

GREEN HEAT³:

Entwicklung innovativer Energieversorgungstechniken und -strukturen mit den Kernkomponenten modularer Großwärmespeicher und Maxianlage Solarthermie

Anja Matthees, Peter Stange, Alessandro Hülser, Karin Rühling
TU Dresden, Institut für Energietechnik, Professur für Gebäudeenergietechnik und
Wärmeversorgung, Helmholtzstraße 14 in 01062 Dresden

Kontakt: Tel.: +49-351 / 463-32375, Fax: +49-351 / 463-37076

E-Mail: karin.ruehling@tu-dresden.de

<https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/iet/gewv/forschung/forschungsprojekte>

Vorgestellt werden die Modellierung und Simulation eines Multifunktionswärmespeichers mit COMSOL Multiphysics®.

Das **Gesamtziel** des BMWi-Verbundvorhabens GREEN HEAT³ (FKZ 0325872) ist die Entwicklung innovativer Energieversorgungstechniken und –strukturen. Der Effizienzsteigerung der Wärmeversorgung durch einen modularen, im Temperaturniveau partiell multivalenten thermischen Großspeicher kommt dabei eine Schlüsselfunktion zu. Des Weiteren soll der Anteil erneuerbarer Energien im zugehörigen Bilanzraum des Fernwärme-Versorgungssystems durch eine ebenfalls modulare Solarthermie-Großanlage signifikant erhöht werden.

Für eine verstärkte Nutzung erneuerbarer Energieträger in der Wärmeversorgung müssen neuartige Multifunktions-Wärmespeicherkonzepte entwickelt werden. Hierbei gilt es im Hinblick auf die Kosten möglichst einfache, robuste Konstruktionen zu wählen und gleichzeitig die Speichereffizienz und die Wirkungen auf die angrenzende Umgebung im Blick zu haben. Mit Hilfe eines Multifunktionsgroßwärmespeichers wäre man perspektivisch nicht nur stunden- oder tageweise, sondern über deutlich längere Zeiträume in der Lage saisonal größere Schwankungen in der Strom- bzw. Wärmeerzeugung besser auszugleichen.

Ein Ziel der Modellierung und Simulation mit COMSOL Multiphysics® ist die Untersuchung der Wärmeübertragung auf das Grundwasser (10 m unterhalb des Speicherbodens) und den umgebenden Boden des Multifunktionswärmespeichers, um die Auswirkungen auf das Grundwasser und die Tier- und Pflanzenwelt besser einschätzen zu können.

Untersucht wurde deshalb das Langzeitverhalten (Fünfhahressimulation) des Erdbeckenspeichers im realen Speicherbetrieb. Dabei lag der Schwerpunkt auf folgenden Teilbetrachtungen:

- Wärmeverluste des Speichers
- Wärmeeintrag ins Grundwasser
- Änderung der Bodentemperatur

Modellgeometrie

Es wurde eine parametrisierte Modellgeometrie (siehe Abbildung 1) erstellt, um das System flexibel zu gestalten. Somit können das Volumen, die Höhe oder der Böschungswinkel des Multifunktionsspeichers nachträglich geändert werden und das Modell passt sich automatisch an.

Parameter	Beschreibung
V_0	Gesamtvolumen
h_0	Gesamthöhe
β	konstanter Böschungswinkel der Speicherflanken

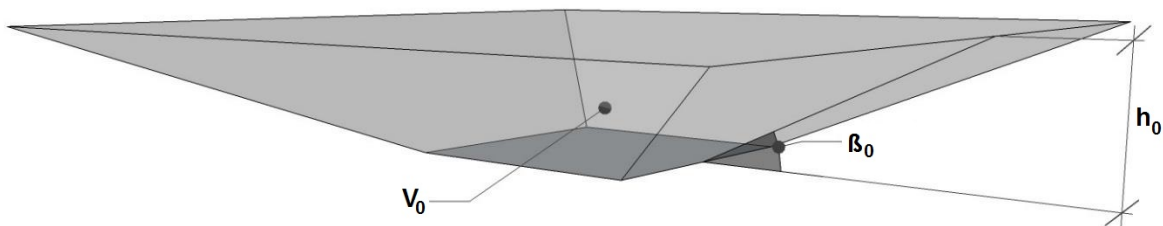


Abbildung 1: parametrisierte Modellgeometrie des Multifunktionsspeichers

Kleinteilige Gebiete der Modellgeometrie erfordern eine engmaschige Vernetzung. Je größer die Anzahl der Netzelemente ist, desto größer wird auch der zeitliche Aufwand für die Simulationsberechnungen. Aus diesem Grund wurden bei der Erstellung der Modellgeometrie folgende Vereinfachungen getroffen:

1. Homogenes Erdreich
2. Reduzierter Deckel
3. Vernachlässigung von Details (Einbauten, Abdichtungsfolien etc.)
4. Konstantes Speichervolumen
5. Reduzierung auf ein rotationssymmetrisches 2D-Modell

Temperaturrendbedingung des Speicherinhalts

Der in Stundenwerten vorliegende Jahreslastgang des Multifunktionsspeichers als BOFIT-Optimierungsergebnis des Verbundprojektpartners DREWAG ist in Abbildung 2 dargestellt. Neben der Speicherbeladung (positive Werte) und der Speicherentladung (negative Werte) ist der sich daraus ergebende Speicherfüllstand ξ abgebildet. Aus den Verläufen wird deutlich, dass über das gesamte Jahr verteilt Be- und Entladungsvorgänge stattfinden. Der Verlauf des Speicherfüllstands zeigt, dass im Jahresgang mehrere Speicherzyklen durchlaufen werden. Darüber hinaus sind keine längerfristigen Stillstandzeiten zu erkennen.

