

Bestimmung des Beladungsgrades eines Eisspeichers mittels detaillierter energetischer Bilanzierung

Winfried Juschka, Stefanie Lott, Harald Drück

*Universität Stuttgart - Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und
Energiespeicherung (IGTE), Pfaffenwaldring 6, 70569 Stuttgart*

E-Mail: winfried.juschka@igte.uni-stuttgart.de, Tel.: 0711/685- 63229

*Bernd Hafner, Ralf Dott, Jens Schaumann
Viessmann Climate Solutions SE*

1. Einleitung

Im Projekt Sol4City werden seit Dezember 2019 durch das Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart (Deutschland) gemeinsam mit der Fa. Viessmann Climate Solutions SE (Deutschland) und dem Projektpartner AEE Intec (Österreich) sowie weiteren Industriepartnern aus Österreich, integrierte solare Versorgungskonzepte für klimaneutrale Gebäude der „Stadt der Zukunft“ entwickelt. Die vom IGTE und Viessmann behandelten neuartigen Wärme- und Kälteversorgungskonzepte basieren auf einem Anergienetz, auch kaltes Nahwärmenetz genannt, welches als Wärmequelle für dezentrale Wärmepumpen zur Beheizung bzw. als Kältequelle zur Kühlung von Gebäuden dient. In Kombination mit einem zentralen, saisonalen Eisspeicher und einer adaptiven und modellprädiktiven Systemregelung werden Technologien zur effektiven Nutzung von Solarstrahlung und Umweltwärme weiterentwickelt.

2. Stand der Technik

Der Beladungsgrad eines Eisspeichers ist eine wesentliche Stellgröße für eine optimierte Betriebsführung der in Sol4City behandelten neuartigen Wärme- und Kälteversorgungskonzepte (Dott et al. 2023). Eine zuverlässige und exakte Bestimmung des Beladungsgrades ist daher von zentraler Bedeutung. Gleichzeitig stellt die Bestimmung des Beladungsgrades eine große Herausforderung dar.



Abb. 1: Außenlabor des IGTE mit innenliegendem Versuchseisspeicher

Um den Eisspeicherzustand möglichst exakt für die Systemregelung bereitzustellen, wird primär angestrebt den Beladungsgrad mit einer Genauigkeit von mindestens $G(S_{OC}) \leq \pm 2\%$ zu bestimmen. Eine Genauigkeit von $\pm 2\% < G(S_{OC}) \leq \pm 5\%$ ist gerade noch akzeptabel und eine Genauigkeit von $\pm 5\% < G(S_{OC}) \leq \pm 10\%$ wird als ungenügend betrachtet (vgl. *Juschka et al. 2022*). Bei den Beladungssensoren wird differenziert zwischen einer integralen Bestimmung des Beladungsgrades, d. h. einer kontinuierlichen Bestimmung des Beladungsgrades und einer punktuellen Bestimmung des Beladungsgrades (Beladungsgrad 0 % oder 100 %). Bei der kontinuierlichen Bestimmung des Beladungsgrades wird dieser indirekt mittels der zu- bzw. abgeführten Wärmemenge, der Änderung des Pegelstandes des Wassers im Speicher oder der Messung der Auftriebskraft des Eises im Speicher bestimmt. Die entsprechenden Verfahren sind in *Juschka et al. 2022* beschrieben. In bisherigen Untersuchungen im Forschungsvorhaben Sol4City wurde ein Versuchseisspeicher im Realmaßstab mit einem Volumen von 10 m³ im Außenlabor des IGTE (vgl. Abb. 1) errichtet und intensiv untersucht (vgl. *Juschka et al. 2022*).

