

Untersuchung des Vereisungsverhaltens unterschiedlicher Wärmeübertragergeometrien durch CFD-Simulation und Validierung mit Modellaufbauten

S. Paulini¹, T. Plessing¹, D. Brüggemann²

¹ HAW Hof, Institut für Wasser- und Energiemanagement, Hof

² LTTT, Universität Bayreuth, Bayreuth

Abstract

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Optimierung des Vereisungsprozesses in einem Eisspeicher. Der Fokus liegt auf der Betrachtung unterschiedlicher Wärmeübertragergeometrien, durch welche eine Verbesserung des Vereisungsverhaltens erreicht werden soll. Hierfür wurden CFD-Simulationen mit ANSYS Fluent erstellt, welche die Strömungsbedingungen, das Temperaturverhalten und das Wachstum der Eisschicht während des Abkühlvorgangs zu erfassen und zu visualisieren. Die Ergebnisse werden mit Modellversuchen an einem experimentellen Eisspeicher verglichen und validiert. Es konnte gezeigt werden, dass der Wärmeeintrag konventionell verwendeter Technologien durch den Einsatz von effizienteren Geometrien um mehr als 50% gesteigert werden kann.

1. Einleitung

Um den Einsatz fossiler Brennstoffe und die Emission von Treibhausgasen für die Wärmeversorgung in Gebäuden zu reduzieren, sind Wärmepumpen in Kombination mit erneuerbarem Strom eine regenerative Alternative und gewinnen weltweit immer mehr an Bedeutung. Wärmepumpen können mit verschiedenen Wärmequellen wie Luft, Erdwärme, Grundwasser oder Solarthermie versorgt werden. Da Luftwärmepumpen billig und einfach zu installieren sind, werden sie in Deutschland bevorzugt, obwohl der Wirkungsgrad insbesondere in der kalten Jahreszeit begrenzt ist. Eisspeicher ermöglichen es, Erdwärmepumpen mit Temperaturen über -10 °C über einen längeren Zeitraum zu versorgen. Um die Jahresarbeitszahl und die Gesamteffizienz des Wärmepumpensystems zu erhöhen, muss der Eisspeicher voll ausgenutzt werden. Daher müssen die Strömungsverhältnisse im Eisspeicher analysiert werden, denn nur eine homogene Durchmischung der Wassertemperatur während des Vereisungsprozesses ermöglicht einen andauernden gleichmäßigen Wärmeentzug und eine Versorgung der Wärmepumpe mit Temperaturen über 0 °C für längere Zeit. Außerdem kann durch eine homogene Durchmischung und entsprechende Strömungsverhältnisse ein Absinken der 4 °C warmen Wasserschicht und die Ausbildung eines 4 °C -Sumpfes vermieden werden.

Im vorgestellten Projekt wird der Wärmeeintrag in einen solaren Eisspeicher mit einem spiralförmigen und einem sternförmigen Wärmeübertrager und einem Register mit parallelen Platten untersucht. Neben den Modellversuchen am Eisspeicherprüfstand dient die CFD-Simulation zur Erfassung und Visualisierung der Strömungsverhältnisse, des Temperaturprofils und des Eisaufbaus. Ziel ist es, den Wärmeeintrag in den Eisspeicher und den Vereisungsprozess auf den Wärmeübertragerplatten durch Anpassung der Wärmeübertragergeometrie zu optimieren.

2. Randbedingungen

Hauptziel ist es, den gesamten Vereisungsprozess im Eisspeicher zu verbessern. Die konvektive Strömung im Wassertank soll soweit verändert werden, dass eine homogenere Durchmischung im Eisspeichersystem erreicht werden kann. Zudem soll mit den Experimenten und Simulationen untersucht werden, wie der Eisbildungsprozess im Eisspeicher entlang der Wärmeübertrageroberfläche optimiert werden kann. Dadurch, dass das Eis so lange wie möglich parallel zu den Wärmeübertragerplatten aufgebaut wird, nimmt die Temperatur des Rücklaufs der Wärmepumpe langsam ab und die Wärmepumpe kann über einen längeren Zeitraum mit

