Es wird zudem angenommen, dass die Grenzen des Gitters einen ausreichend großen Abstand vom Wärmespeicher haben, so dass die Temperatur am Gitterrand unbeeinflusst bleibt. Folglich steht im Modell die Erdreichmasse um den Wärmespeicher komplett als Speichermasse zur Verfügung. Die Auswirkung dieser Annahmen auf die Ergebnislösung wird anhand eines einfachen Beispiels überprüft.

In Bild 4 sind die jährlichen spezifischen Wärmeverluste durch eine Zylinderwand mit 0.2 m Steinwolle und 0.3 m Beton (Innendurchmesser 20 m) dargestellt. Die eindimensionale Berechnung der Wärmeverluste erfolgt über 20 Jahre. Als Anfangsbedingung wird eine Erdreichtemperatur von 10 °C angenommen. Als linke Randbedingung wird eine periodische Speichertemperatur zwischen 20 und 80 °C angesetzt. Die rechte

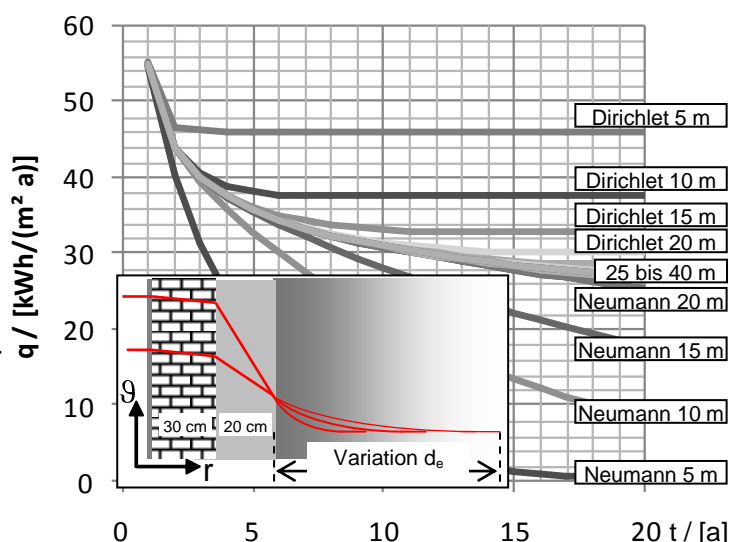


Bild 4: Jährliche spezifische Wärmeverluste in Abhängigkeit der Betriebszeit mit dem Abstand der rechten Randbedingung (Dirichlet-RB und Neumann-RB) von der Speicherhülle (d_e) als Parameter.

Randbedingung wird variiert. Im Rahmen numerischer Berechnungen wurde zum Einen der Abstand der rechten Randbedingung von der Speicherhülle verändert und zum Anderen die Art der Randbedingung variiert. Die bei der Berechnung verwendeten Stoffwerte sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Stoffwerte für die 1d-Berechnung, Variabler Abstand der Randbedingung d_e

		Beton	WD	Boden
d	[m]	0.3	0.2	variabel
λ	[W/(m K)]	1.0	0.04	2.8
ρ	[kg/m ³]	2100	100	2300
c	[kJ/(kg K)]	0.88	0.8	1.4

Deutlich zu erkennen sind die großen Unterschiede bei den berechneten Wärmeverlusten in Abhängigkeit von der Lage und Art der Randbedingung, die sich ab dem zweiten Jahr einstellen. In einem Simulationszeitraum von 20 Jahren tritt erst ab einem Abstand der Randbedingung von etwa 30 m kein Einfluss mehr auf. Es werden dann mit Dirichlet und mit Neumann Randbedingung identische Ergebnisse erzielt.

Zwischen dem Fall „Dirichlet 5 m“ und „Dirichlet 40 m“ treten Abweichung bei den berechneten spezifischen Wärmeverlusten von 60 % auf.