3. Detaillierte energetische Bilanzierung von Eisspeichern

Die Bestimmung des Beladungsgrades (engl.: „State of Charge“ bzw. S_{OC}) erfolgt nach Gl. 1 aus dem Quotienten der aktuellen Wärmemenge im Eisspeicher $Q_{ESp,akt}$ und der latenten Wärmekapazität des gesamten Eisspeichers C_{latent} . Als Bezugspunkt bzw. Nullpunkt dient hier Wasser bzw. Eis bei $\vartheta_{latent} = 0\text{ °C}$. Die Bestimmung der aktuellen Wärmemenge $Q_{ESp,akt}$ kann mittels zwei Berechnungsverfahren erfolgen. Die Bestimmung der aktuellen Wärmemenge im Eisspeicher $Q_{ESp,akt,l}$ während der Entladung erfolgt nach Gl. 2 mittels der gesamten latenten Wärmekapazität C_{latent} , der fühlbaren Wärmemenge von Eis $Q_{f\ddot{u}hl, fest}$ und flüssigen Wasser $Q_{f\ddot{u}hl, fl}$ sowie der latenten Wärmemenge Q_{latent} . Die latente Wärmemenge Q_{latent} wird beim Entzug durch den herbeigeführten Phasenwechsel von flüssigem Wasser zu Eis in Form von Kristallisationswärme frei. Beim der Beladung des Eisspeichers muss die Wärmemenge Q_{latent} für den Schmelzvorgang von Eis zu flüssigem Wasser wieder aufgebracht werden. Eine weitere Möglichkeit die aktuelle Wärmemenge im Eisspeicher $Q_{ESp,akt,w}$ zu berechnen zeigt Gl 3. Dabei wird mittels der Entzugs- bzw. Regenerationswärme über den Wärmeübertrager Q_{WT} und mittels der über die Speicherwand Q_{Wand} übertragene Wärmemenge in Form von Wärmegewinnen berechnet. Für die energetische Bilanzierung des Eisspeichers wird Gl. 2 und Gl. 3 zu Gl. 4 als energetische Bilanzgleichung zusammengeführt. Die Wärmekapazitäten der verbauten Materialien wie beispielsweise der Betonbehälter oder der Wärmeübertrager werden vernachlässigt. Bei der messtechnischen Erfassung der jeweiligen Wärmemengen ergeben sich durch die Messgeräte Unsicherheiten, die für die detaillierte energetische Bilanzierung des Eisspeichers von Bedeutung sind. Die Bestimmung der Messunsicherheit ist in *Juschka et al. 2022* beschrieben. Für die Bestimmung der gesamten latenten Wärmekapazität des Eisspeichers ist der Wert der Gesamtmasse an Wasser im Eisspeicher m_{Ges} zu bestimmen sowie deren Messunsicherheit $U(m_{Ges})$. Die Berechnung der latenten Wärmemenge erfolgt nach Gl 5. Die Messunsicherheit der latenten Wärme $U(Q_{latent})$ im Eisspeicher erfolgt mittels der Messunsicherheit bei der Bestimmung der Eismasse $U(m_{fest})$. Die Bestimmung der fühlbaren Wärme des flüssigen Wassers und des Eises im Speicher erfolgt nach Gl. 6.

Die Unsicherheit der fühlbaren Wärmemenge $U(Q_{f\ddot{u}hl,i})$ wird überwiegend durch die Unsicherheit bei der Bestimmung der Masse des flüssigen Wassers $U(m_{fl})$ bzw. der Gesamtmasse des flüssigen Wassers $U(m_{Ges})$ sowie der Eismasse $U(m_{fest})$ bestimmt.

$$S_{OC} = Q_{ESp,akt} \cdot C_{latent}^{-1} \quad \text{und} \quad C_{latent} = m_{Ges} \cdot \Delta h_s \quad \text{Gl. 1}$$

$$Q_{ESp,akt,l} = C_{latent} + Q_{f\ddot{u}hl,fl} + Q_{f\ddot{u}hl,fest} + Q_{latent} \quad \text{Gl. 2}$$

$$Q_{ESp,akt,w} = C_{latent} + Q_{WT} + Q_{wand} \quad \text{Gl. 3}$$

$$0 = Q_{f\ddot{u}hl,fl} - Q_{f\ddot{u}hl,fest} - Q_{latent} + Q_{WT} - Q_{wand} \quad \text{Gl. 4}$$