Temperaturen über $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ versorgt werden. Dies erhöht die Jahresarbeitszahl und damit den Gesamtwirkungsgrad des Wärmepumpensystems. Ein angepasstes Eiswachstum auf den Wärmeübertragerplatten erhöht den Anteil des Wasservolumens, welches vereist werden kann. Die Untersuchungen von Carbonell et al. [1] zeigen, dass Platten aus Polypropylen während des Abkühl- und Vereisungsvorgangs einen niedrigeren Wärmeübergangskoeffizienten aufweisen als flache Platten aus Edelstahl. Die Experimente zeigen auch, dass diese Polypropylenplatten während des Abkühl- und Vereisungsvorgangs einen konstanten Gesamtwärmeübertragungskoeffizienten aufweisen. In Anbetracht dessen, dass der Eisspeicher für langfristige Nutzung ausgelegt werden soll, unterstützt ein stabiler Wärmeübergangskoeffizient eine konstanten Langzeitwärmeentzug aus dem Eisspeicher. Der Einfluss der Wärmeübertragergeometrie auf Strömung, Temperaturschichtung und Eiswachstum wird durch CFD-Simulationen dargestellt und analysiert. Daher werden mit ANSYS Fluent 2D- und 3D-Modelle des Eisspeichers und der Wärmeübertrager erstellt. Die Simulationsmodelle werden durch Modellversuche an einem horizontal geteilten halbkugelförmigen Eisspeicherprüfstand im Maßstab 1: 2 des originalen Eisspeichers validiert. Zur Lösung des numerischen Problems des Phasenübergangs während der Simulationen werden unterschiedliche Lösungsansätze und Methoden verwendet. Einige von ihnen werden in der Studie von König-Haagen et al. verglichen. [2]. Diese Studie zeigt, dass trotz der Verwendung kleiner Simulationsbereiche Fehler zwischen den numerischen Ergebnissen und Referenzlösungen festgestellt werden können. In der folgenden Arbeit wird die Simulation für den gesamten Eisspeicher durchgeführt, sodass Fehler zwischen den Simulationsergebnissen und den Messungen einkalkuliert werden und nur bis zu einem gewissen Grad durch die Veränderung der Lösungsansätze verkleinert werden können.

3. Aufbau und Ergebnisse

Basierend auf vorangegangenen CFD-Simulationen von Paulini et al. [3] wurde ein Modellprüfstand zur Visualisierung des Vereisungsprozesses im Eisspeicher konzipiert. Der Prüfstand besteht aus einer 8-kW-Wärmepumpe mit einer Kälteleistung von 6 kW, einem horizontal geteilten halbkugelförmigen Eisspeicher von $2,5\text{ m}^3$ Wasservolumen und einem kleinen Speicher mit elektrischem Heizstab zur Regeneration des vereisten Speichers (siehe Abbildung 1).



Abb. 1: Eisspeichermodellprüfstand mit Eisspeicherhalbkugel (links), Regenerationswärmespeicher (Mitte) und Wärmepumpe (rechts)

Da in den ersten Versuchen ein großer Einfluss der Umgebungstemperatur auf den Vereisungsvorgang festgestellt wurde, wurde der Eisspeicher isoliert und abgedeckt, um den Wärmeeintrag aus der Umgebung zu reduzieren. Die mit Wasser gefüllten Tanks oberhalb des Eisspeichers wirken der während des Vereisungsprozesses steigenden Auftriebskraft des Eises entgegen und verhindern so ein Aufschwimmen des vereisten Wärmeübertragers. Als Basis für die

ersten Modellversuche wurde ein spiralförmiger Wärmeübertrager mit zwei parallel durchströmten Wärmeübertragerplatten gewählt. Der Eisspeicher wurde im Dauerversuch über die Wärmepumpe so lange abgekühlt und eingefroren, bis die Rücklauftemperatur der Wärmepumpe die Abschalttemperatur von -10 °C erreichte. In einem ersten Modifikationsschritt wurde der spiralförmige Wärmeübertrager durch eine sternförmige Geometrie mit einer Anordnung von 24 Wärmeübertragerplatten ersetzt. Anschließend wurde die Anzahl der Wärmeübertragerplatten von 24 auf 12 Platten halbiert, um den Vereisungsprozess zu verbessern. In einem letzten Modifikationsschritt wurde ein Register mit 12 parallel angeordneten Wärmeübertragerplatten im Eisspeicher untersucht. Sechs Temperatursensoren im Eisspeicher und jeweils ein Temperatursensor im Vor- und Rücklauf des Primärkreislaufs der Wärmepumpe dokumentierten den Vereisungsprozess.