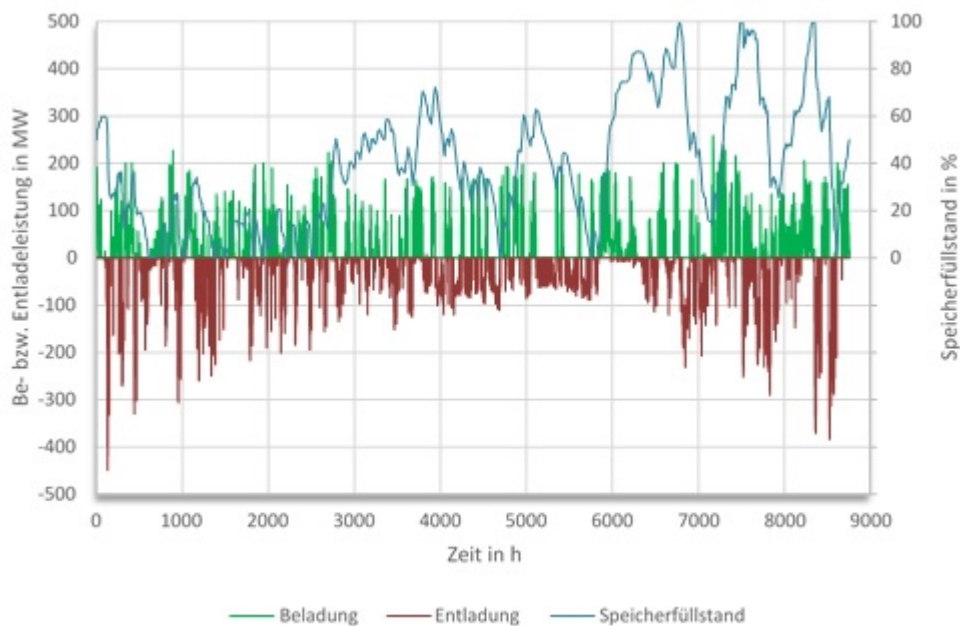


Abbildung 2: BOFIT-optimierter Jahreslastgang des Multifunktionsspeichers [Quelle: DREWAG]

Die Temperaturrendbedingung soll das vertikale Temperaturprofil, welches sich durch eine geschichtete Beladung im Speicherinneren einstellen würde, abbilden. Für die mathematische Bestimmung des vertikalen Temperaturverlaufs im Speicher wurden folgende Annahmen getroffen:

- konstantes Volumen des Übergangsbereiches
- horizontal konstante Temperatur
- Temperaturverlauf Übergangsbereich gemäß Gauß'scher Fehlerfunktion
- Be- und Entladung jeweils bis zur Mitte des Übergangsbereiches
- 50 cm hohes nichtnutzbares Speichervolumen unterhalb des unteren Diffusors

In Abbildung 3 sind für verschiedene Speicherfüllstände die sich ergebenden Verläufe dargestellt. Mit den in 1h-Schritten zur Verfügung stehenden Werten für den Speicherfüllstand lässt sich somit ein entsprechender Jahrgang für die Temperaturrandbedingung erstellen.

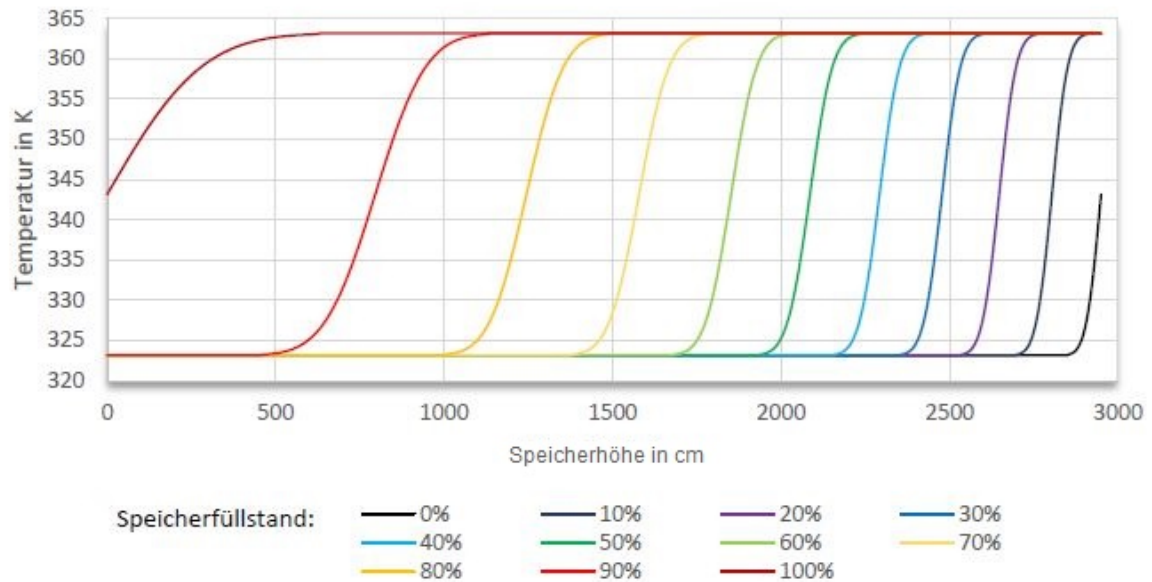


Abbildung 3: Vertikales Temperaturprofil für verschiedene Speicherfüllstände

In Abbildung 4 ist die Einbettung des Jahrgangs des aus den BOFIT-Optimierungsergebnissen abgeleiteten, vertikalen Temperaturprofils in COMSOL Multiphysics® dargestellt.