$$Q_{latent} = m_{fest} \cdot \Delta h_s \quad \text{Gl. 5}$$

$$Q_{f\ddot{u}hl,i} = \sum_{i=1}^{i=n} m_i \cdot c_{p,i} \cdot \Delta \vartheta_i \quad \text{und} \quad m_{fl} = m_{Ges} - m_{fest} \quad \text{Gl. 6}$$

$$Q_{WT} = \int_{t_0}^{t_1} \dot{m}_{fluid} \cdot c_{p,fluid} \cdot (\vartheta_{fluid,in} - \vartheta_{fluid,out}) \cdot dt \quad \text{Gl. 7}$$

und $\Delta \vartheta_{fluid} = \vartheta_{fluid,in} - \vartheta_{fluid,out}$
 $\dot{m}_{fluid} = \dot{v}_{fluid} \cdot \rho_{fluid}(\vartheta)$

mit:

S_{OC}	Beladungsgrad des Eisspeichers (ESp)	[-]
C_{latent}	gesamte latente Wärmekapazität des Eisspeichers	[kWh]
$Q_{ESp,akt,l}$	aktuelle Wärmemenge im Eisspeicher nach Gl. 2	[kWh]
$Q_{ESp,akt,w}$	aktuelle Wärmemenge im Eisspeicher nach Gl. 3	[kWh]
Q_{latent}	Wärmemenge die auf Grund des Phasenübergangs flüssig/fest in der Entzugs- bzw. Regenerationsphase frei wird bzw. aufgebracht werden muss	[kWh]
$Q_{f\ddot{u}hl,i}$	fühlbare Wärmemenge von Wasser im Aggregatzustand i flüssiges Wasser (fl) bzw. Eis (fest)	[kWh]
Q_{WT}	Wärmemenge übertragen über den Wärmeübertrager (WT)	[kWh]
Q_{wand}	Wärmemenge über die Speicherwand in Form von Wärmegewinne	[kWh]
m_{Ges}	Gesamtmasse an Wasser im Eisspeicher	[kg]
m_i	Masse von Wasser im Aggregatzustand i flüssiges Wasser (fl) bzw. Eis (fest)	[kg]
h_s	spezifische Enthalpie von Wasser beim Kristallisations- ($-h_s$) bzw. Schmelzvorgang ($+h_s$) mit $h_s = 344 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	[kJ · kg ⁻¹]
$c_{p,i}$	temp.-abhängige spez. Wärmekapazität von Wasser im Aggregatzustand i flüssiges Wasser (fl), Eis (fest) bzw. vom Wärmeträgerfluid	[kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹]
ρ_{fluid}	temperaturabhängige Dichte des Wärmeträgerfluids	[kg · m ⁻³]
ϑ	Temperatur	[°C]
t_0	Zeitpunkt am Anfang der Messung	[h]
t_1	Zeitpunkt am Ende der Messung	[h]
\dot{m}_{fluid}	Massenstrom des Wärmeträgerfluids	[kg · h ⁻¹]
\dot{v}_{fluid}	Volumenstrom des Wärmeträgerfluids	[kg · h ⁻¹]

Die über den Wärmeübertrager zu- bzw. abgeführte Wärmemenge Q_{WT} wird nach Gl 7 berechnet. Die Unsicherheit $U(Q_{WT})$ ergibt aus der Messunsicherheit des Massstrommessgerätes $U(\dot{m}_{fluid})$ bzw. des Volumenstrommessgerätes $U(\dot{v}_{fluid})$ in Kombination mit einer Temperaturmessung zur Dichtebestimmung sowie einer Temperaturmessung des Fluides in der Zu- und Rückleitung zum Wärmeübertrager zur Bestimmung der Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_{fluid}$ mit der entsprechenden erweiterten Messunsicherheit $U(\Delta\vartheta_{fluid})$. Die über die Speicherwand übertragene Wärmemenge Q_{wand} , die sich als Wärmegewinn oder ggf. auch als Wärmeverlust ergibt, kann durch Bestimmung der anderen Wärmemengen aus Gl 4 ermittelt werden. Die Unsicherheit bei der Bestimmung der über die Speicherwand übertragenen Wärmemenge $U(Q_{wand})$, ergibt sich aus der Summe der einzelnen Unsicherheiten der anderen Wärmemengen aus Gl 4.