Die hierbei getroffene Annahme der ungestörten Wärmeleitung zwischen Wärmespeicher und „rechtem“ Gitterrand dürfte jedoch in den wenigsten Fällen in der Realität zutreffen. Aufgrund von Umwelteinflüssen wie Grund- oder Schichtenwasser kann die Erdreichtemperatur in Speichernähe deutlich niedriger liegen, als sie unter der Annahme der unberührten Erdreichtemperatur berechnet wird. Die Wärmeverluste liegen dann entsprechend höher.

Wird eine Parameteridentifikation unter dieser Annahme durchgeführt, kann dies zu signifikanten Fehlern führen. Eine vereinfachte Berücksichtigung des Einflusses von Grundwasser (konstanter Temperatur) könnte durch Anpassung des Abstandes der isothermen Randbedingung des linken Randes des Berechnungsgebiets vorgenommen werden, vgl. Bild 5.

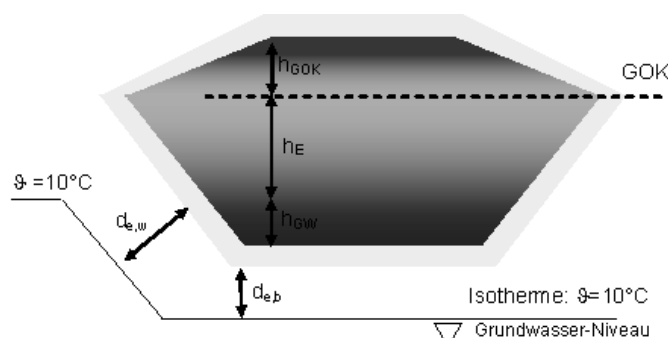


Bild 5: Vereinfachte Betrachtung von Grundwasser durch Variation des Abstandes der Isotherme (unberührte Erdreichtemperatur)

3.3 Geometrie

Erdvergrabene Wärmespeicher werden entweder als Quader, Zylinder, als Pyramiden- oder Kegelstumpf oder als Mischform ausgeführt. Die Mehrheit bisher realisierter erdvergrabener Wärmespeicher hat zudem keine homogen verteilte Wärmedämmung. Frühere Wärmespeicher wie z.B. in Friedrichshafen, Hamburg, Chemnitz, Hannover und Steinfurt sind im Bodenbereich nicht wärmedämmend, die Wandwärmedämmung der Wärmespeicher in Hannover, München und Eggenstein (Bild 6) nimmt nach oben hin zu, vgl. [21].

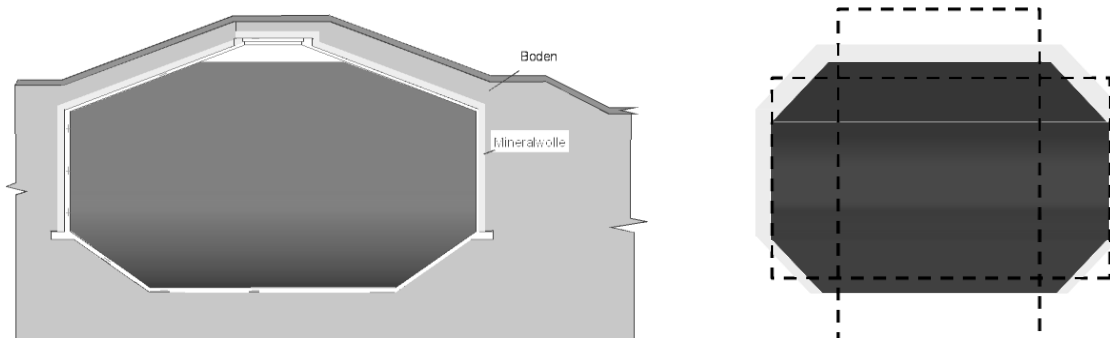


Bild 6: Behälter-Wärmespeicher mit 12000 m³ in Friedrichshafen, Alternativen zur Abbildung einer komplexen Speichergeometrie auf eine zylindrische Geometrie

Wie in Abschnitt 2 diskutiert, kann mit den vorhandenen TRNSYS-Simulationsmodellen keine komplexe Speichergeometrie abgebildet werden. Sowohl beim XST-Modell (Zylinder) als auch beim ICEPIT-Modell (Kegelstumpf) müssen wesentliche Vereinfachungen bei der Abbildung realer Speicher in Kauf genommen werden.