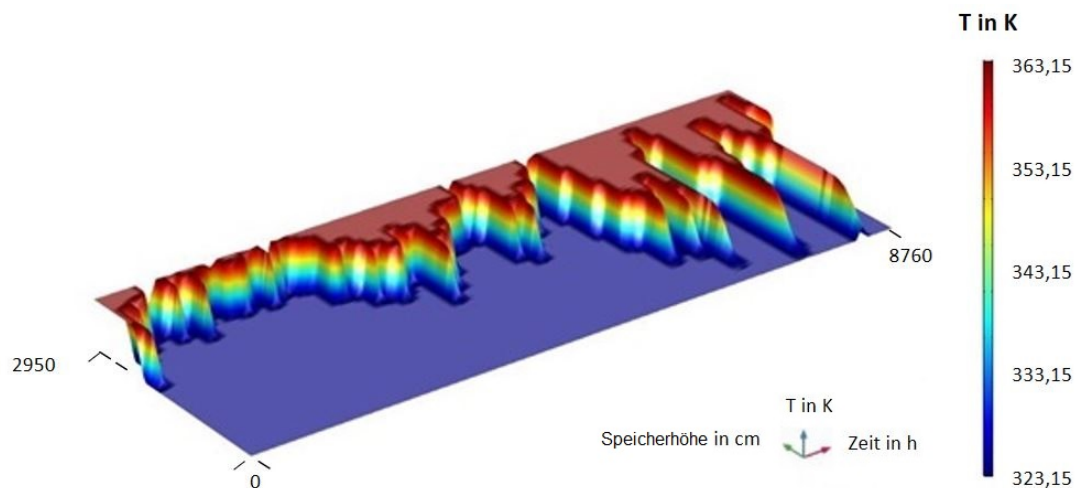


Abbildung 4: Speicherladestand des Multifunktionsspeichers

Netzverfeinerungsstudie und Netzanpassung

Anhand einer Netzverfeinerungsstudie wurde die für eine hinreichend genaue Darstellung der im Modell stattfindenden physikalischen Prozesse benötigte Anzahl der Netzelemente ermittelt. Im Rahmen dieser Studie wurden fünf unterschiedliche Netze von 12.000 bis 410.000 Netzelementen untersucht. Ein Netz mit knapp 70.000 Netzelementen stellt einen Kompromiss zwischen guten Berechnungsergebnissen, auch hinsichtlich lokal und kurzzeitig auftretender Effekte, und einer geringen Berechnungszeit dar. Im Bereich der Ecke, an welche die Speicherflanke, der Deckel und das Erdreich angrenzen, treten lokal sehr hohe Wärmeströme auf. Um die räumliche Auswirkung dieses Effektes möglichst gering zu halten, wird das Netz an dieser Stelle mittels einer Eckenverfeinerung angepasst (siehe Abbildung 5).

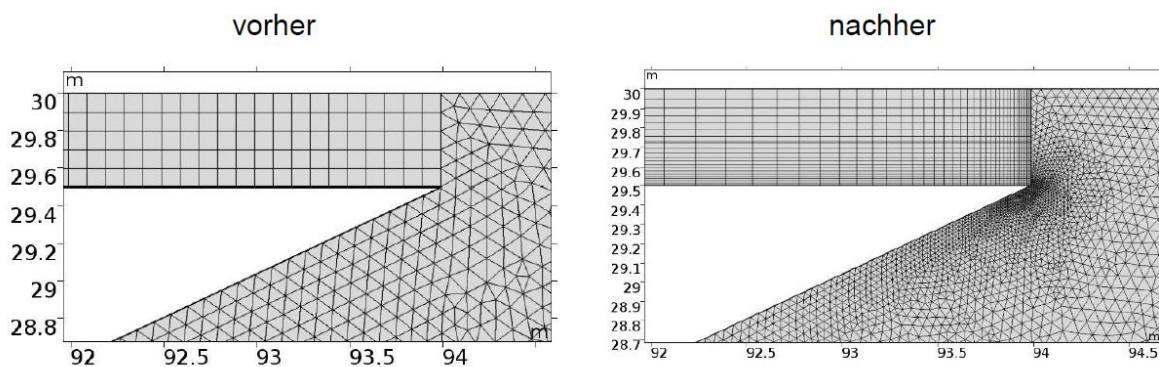


Abbildung 5: Eckenverfeinerung

Um den Einfluss der Außentemperatur auf das Modell auszuwerten und gut darstellen zu können, ist im Bereich der Oberkante des Erdreichs ein feineres Netz erforderlich. Die getroffenen Anpassungen werden in Abbildung 6 dargestellt. Für das übrige Erdreich gilt eine maximale Netzelementgröße von 1 m mit einer angepassten maximalen Netzelementwachstumsrate um den Faktor 1,09.

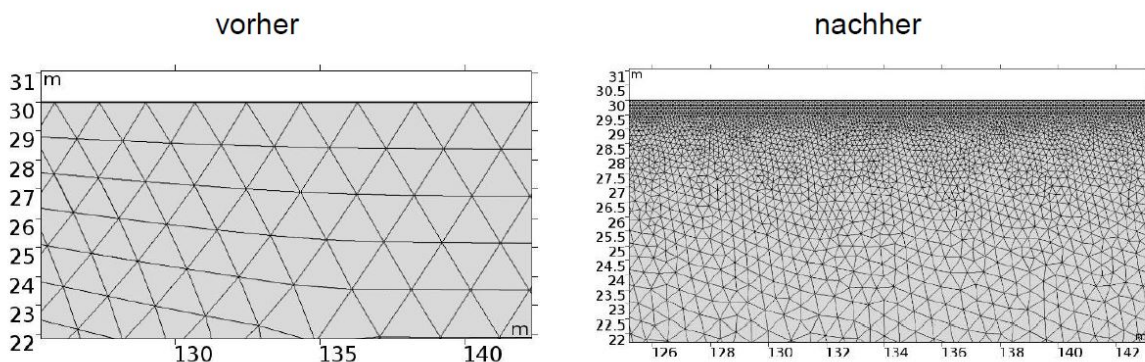


Abbildung 6: Netzverfeinerung an der Erdoberfläche

Im Zuge dieser Anpassungen erhöht sich die Anzahl der Netzelemente. Um diesen Zuwachs zu kompensieren, können Bereiche, in denen weniger komplexe Vorgänge

stattfinden, größer vernetzt werden. Dazu gehört der Bereich unterhalb des Speicherbeckens, sowie der Deckel außerhalb des Bereichs der Eckenverfeinerung. Mit den genannten Anpassungen ergibt sich das in Abbildung 7 dargestellte angepasste Netz. Es besteht aus 83.493 Netzelementen.