4. Versuchseisspeicher im Außenlabor des IGTE

Der Versuchseisspeicher im Außenlabor des IGTE (vgl. Abb. 1) wurde mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet, so dass die direkte Bestimmung des Beladungsgrades sowie eine kontinuierliche indirekte Bestimmung des Beladungsgrades erfolgen kann. Abb. 2 zeigt schematische die Messanordnung am Versuchseisspeicher. In Tabelle 1 sind die Sensoren zur Detektion des Beladungsgrades auf Basis der Auftriebskraft- und Pegelstandsmessung am Versuchseisspeicher aufgeführt. Die punktuellen Beladungssensoren (Sicherheitssensoren) sind aus Gründen der Vollständigkeit in Tabelle 1 und Abb. 2 aufgeführt, werden allerdings in diesem Bericht nicht betrachtet.

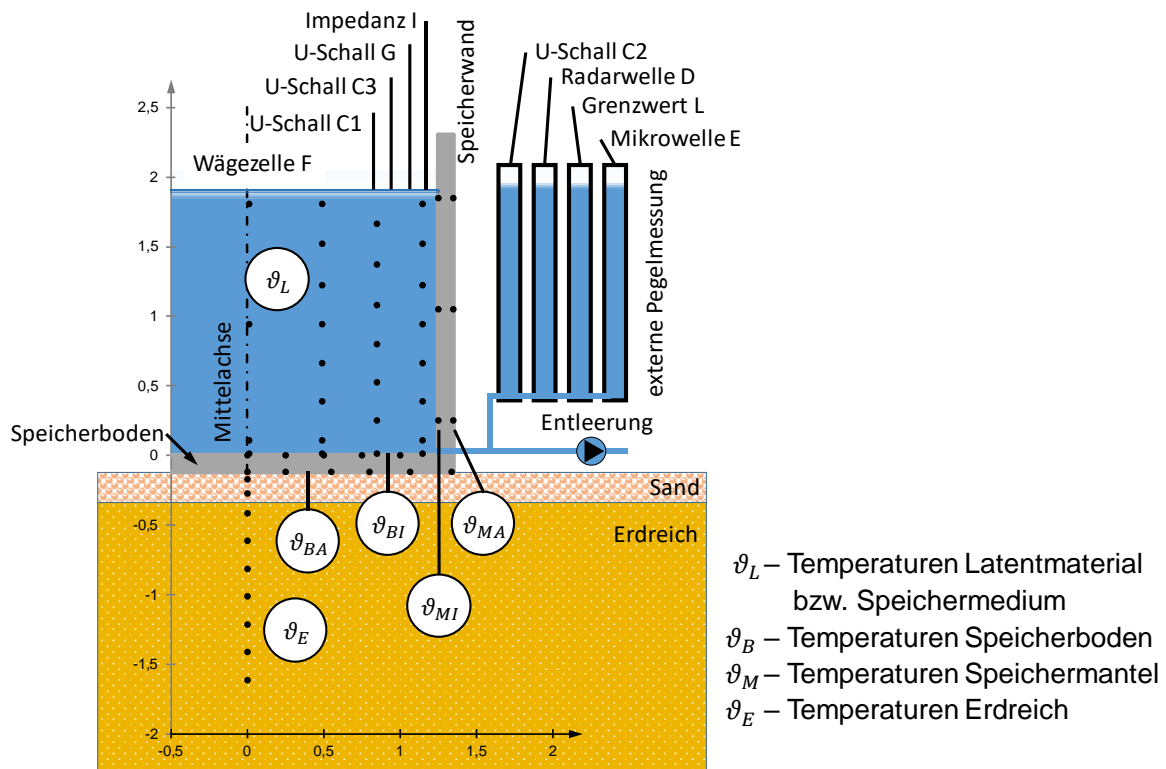


Abb. 2: Messanordnung der Auftriebskraft- und Pegelstandsmessung sowie die Temperaturmessung am Versuchseisspeicher