Unter der Voraussetzung, dass sich Modell- und Realvolumen entsprechen, können mindestens drei Kriterien zur Abbildung realer Speicherformen angewendet werden: 1. Höhe-Durchmesser-Verhältnis (h/D), 2. Fläche-Volumen-Verhältnis (A/V) und 3. Verhältnis von wärmegeämmter Fläche zu Gesamtfläche (A_{wd}/A).

Die Wahl des zu verwendenden Kriteriums hängt von der Optimierungsaufgabe ab. Soll die Speicherschichtung möglichst genau abgebildet werden, ist das h/D -Verhältnis (Kriterium 1) anzuwenden. Um die Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung und des umgebenden Erdreichs möglichst realitätsnah zu bestimmen, muss die Fläche (Kriterium 2) bzw. das Flächenverhältnis (Kriterium 3) im Modell der Realität entsprechen.

Der Einfluss geometrischer Vereinfachungen soll am Beispiel des Wärmespeichers in Friedrichshafen gezeigt werden, welcher ohne Bodenwärmedämmung ausgeführt wurde. Eine Abbildung der Speichergeometrie als Zylinder hat eine Veränderung der Bodenfläche zur Folge. Folglich ist mit signifikantem Einfluss auf die Gesamtwärmeverluste zu rechnen. Je nach Abbildungsmethode ergeben sich Abweichungen bei der Bodenfläche für Friedrichshafen von 31%, 83% bzw. 2% (vgl. Tabelle 2).

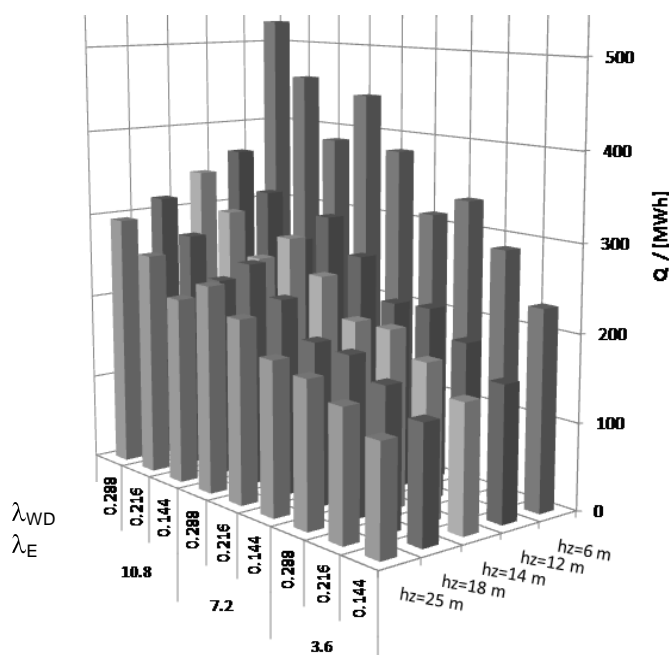


Bild 7: Mit dem XST-Modell simulierte jährliche Wärmeverluste als Funktion der Zylinderhöhe (h_z) bei konstantem Volumen sowie der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs (λ_E) und der Wärmedämmung (λ_{wd}) in [KJ/(h m K)]

Tabelle 2: Reale Geometrie und Modell (Zylinder) des 12000 m³ Behälter-Wärmespeichers in Friedrichshafen

Merkmal	Realität	Variante				
		Max.	Mittel	3 ^{#)}		
V	[m ³]	12000		12000		
h	[m]	19.1 ^{S)}	18.0	25.0	14.0	
d	[m]	32.4	27.5	29.1	24.7	33.0
h/d	[-]	0.59	0.70	0.62	1.01	0.42
A/V	[m ⁻¹]	0.23	0.25	0.24	0.26	
A _{tot}	[m ²]	2796	2980	2901	3168	
A _{Boden}	[m ²]	876	667	480	857	
A _{Wand}	[m ²]	977	1647	1942	1453	
A _{Deckel}	[m ²]	943	667	480	857	