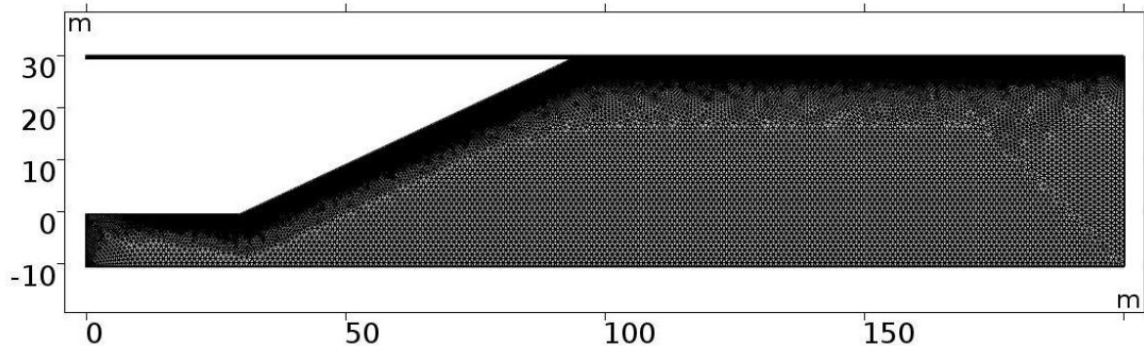


Abbildung 7: angepasstes Netz

Wärmestrombilanzen

Um die Wärmebilanzen (Formel 1 bis 3) des Speichermodells aufzustellen, werden die in Abbildung 8 dargestellten Wärmeströme ermittelt.

$$Q_{\text{Speicher}} = Q_{\text{Boden}} + Q_{\text{Flanke}} + Q_{\text{Deckelunterseite}} \quad (1)$$

$$Q_{\text{Umgebung}} = Q_{\text{Deckeloberseite}} + Q_{\text{Erdoberfläche}} \quad (2)$$

$$Q_{\text{Erdreich}} = Q_{\text{Speicher}} + Q_{\text{Umgebung}} + Q_{\text{Grundwasser}} \quad (3)$$

Die Abbildung 8 ist nicht maßstabsgetreu. Hierbei wird das Erdreich als geschlossener Bilanzraum betrachtet, d. h. die Pfeile geben die Richtung des positiven Wärmestroms an.

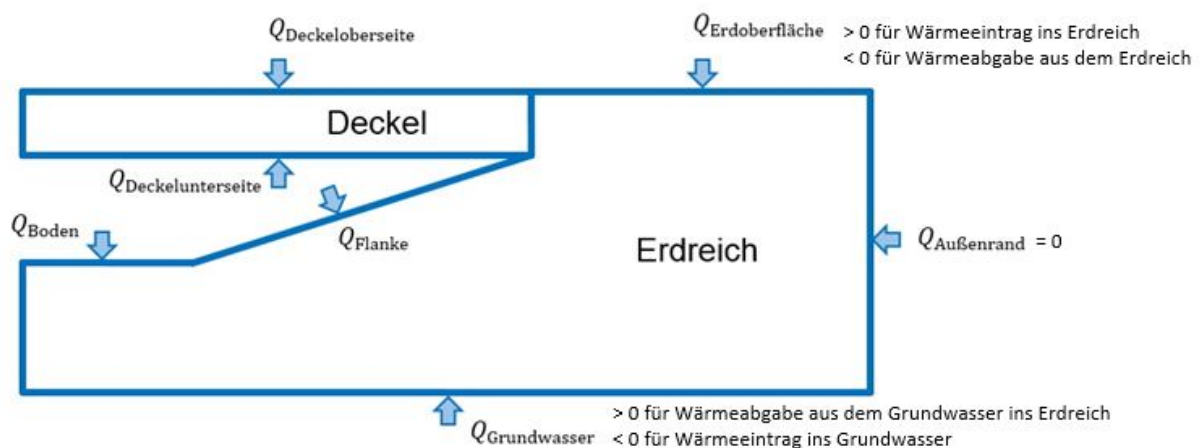


Abbildung 8: Wärmestrombilanzen (nicht maßstabsgetreu)

Ergebnisauswertung Wärmestrombilanzen

Für die Ermittlung von Wärmemengen aus den Wärmeströmen werden die für die einzelnen Zeitschritte an den entsprechenden Rändern anliegenden Wärmeströme über die dazugehörige Zeitschrittweite integriert und für das jeweilige Simulationsjahr summiert.

Der dominierende Anteil der Speicherverluste entfällt auf den Deckel. Dieser liegt jährlich konstant bei 2629 MWh.