Die Simulation des Phasenwechsels wurde mit dem ANSYS Fluent Solidification and Melting Tool durchgeführt. Die Solvereinstellungen wurden an die Simulationen von Al-abidi et al. [4] und Nayak et al. [5] angelehnt. Zur Lösung der Simulation wurde der druckbasierte Navier-Stokes-Lösungsalgorithmus mit der „absolute velocity formulation“ verwendet. Die Zeiteinstellung wurde auf transient gesetzt, um eine zeitabhängige Lösung zu ermöglichen.

Die Geometrie des spiralförmigen Wärmeübertragers wurde in ein 2D-CFD-Modell im Maßstab 1: 1 übertragen, mit den Randbedingungen der Modellexperimente simuliert und anschließend mit den Daten der Modellexperimente validiert. Das Modell wurde im horizontalen und vertikalen Schnitt durch den Wärmeübertrager und den Eisspeicher simuliert, wie in Abbildung 2 dargestellt.

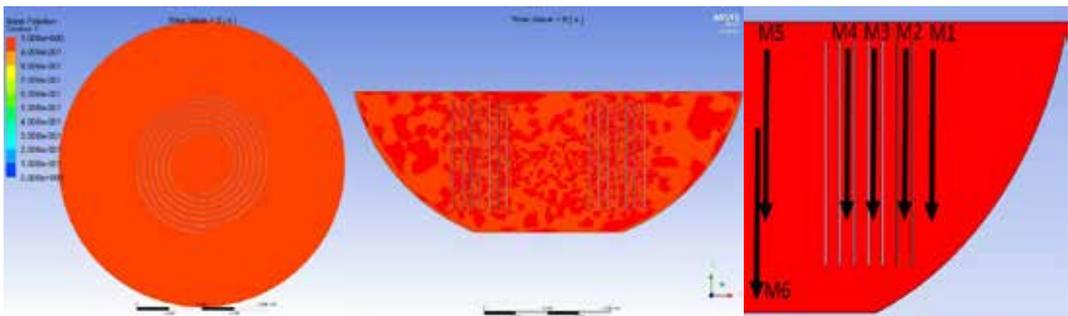


Abb. 2: Horizontaler (links) und vertikaler (Mitte) Schnitt durch den spiralförmigen Wärmeübertrager mit den Temperaturmesspunkten im Eisspeicher (rechts)

Die Temperaturmesspunkte der Simulation wurden an die gleichen Stellen gesetzt wie die Temperatursensoren im Modellprüfstand. Fünf Sensoren wurden in einer horizontalen Reihe angeordnet, um das Temperaturverhalten durch den horizontalen Schnitt des Eisspeichers abzubilden und einer wurde auf den Boden des Eisspeichers gesetzt, um den 4 °C Sumpf am Boden des Speichers abzubilden. Dieser Sumpf ist auf die Dichteanomalie des Wassers zurückzuführen.

Die Temperatur der Wärmeübertragerplatten aus den Modellversuchen wurde als Randbedingung für die Plattentemperatur in den Simulationen implementiert. Die Simulationsmodelle wurden validiert und anhand der Messergebnisse aus den Modellversuchen mit dem spiralförmigen Wärmeübertrager angepasst und verbessert.

Der sternförmige Wärmeübertrager wurde mit einer 3D-CFD-Simulation simuliert. Aufgrund der Radialsymmetrie des Modells wurde nur 1/12 des Eisspeichers in ein Simulationsmodell übertragen. Die modellierte Geometrie mit zwei Wärmeübertragerplatten ist in Abbildung 3 dargestellt.