^{S)} $h_{Kegelstumpf,Deckel} = 4.8$ m, $h_{Zylinder} = 9.6$ m, $h_{Kegelstumpf,Boden} = 4.65$ m

^{#)} 3a) A_{Boden} ($d_{WD} = 0$ cm): $h_{Zylinder} = 12.5$ m

3b) A_{Wand} ($d_{WD} = 20$ cm): $h_{Zylinder} = 6.5$ m

3c) A_{Deckel} ($d_{WD} = 30$ cm): $h_{Zylinder} = 14$ m

In Bild 7 sind die mit dem XST-Modell² simulierten jährliche Wärmeverluste für den Wärmespeicher in Friedrichshafen als Funktion der Zylinderhöhe (h_z) für verschiedene Werte der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs ($\lambda_E / [W/(m K)] = 1/2/3$) und der Wärmedämmung ($\lambda_{WD} / [W/(m K)] = 0.04/0.06/0.08$) dargestellt. Als Randbedingungen werden in 2006 gemessene Be- und Entlade Temperaturen und Volumenströme eingelesen, vgl. [22]. Die Höhe des im Modell betrachteten Zylinders variiert von $h_z = 6$ m bis $h_z = 25$ m bei unveränderlichem Volumen des Speichers von $V = 12000$ m³, vgl. Tabelle 2).

Die berechneten Wärmeverluste weichen abhängig von der gewählten Wärmeleitfähigkeit von Wärmedämmung und Erdreich um bis zu 100 % voneinander ab. Absolut liegen die berechneten jährlichen Wärmeverluste für die betrachteten Parameter in einem Bereich zwischen 127 MWh und 525 MWh. Im Vergleich dazu liegen die gemessenen Wärmeverluste in 2006 bei 160 MWh berechnet mit Messwerten der Wärmestrom-Messplatten und bei 420 MWh berechnet aus der Energiebilanz.

In Bild 8 ist für den Wärmespeicher in Friedrichshafen der Vergleich von Simulation und Messung für einen Zylinder mit einer Höhe von 18 m für eine Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs von 3 W/(m K) sowie der Wärmedämmung von 0.06 W/(m K) dargestellt. Die jährlichen thermischen Verluste summieren sich für diesen Fall zu 277 MWh im Vergleich zu gemessenen 160 MWh (Wärmestrom-Messplatten) bzw. 420 MWh (Wärmemengenzähler). Die ermittelte Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung liegt mit einem Wert von 0.06 W/(m K) 50% über dem Bemessungswert nach DIN 4108. Die Übereinstimmung der Simulationsergebnissen mit Messwerten ist zufriedenstellend für die Speichertemperaturen, jedoch bestehen Abweichungen im Bereich von bis zu 3 K bei den Erdreichtemperaturen.

3.4 Einfluss feuchte- und temperaturabhängiger Wärmeleitfähigkeiten

Ein Grund für die im Vergleich zur Planung zu hohen Wärmeverluste der realisierten erdvergrabenen Wärmespeicher wird darin vermutet, dass die Wärmedämmung auf-