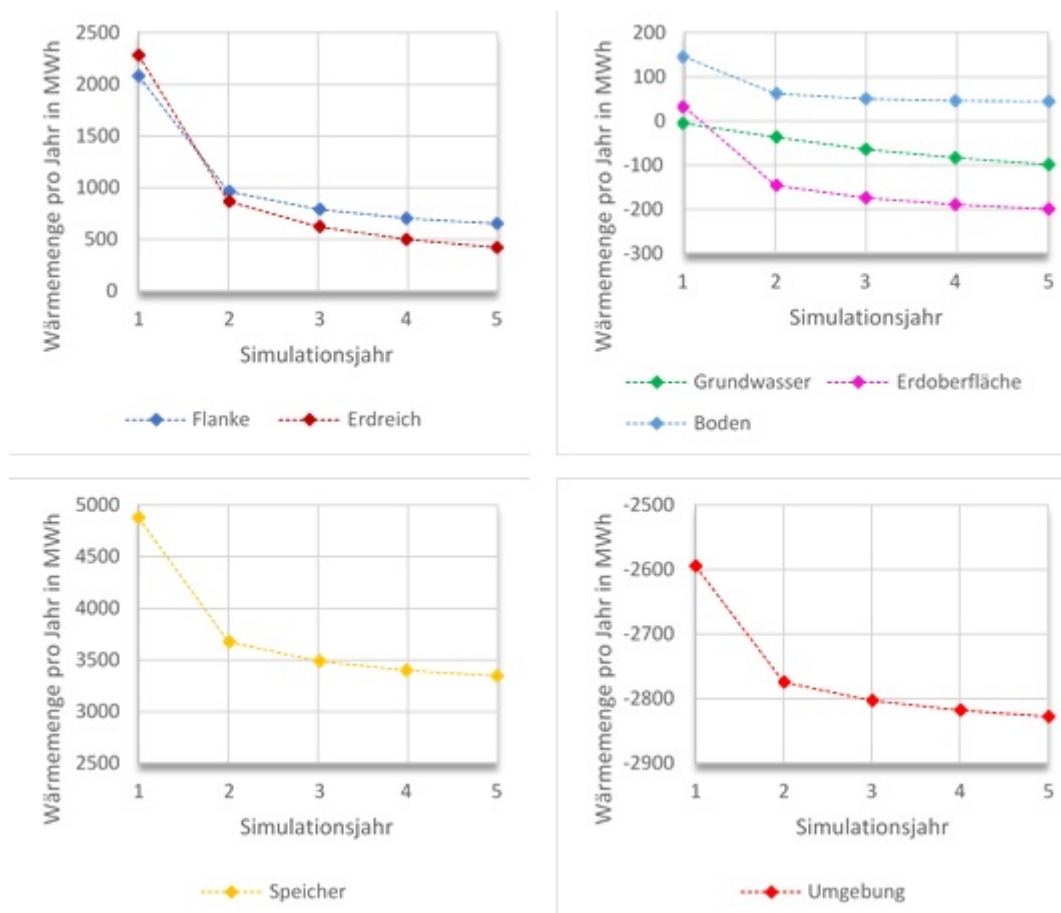


Abbildung 9: An den verschiedenen Rändern übertragene Wärmemengen für die einzelnen Jahre der Fünfjahressimulation mit linear interpolierten Trendlinien

Mithilfe der dargestellten Trendlinien aus Abbildung 9, sowie aus den dazugehörigen Zahlenwerten, können folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Am Boden stellen sich nach dem vierten Simulationsjahr annähernd stationäre Wärmeverluste ein.
- Alle anderen Trendlinien zeigen deutlich, dass die Wärmeströme nach 5 Jahren noch keinen stationären Zustand erreicht haben.

- Die Trendlinie für die Wärmeverluste des Erdreichs an das Grundwasser zeigt im Vergleich zu den anderen Verläufen die geringste Tendenz zum Erreichen eines stationären Zustands. Somit sind für längere Simulationszeiträume an dieser Schnittstelle die größten Wachstumsraten gegenüber den ermittelten Werten zu erwarten.
- Die Wärmeverluste im ersten Jahr sind am größten.
- Die gesamten Speicherverluste haben sich im fünften Jahr um ca. 30 % gegenüber dem ersten Jahr verringert.

Wärmeeintrag ins Grundwasser

Da der durch den Multifunktionsspeicher hervorgerufene Wärmeeintrag in die Grundwasserschicht aus Sicht des Naturschutzes von besonderem Interesse ist, ist in Abbildung 10 der Verlauf von $\dot{Q}_{\text{Grundwasser}}$ dargestellt. Auf der sekundären y-Achse wird die dazugehörige Wärmestromdichte angezeigt.

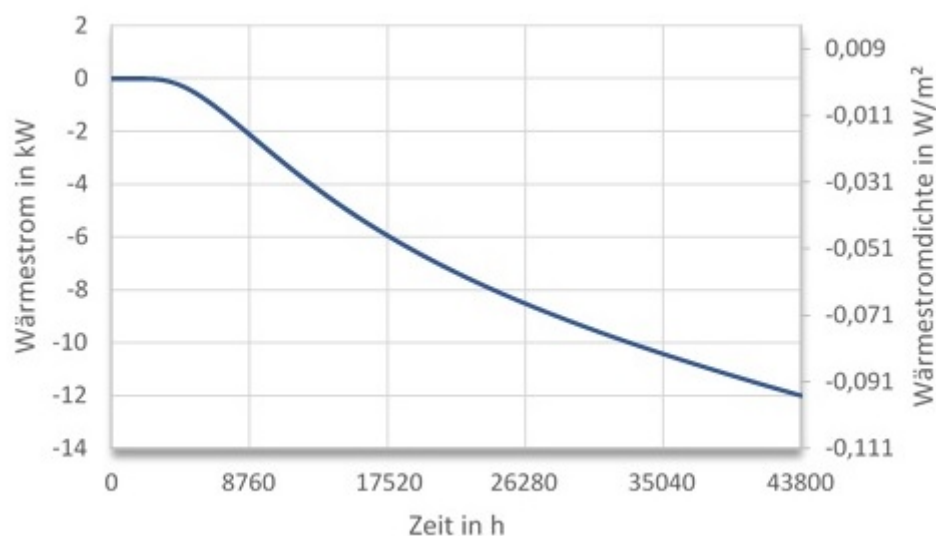


Abbildung 20: Verlauf des Wärmestroms bzw. der zugehörigen Wärmestromdichte

Zwar hat $\dot{Q}_{\text{Grundwasser}}$ wie bereits erwähnt nach fünf Jahren noch keinen stationären Zustand erreicht. Dennoch sind die Werte für die Wärmestromdichte verschwindend gering, sodass selbst bei einer Vervielfachung von $\dot{Q}_{\text{Grundwasser}}$ in den nachfolgenden Jahren der Wärmeeintrag in das Grundwasser als unbedenklich eingestuft werden kann.