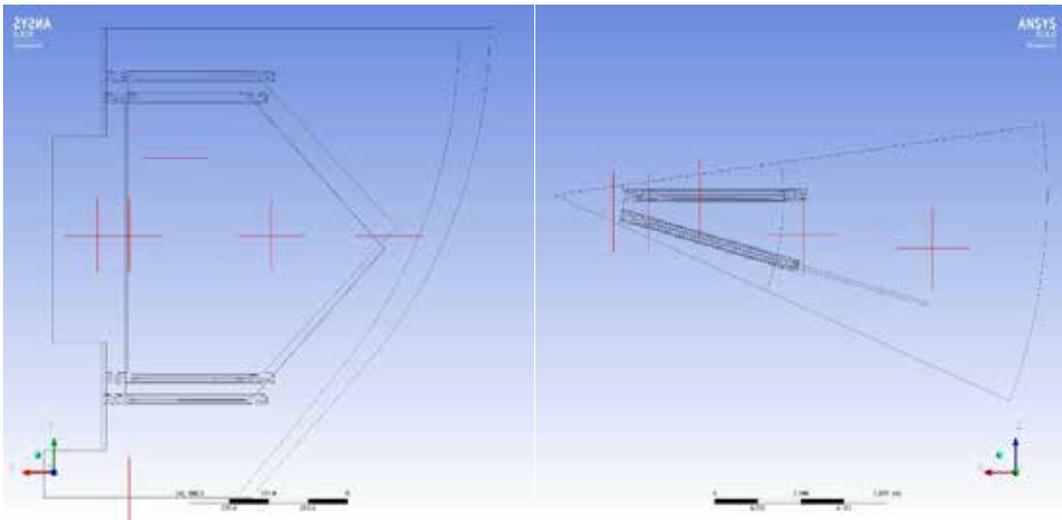


Abb. 3: Anordnung der Temperatursensoren in der Halbkugel für die 3D-Simulation

Die roten Kreuze repräsentieren die sechs Punkte, an denen die Temperatur während der Simulationen aufgezeichnet wird. Sie sind identisch mit den sechs Temperatursensoren im Eisspeichervolumen, bei denen die Temperatur während der Experimente am Modellprüfstand gemessen wird. Ähnlich wie bei der 2D-CFD-Simulation wurde die Wärmeübertragertemperatur aus den Modellversuchen als Randbedingung für die Plattentemperatur in die Simulationen implementiert. Die Simulationsmodelle wurden ebenfalls validiert und anhand der Messergebnisse aus den Modellversuchen mit dem sternförmigen Wärmeübertrager angepasst.

Die Ergebnisse der 2D-CFD-Simulation des spiralförmigen Wärmeübertragers im Vergleich mit den Messungen am Prüfstand sind unten aufgeführt. Die Simulation zeigte eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Modellexperimente vom Prüfstand. Der Temperaturverlauf des Temperaturfühlers 2 bis zum Abschaltpunkt der Wärmepumpe ist in Abbildung 4 dargestellt.

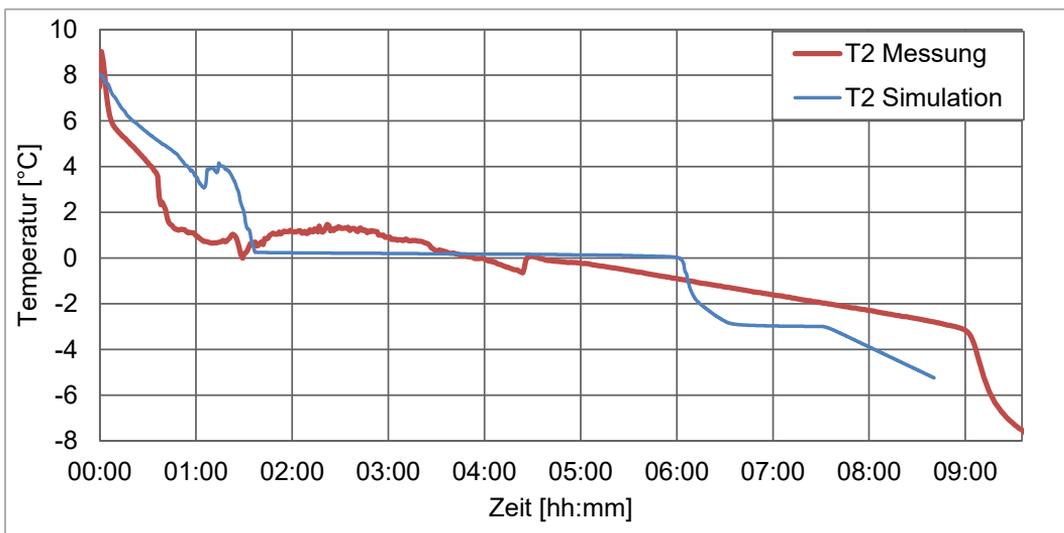


Abb. 4: Vergleich der 2D-Simulation (blau) mit dem entsprechenden Messwert aus den Modellversuchen (rot)