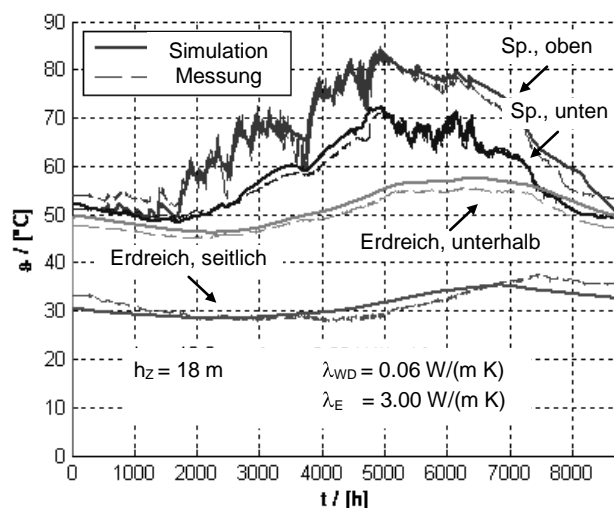


Bild 8: Wassertemperatur oben und unten im Wärmespeicher sowie Bodentemperatur (zentral 3.3 m unter sowie 2.5 m seitlich neben der Speicherhülle); simulierte Daten (—) und Messwerte von 2006 (- - -) für den Wärmespeicher in Friedrichshafen

² Ein detaillierter Vergleich des XST-Modells mit dem ICEPIT-Modell ist Inhalt aktueller Untersuchungen.

grund von Durchfeuchtung degradiert. Eine In-situ Feuchtebestimmung der Wärmedämmung ist derzeit mit vertretbarem Aufwand nicht möglich.

Der Rechenaufwand zur numerischen Lösung der gekoppelten Wärme- und Feuchte-transportvorgänge ist zu groß, um in Wärmespeichermodellen Anwendung zu finden. Stattdessen wird ein analytisches Modell zur Berechnung der Temperatur- und Feuchteabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Wärmedämmung eingesetzt. Das Modell basiert auf einem von Krischer und Kast [21] entwickeltem Ansatz und beinhaltet Erweiterungen zur Abbildung von Dämmstoffschüttungen mit teilweise geschlossener Porenstruktur. Das neue Modell wird detailliert in [4] beschrieben.

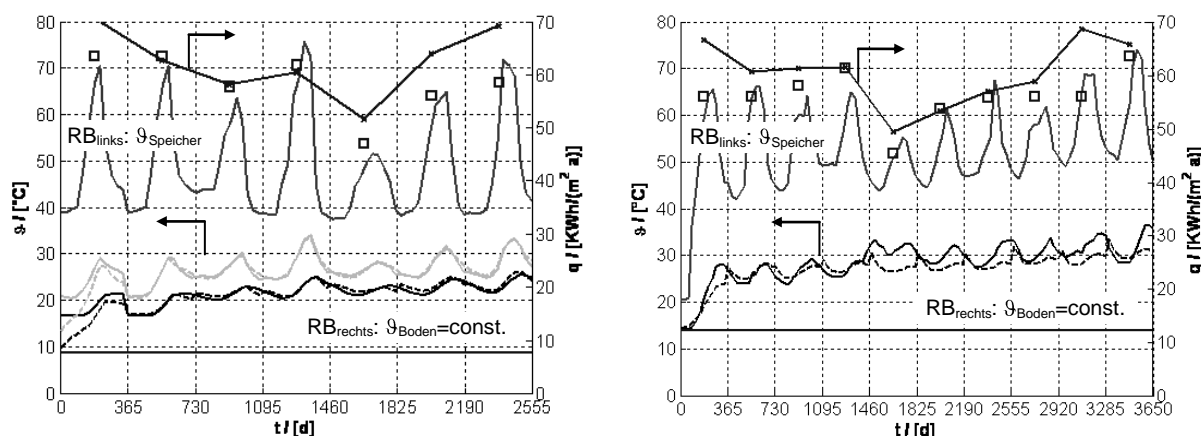


Bild 9: Gemessene (—) und berechnete (- - -) Erdreichtemperaturen für die Seitenwand der Wärmespeicher in Hannover (links) und Friedrichshafen (rechts), sowie gemessene (\square) und berechnete Wärmestromdichte (—)

Anhand eindimensionaler transienter Berechnung des Temperaturprofils der Wärmespeicherwand und des umgebenden Erdreichs können die Wärmeverluste abhängig von der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs (λ_E) und der Wärmedämmung (λ_{WD}) bestimmt werden. Am Beispiel der Wärmespeicher in Friedrichshafen und Hannover wird mittels Parameteridentifikation die Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung und des Erdreichs ermittelt. Dafür wird die Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Wärmestromdichten (Wärmestrom-Messplatte) und ein bzw. zwei Erdreichtemperaturen minimiert.