Temperaturverteilung im Erdreich nach fünf Jahren

Nach der bilanziellen Auswertung der Wärmeverluste des Multifunktionsspeichers, werden in diesem Abschnitt die sich einstellenden Temperaturbedingungen im Erdreich untersucht.

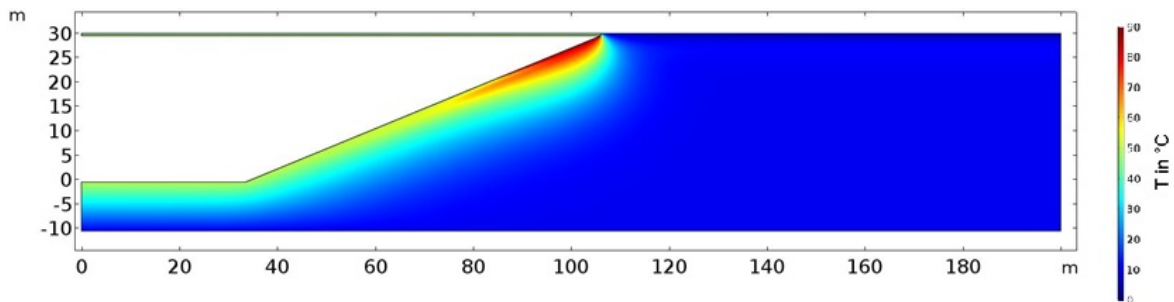


Abbildung 31: Temperaturverteilung im Erdreich nach fünf Jahren (Schnittdarstellung)

In Abbildung 11 ist die sich zum Endzeitpunkt der Fünfjahressimulation einstellende Temperaturverteilung im umgebenden Erdreich dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich das Erdreich in einer mehrere Meter dicken Schicht um den Speicher herum deutlich aufgewärmt hat. Die höchsten Erdreichtemperaturen werden im oberen Bereich unmittelbar an der Speicherflanke erreicht. Dies erklärt sich dadurch, dass hier auf Grund der Temperaturschichtung des Speicherwassers kontinuierlich die höchsten Systemtemperaturen anliegen. Im Folgenden werden die Temperaturbedingungen in ausgewählten Teilbereichen des Erdreichs genauer untersucht.

Temperaturverteilung im speicherfernen Erdreich

In Abbildung 12 sind die vertikalen Temperaturverläufe des fünften Simulationsjahres für einen außerhalb des Einflusses des Multifunktionsspeichers liegenden Schnitt durch das betrachtete Erdreich, jeweils für den ersten Tag des Monats, dargestellt.

- Das Phänomen der Phasenverschiebung kann durch den ermittelten Verlauf gezeigt werden. Ab ca. 8 m unterhalb der Erdoberfläche erreichen alle Verläufe die Temperatur des ungestörten Erdreichs.
- Die Ausprägung der Phasenverschiebung hängt von den Materialkennwerten und der Zusammensetzung des Bodens ab.
- Es kann gezeigt werden, dass die Einbindung der Umgebungsbedingungen in das *COMSOL* Modell realitätsgetreu erfolgt ist.

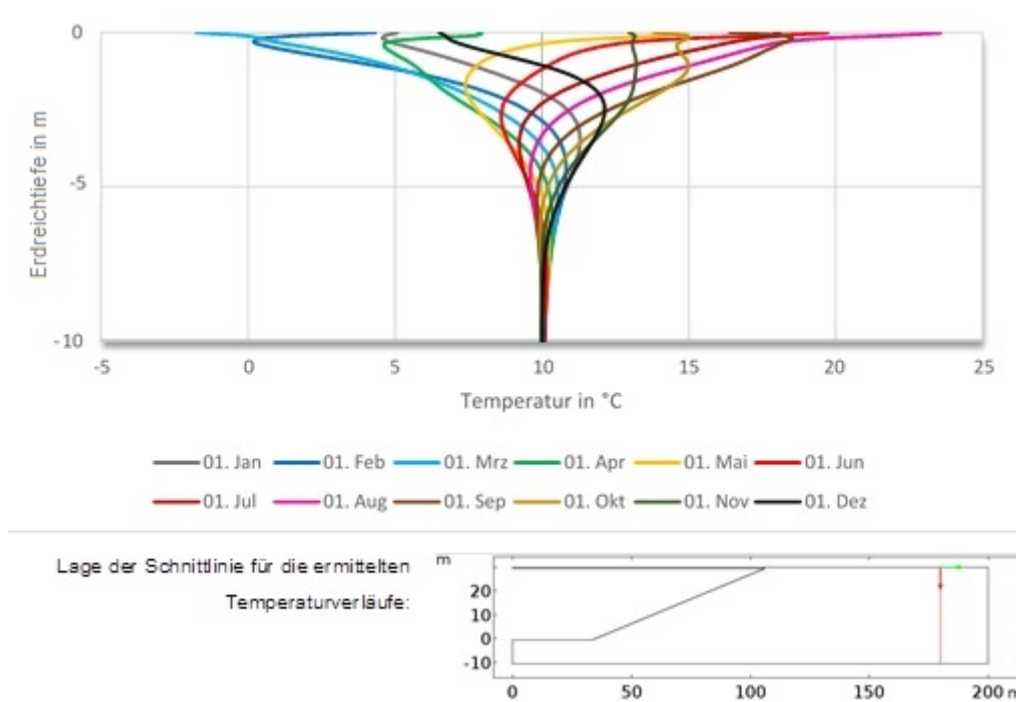


Abbildung 12: Vertikale Temperaturverläufe im speicherfernen Erdreich (180 m Abstand von der Rotationsachse) im Jahreserlauf des fünften Simulationsjahres

Temperaturverteilung im speichernahen Erdreich

Für einen speichernahen Erdreichsschnitt (1 m neben der oberen Speicherkante) zeigen sich grundverschiedene Temperaturverläufe (siehe Abbildung 13).