Die latente Wärmeübertragung konnte durch die lange Temperaturstabilität während des Eisaufbaus zwischen 1:30 und 6:00 der Simulationszeit sehr gut in der Simulation abgebildet werden (blaue Linie). Die gemessene Temperatur (rote Linie) zeigt, dass einige Effekte wie Unterkühlung durch die Simulation nur unzureichend beschrieben werden konnten. Trotzdem passt das allgemeine Temperaturverhalten der Simulationen zu den experimentellen Werten. Die abfallende Temperaturlinie des Modellversuchs (rote Linie) zeigt das Eintauchen des Temperatursensors in das Eis. Der Temperaturabfall am Ende der Messaufnahme beschreibt den Punkt, an dem die Eiswände zusammenwachsen. Der Zeitverzug der beiden Kurven lässt sich durch den Wärmeeintrag durch die Kugeloberfläche erklären, welcher in den Simulationen nicht exakt abgebildet werden kann. Zudem ist bei der Berechnung der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität ein Sprung, welcher in der numerischen Lösung immer leichte Abweichungen hervorruft.

Aufgrund der langen Simulationsdauer der 3D-Simulationen wurde der sternförmige Wärmeübertrager nur zu einer qualitativen Auswertung des Eisaufbaus im Vergleich zwischen Simulation und Modellversuchen herangezogen. Der Eisaufbau von Simulation und Modellversuch ist in Abbildung 5 dargestellt.

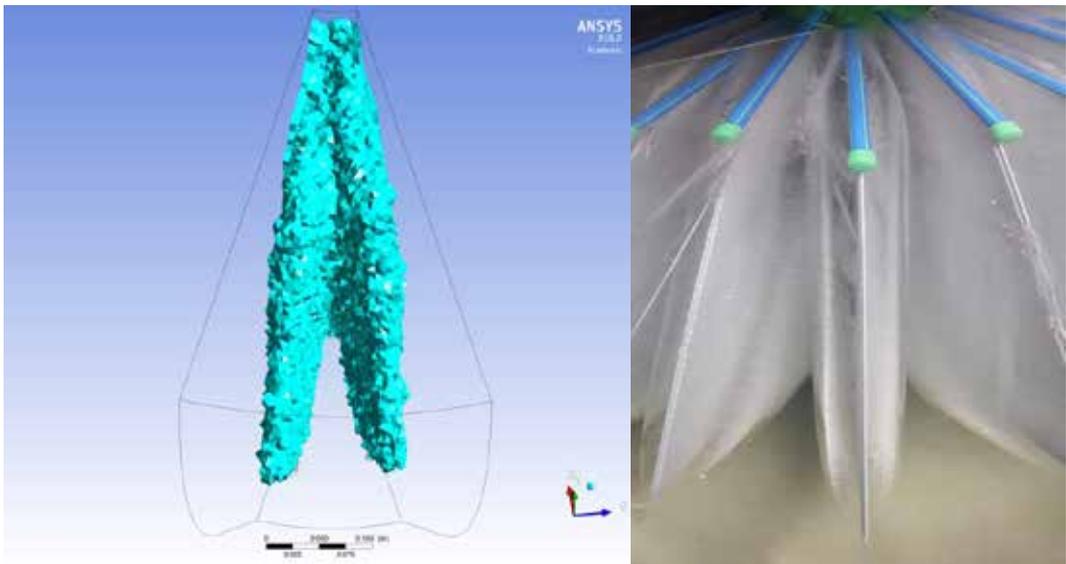


Abb. 5: Vergleich der 3D-Simulation (links) mit dem Eisaufbau im Modellversuch (rechts)

Aufgrund des groben Gitters ist die Oberfläche der simulierten Eisschicht unregelmäßig. Die Simulation ergab ein Eisvolumen von $0,616 \text{ m}^3$ oder 576 kg , während das Experiment zu einer berechneten Eisschicht von etwa 590 kg führte. Sowohl in der Simulation wie auch im Experiment konnte dargestellt werden, dass der Eisaufbau im oberen Drittel der Wärmeübertragerplatten beginnt und sich dann nach oben und unten ausbreitet. Dies führt dazu, dass die Unterseite der Platten auch bei Abbruch des Versuchs noch nicht vereist waren, obwohl an der Oberseite der Platten der Eispanzer schon mehrere Zentimeter dick war. Dies ist auch wieder auf die Dichteanomalie des Wassers zurückzuführen, welche den unteren Bereich des Behälters über einen langen Zeitraum mit $4 \text{ }^\circ\text{C}$ warmen Wasser versorgt.