Sowohl für Friedrichshafen als auch für Hannover lassen sich die Messdaten mit einer zeitlich (= jährlich) variierende Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung besser wiedergeben, wobei die

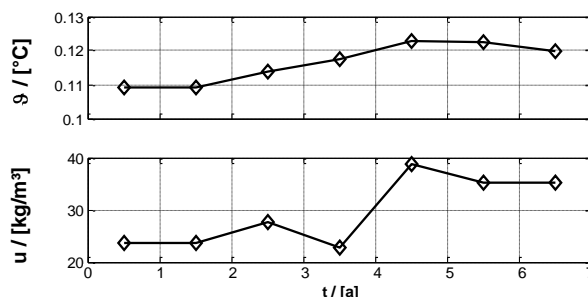


Bild 10: Wärmeleitfähigkeit (λ) und Wassergehalt (u) der Wärmedämmung der Seitenwand (2000 bis 2006, Hannover) bei einer Wärmeleitfähigkeit $\lambda_e = 2.2$ W/(m K), $d_e = 7.5$ m.

Übereinstimmung für den Wärmespeicher in Hannover besser ist. Die relative gute Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Wärmestromdichten kann als Indiz dafür gelten, dass die Messwerte der Wärmestrom-Messplatten plausibel sind.

Im Falle des mit Blähglasgranulats gedämmten Wärmespeichers in Hannover ergibt die Parameteridentifikation eine gering steigende effektive Wärmeleitfähigkeit von 0.11 auf 0.12 W/(m K) bzw. einen Wassergehalt der von 25 kg/m³ auf 35 kg/m³ zunimmt, vgl. Bild 10. Damit liegt die effektive Wärmeleitfähigkeit rund 50 % über dem Bemessungswert bzw. 100 % über dem Messwert im trockenen Zustand bei 10 °C. Für den Wärmespeicher in Friedrichshafen liefert die Parameteridentifikation mit $\lambda > 0.06$ W/(m K) ebenfalls Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit, die signifikant über dem Bemessungswert von 0.04 W/(m K) liegen.

4 Schlussfolgerung und Ausblick

Bisherige Wärmespeicher-Modelle in TRNSYS erlauben nur die Eingabe eines konstanten Wertes für die Wärmeleitfähigkeit bei sehr eingeschränkter Möglichkeit die Geometrie des Wärmespeichers zu variieren. Eine allgemeingültige Validierung der vorhandenen Speichermodelle kann aufgrund dieser Einschränkungen (Stoffwerte, Geometrie, Randbedingungen) nicht durchgeführt werden. Anstelle von Validierung wurde bisher eher Modell-Anpassung durchgeführt.

Detaillierte Berechnungen mit dem Ziel einer Optimierung der Speichergeometrie bzw. der Verteilung der Wärmedämmung können folglich mit derzeit verfügbaren Modellen nicht durchgeführt werden. Aufgrund der Komplexität von solar unterstützten Nahwärmesystemen kann zur Dimensionierung der Systemparameter mangels besserer Modelle jedoch nicht auf die vorhandenen TRNSYS-Speichermodelle verzichtet werden.

Eine Implementierung des Modells der temperatur- und feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit ist aufgrund der durch die zahlreichen Vereinfachungen (Geometrie, Randbedingungen) resultierenden Ungenauigkeiten heutiger Wärmespeichermodelle nicht sinnvoll. Vielmehr sollten die vorhandenen Modelle grundlegend überarbeitet bzw. neue Modelle entwickelt werden.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Die Autoren bedanken sich beim IGS, Uni Braunschweig, für das zur Verfügung stellen der Messdaten des Behälterspeichers in Hannover-Kronsberg

Literatur

- [1] Ochs, F., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Effektive Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung von erdvergrabenen Hochtemperatur-Langzeit-Wärmespeichern, OTTI, 16. Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz, 2006.