- 1 m neben dem Speicher erwärmt sich das Erdreich in einem schmalen Abschnitt ($h_{\text{Speicher}} = 25 \text{ bis } 28 \text{ m}$) auf max. 43 °C .
- Im Jahresverlauf sind über die Gesamthöhe des Speichers geringe Temperaturschwankungen von ca. 2 bis 5 K zu erkennen.
- Die Temperatur nimmt mit wachsender Tiefe und auf Grund der Speichergeometrie wachsendem Abstand von der Flanke stetig ab.
- Erst unterhalb des Speichers wird die Temperatur des ungestörten Erdreichs von 10 °C erreicht.

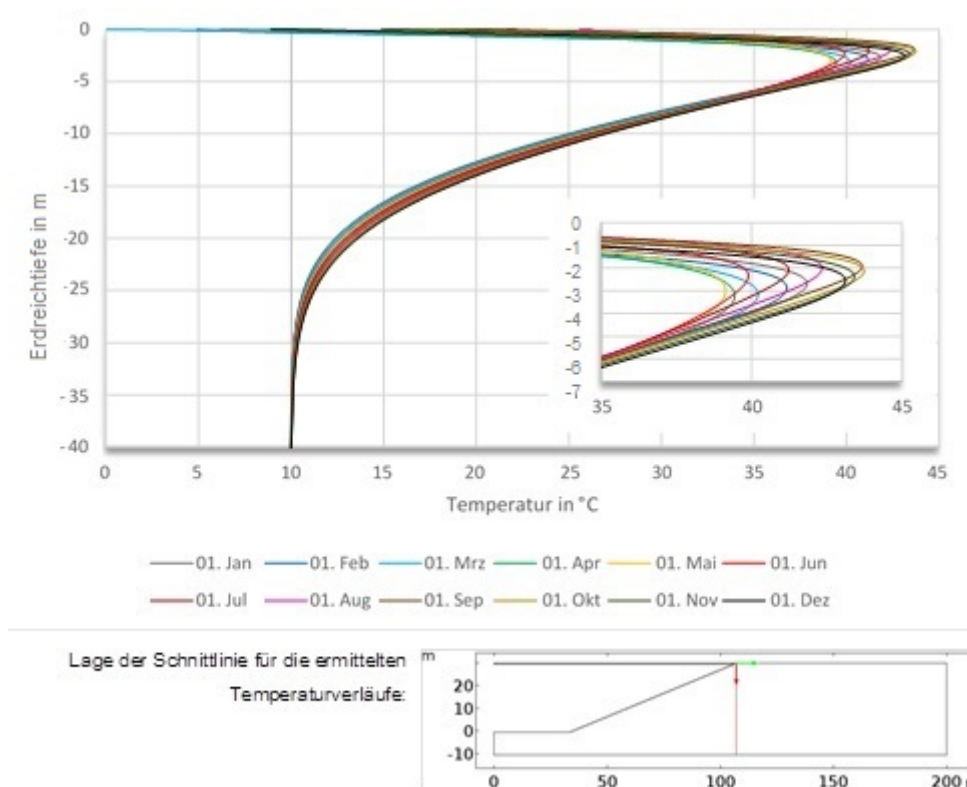


Abbildung 13: Vertikale Temperaturverläufe im speichernahen Erdreich (1 m Abstand vom Speicherrand) im Jahresverlauf des fünften Simulationsjahres

Temperaturverteilung für verschiedene Abstände vom Speicherrand

Um zu untersuchen, bis in welche Entfernung die durch den Multifunktionspeicher hervorgerufene Erwärmung des Erdreichs reicht, sind in Abbildung 14 die vertikalen Temperaturverläufe für verschiedene radiale Entfernungen vom Speicherrand dargestellt. Als Zeitpunkt wurde der 1. Oktober des fünften Simulationsjahres ausgewählt, da hier gemäß der Detaildarstellung in Abbildung 13 mit den höchsten lokalen Temperaturen des Erdreichs zu rechnen ist. Aus den Verläufen wird ersichtlich, dass die Erwärmung des Erdreichs ca. 30 m weit reicht. Weiterhin gilt es zu beachten, dass veränderliche Materialkennwerte des Erdreichs (z. B. variable Erdreichfeuchte) zu grundverschiedenen Ergebnissen führen können.