Im experimentellen Vergleich aller verwendeter Wärmeübertragergeometrien zeigt sich, dass, trotz gleicher Wärmeübertragerfläche, die Geometrie der Wärmeübertrager und ihre Anordnung im Volumen einen starken Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Eisspeichers haben. Der Temperaturverlauf des spiralförmigen Wärmeübertragers im Vergleich mit dem sternförmigen Wärmeübertrager mit 24 Platten und dem Register ist in Abbildung 6 dargestellt.

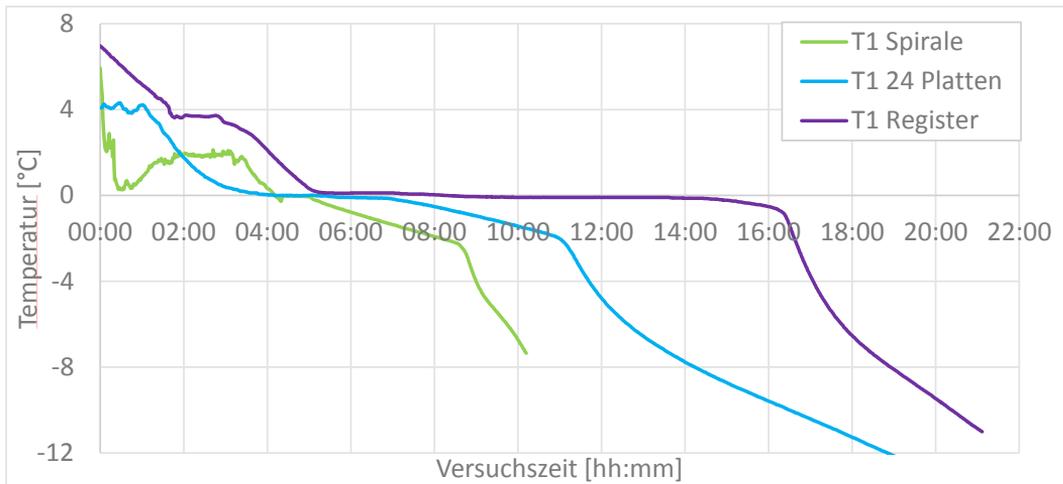


Abb. 6: Vergleich der Temperaturen der unterschiedlichen Geometrien im Dauerversuch bis zum Abschaltzeitpunkt der Wärmepumpe

Die grüne Kurve des spiralförmigen Wärmeübertragers zeigt einen sehr kurzen latenten Wärmeübergang bei 0 °C und die Temperatur fällt anschließend deutlich ab. Nach einer Versuchsdauer von 8,5 Stunden beginnen die Eisschichten zwischen den Wärmeübertragerplatten zusammenzuwachsen. Dies führt zu einem raschen Absinken der Temperatur bis zum Abschaltzeitpunkt der Wärmepumpe, welcher nach 10 Stunden Versuchsdauer erreicht wurde. Durch die schnelle Oberflächenverkleinerung ist im Eis auch nur eine Unterkühlung bis -7 °C möglich. Aufgrund der ungünstigen Geometrie mit den engen Plattenabständen kann während des Versuchs nur ein Bruchteil der zur Verfügung stehenden Wasservolumens vereist werden, was zu einem latenten Wärmeentzug von 50,59 kWh führt.

Beim sternförmigen Wärmeübertrager mit 24 Platten (blaue Kurve) ist der latente Wärmeübergang im Vergleich zum spiralförmigen Wärmeübertrager deutlich länger. Durch den sich nach Außen vergrößernden Plattenabstand verkleinert sich die Oberfläche nur langsam und die Wärmepumpe kann über einen längeren Zeitraum mit Temperaturen oberhalb des Abschaltzeitpunktes versorgt werden. Die Versuchsdauer und der latente Wärmeentzug verdoppeln sich hierbei. Insgesamt können mit dem sternförmigen Aufbau 105,14 kWh latente Wärme zur Verfügung gestellt werden.