- [2] Ochs F., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Weiterentwicklung der Erdbecken-Wärmespeichertechnologie, Proc. PtJ Statusseminar Thermische Energiespeicherung - mehr Energieeffizienz zum Heizen und Kühlen, 2. + 3. November, Freiburg, 2006.
- [3] Ochs F., State of the Art of Seasonal Heat Storage, Report, ITW, Uni Stuttgart, 2007.
- [4] Ochs F., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Effective Thermal Conductivity of Moistened Insulation Materials as a Function of Temperature, International Journal of Heat and Mass Transfer, Elsevier, 2007.
- [5] DIN 4108 Teil 4, Thermal insulation and energy economy in buildings - Part 4: Hygrothermal design values, 2004.
- [6] TRNSYS, A Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory University of Wisconsin, Madison and Transsolar, Stuttgart, Germany, 2000.
- [7] Drück H., Mathematische Modellierung und experimentelle Prüfung von Warmwasserspeichern für Solaranlagen, Diss., Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW), Universität Stuttgart, Stuttgart, 2006.
- [8] Mazzarella L., Multi-flow stratified thermal storage model with full mixed layers. PdM—XST. TRNSYS Version September 1992, ITW, University of Stuttgart, Germany and Dipartimento di Energetica, Politecnico di Milano, Italy, 1994.
- [9] Hornberger M., Solar unterstützte Heizung und Kühlung von Gebäuden, Forschungsberichte des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins, Nr. 47, Diss. ITW, 1998.
- [10] Efring B., Hellström G., Stratified Temperature Model, Manual for Computer Code, Department of Mathematical Physics, University of Lund, 1989.
- [11] Mazzarella L., The Minsun Program, Application and User's Guide, Dipartimento de Energetica, Politecnico di Milano, Italy, 1989.
- [12] Dalenbäck J. O., Solar Heating with Seasonal Storage – Some Aspects of the Design and Evaluation of Systems with Water Storage, Chalmers University of Technology, Göteborg, 1993.
- [13] Jochum P., Rechenprogramme zur Simulation solar unterstützter Heizsysteme, Technische Universität Berlin, Institut für Energietechnik, Berlin.
- [14] Daniels H., Numerische Berechnungen instationärer Strömungsvorgänge in Wärmespeichern, Diss., RWTH Aachen, 1990.
- [15] Riegger M., Simulationsstudie einer solar unterstützten Nahwärmeversorgung im Gebäudebestand in Eggenstein-Leopoldshafen, Solites, Stuttgart, 2007.
- [16] Urbaneck T., Berechnung des thermischen Verhaltens von Kies-Wasser-Speichern, Diss. (2003), TU Chemnitz, Shaker Verlag, ISBN: 3-8322-2762, Aachen, 2004.
- [17] Panthaloorkaran V., CFD-Assisted Characterization and Design of Hot Water Seasonal Thermal Heat Stores, Thesis, Institute for Thermodynamics and Thermal Engineering (ITW), University of Stuttgart, Stuttgart, 2006.
- [18] Bodmann M., Mangold D., Nußbicker J., Raab S., Schenke A., Schmidt T., Solar unterstützte Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicher, Forschungsbericht zum BMWA / BMU-Vorhaben (Februar 2003 bis Mai 2005), Stuttgart, 2006.
- [19] Mahler B., Ganzheitliche Optimierung von solaren Nahwärmesystemen mit Langzeit-Wärmespeicher, Diss., TU Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2004.
- [20] Raab S., Simulation, Wirtschaftlichkeit und Auslegung solar unterstützter Nahwärmesysteme mit Heißwasser-Wärmespeicher, Diss., ITW, Universität Stuttgart, Cuvillier Verlag, ISBN 3-86727-049-X, 2006.
- [21] VDI-Wärmeatlas, Kap. Dee, 9. Auflage, Springer Verlag, 2002.
- [22] Bauer D., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Solar Unterstützte Nahwärmeversorgung – Langzeiterfahrungen der Anlage in Friedrichshafen