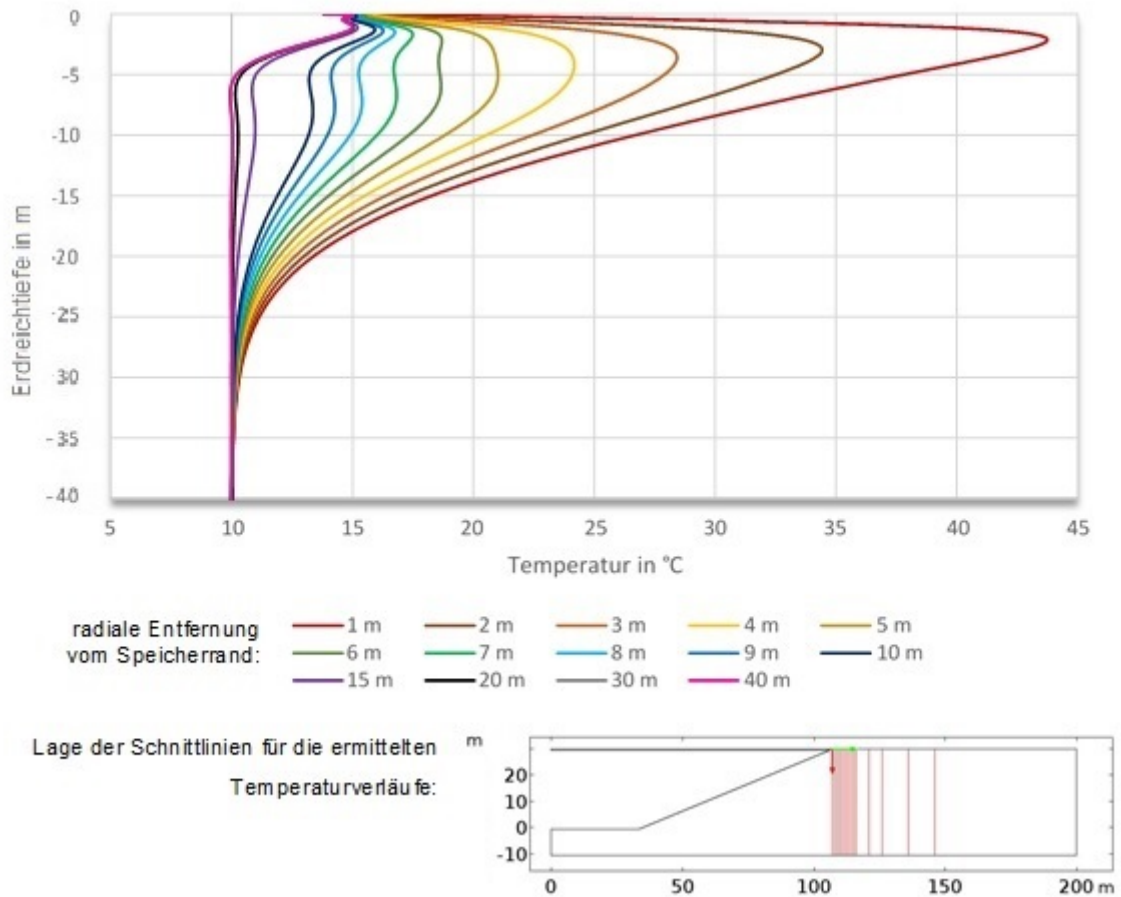


Abbildung 44: Vertikale Temperaturverläufe für verschiedene Abstände vom Speicherrand am 1. Oktober des fünften Simulationsjahres

Temperaturverteilung zwischen Speicherboden und Grundwasserschicht

Abschließend werden die Temperaturbedingungen in der Erdreichschicht zwischen dem Speicherboden und der Grundwasserschicht untersucht. Für verschiedene Zeitpunkte nach dem Start der Fünfjahressimulation sind in Abbildung 15 die sich ergebenden vertikalen Temperaturverläufe dargestellt. Damit kann folgendes gezeigt werden. Die durch den Multifunktionsspeicher hervorgerufene Erwärmung des Erdreichs wird mit wachsender Betrachtungszeit größer und dringt tiefer vor. Bereits nach vier Jahren hat sich ein annähernd linearer Temperaturverlauf eingestellt.

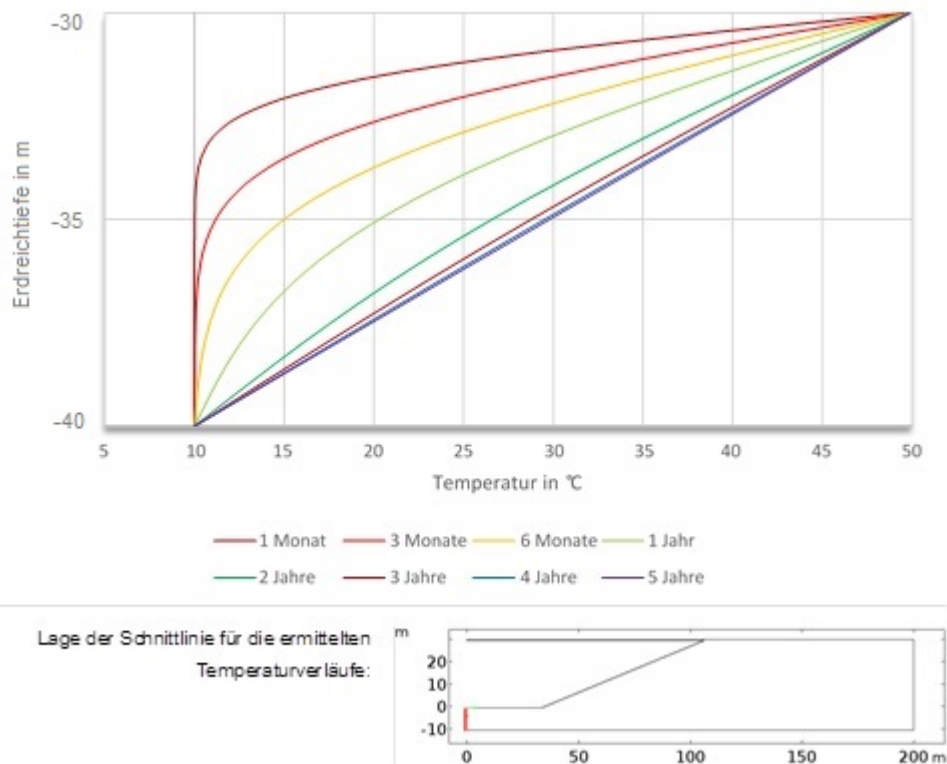


Abbildung 15: Vertikale Temperaturverläufe auf der Rotationsachse zwischen dem Multifunktionspeicher und der Grundwasserschicht für verschiedene Zeitpunkte

Zusammenfassung und Ausblick

Die aus der Simulation gewonnenen Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen. Der dominierende Anteil der Speicherverluste entfällt auf den Deckel. Am Deckel und an der Erdoberfläche unmittelbar neben dem Speicher wurde das größte Optimierungspotential für verstärkte Wärmedämmung identifiziert. Der Wärmeeintrag in das Grundwasser ist gering. Die Erwärmung des Erdreichs reicht ca. 30 m weit und 1 m neben dem Speicher erwärmt sich das Erdreich auf max. 43 °C.

Unter Anderem zeigt sich, dass für die Wärmeverluste des Multifunktionsspeichers nach fünfjährigem Betrieb noch kein stationärer Zustand zu erwarten ist. Auf Grundlage der entwickelten Modelle werden deshalb derzeit detaillierte Folgeuntersuchungen durchgeführt.