Der längste latente Wärmeübergang bei 0 °C konnte bei dem Register beobachtet werden. Hier führt die gute Durchströmung im Volumen und der gleichmäßige parallele Eisaufbau zu einer konstanten Versorgung der Wärmepumpe mit 0°C über fast 10 Stunden. Sobald die Eisschichten zusammenwachsen lässt sich hier ähnlich wie bei dem spiralförmigen Wärmeübertrager ein schneller Temperaturabfall beobachten, welcher auf die sich verkleinernde Oberfläche zurückzuführen ist. Da bei diesem Aufbau das Wasservolumen nicht so optimal wie bei dem sternförmigen Aufbau genutzt werden kann beträgt der latente Wärmeentzug nur 92,52 kWh.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Arbeit zeigt die Modellierung eines Eisspeichersystems mit 2D- und 3D-CFD-Simulationen mit ANSYS Fluent und die Validierung der Simulationsergebnisse mittels Versuchen am Modellprüfstand. Das Temperaturverhalten während des Abkühl- und Vereisungsprozesses im Eisspeicher konnte trotz kleiner Abweichungen durch die 2D-CFD-Simulationen sehr gut abgebildet werden. Der Eisaufbau konnte durch die 2D- und 3D-CFD-Simulationen gut vorhergesagt werden. Die weiterführenden Experimente mit unterschiedlichen Wärmeübertragergeometrien zeigten eine Zunahme des latenten Wärmeentzugs mit Vergrößerung des Abstandes zwischen den einzelnen Wärmeübertragerplatten.

Ein möglichst langer paralleler Eisaufbau führt zu den besten Ergebnissen bei der Versorgung der Wärmepumpe mit 0 °C. Allerdings erwies sich eine nur langsam zusammenwachsende Eisfront als vorteilhaft, wenn eine möglichst große Menge an latenter Wärme entzogen werden soll. Ein plötzliches Zusammenwachsen der Eisfronten und damit eine abrupte Oberflächenverkleinerung sollte möglichst vermieden werden. Für die weitere Geometrieauslegung ergibt sich hiermit ein paralleler Eisaufbau durch angepasste Abstände zwischen den Platten und ein sich nach Außen vergrößernder Plattenabstand.

Zur Verbesserung des Simulationsmodells soll in Zukunft das Registermodell als Geometrie dienen. Dort können Einflüsse über die Rundung des Materials, wie bei dem spiralförmigen Aufbau ausgeschlossen werden. Somit sollte die Genauigkeit zwischen Simulation und Modellversuch weiter angepasst werden können.

Danksagung

Diese Arbeit wurde vom Bayerischen Staatsministerium für Bildung, Wissenschaft und Kunst im Rahmen der Technologie Allianz Oberfranken (TAO) und des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) gefördert. Die Autoren bedanken sich für diese Unterstützung.

5. Literaturverzeichnis

- [1] Carbonell, D., Granzotto, M., Battaglia, M., Philippen, D., and Haller, M. Y. 2016. "Experimental Investigations of Heat Exchangers in Ice Storages for Combined Solar and Heat Pump Systems." In Proceedings of the 11th International Conference on Solar Energy for buildings and Industry, Eurosun.
- [2] König-Haagen, A., Franquet, E., Pernot, E., and Brüggemann, D. 2017. "A Comprehensive Benchmark of Fixed-Grid Methods for the Modeling of Melting." *International Journal of Thermal Sciences* 118: 69-103.
- [3] Paulini, S., Plessing, T. and Brüggemann, D. 2018. "Modeling and Validation of the Ice Growth in an Ice Storage System." *Journal of Energy and Power Engineering* 12: 365-373.
- [4] Al-abidi, A. A., et al. 2013. "CFD Applications for Latent Heat Thermal Energy Storage: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20: 353–63.
- [5] Nayak, A. O., Ramkumar, G., Manoj, T., and Vinod, R. 2011. "Comparative Study between Experimental Analysis and CFD Software Analysis of PCM material in Thermal Energy Storage System." *International Journal of Chemical Engineering and Applications* 2 (6): 401-7