Tabelle 1: Sensoren zur Detektion des Beladungsgrads am Versuchseisspeicher

Integrale Beladungssensoren	
Pegel bzw. Füllstand (indirekte Eismassenbestimmung, Gl. 5):	
(1) U-Schall Sensor C1, C2, C3 (2) Radarwellen Sensor D (3) geführte Mikrowelle Sensor E (4) U-Schall Sensor G	
Auftriebskraft (indirekte Eismassenbestimmung Gl. 5):	
(5) Wägezelle Sensor F	
Energiebilanz (Wärmemenge über den Wärmeübertrager, Gl. 7):	
(6) Sensor A10 und A11	U-Schall Durchflussmessung mit Pt100 Temperaturmessung
(7) Sensor B	magnetisch-induktive Durchflussmessung mit Pt500 Temperaturmessung
Punktuelle Beladungssensoren (Sicherheitssensoren)	
Grenzpegelsensoren:	
(1) Leitfähigkeit Sensor L (2) Impedanz Sensor I	
Die Sensoren C1 und C3, G und I wurden innerhalb des Speichers positioniert (vgl. Abb. 2). Diese werden daher als interne Sensoren bezeichnet Die Sensoren C2, D, L und E wurden in der externen Pegelmessung außerhalb des Versuchsspeichers positioniert (vgl. Abb. 2). Diese werden daher als externe Sensoren bezeichnet.	

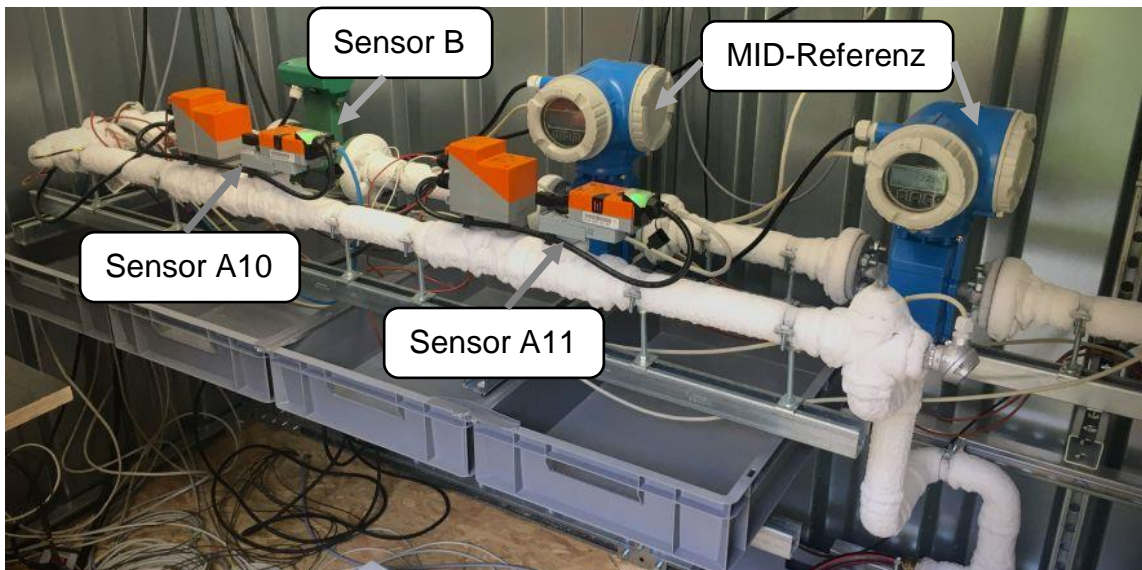


Abb. 3: Versuchsaufbau zur Bestimmung der ab- und zugeführten Wärmemenge über die Wärmeübertrager des Eisspeichers mittels MID-Referenzmessung und zur Bestimmung der Messunsicherheit der Sensoren A10, A11 und B

Tabelle 2: Erweiterte Messunsicherheit des Coriolismassenstrommessgeräts, der Referenzmassenstrommessung $\dot{m}_{Ref,1}$ und $\dot{m}_{Ref,2}$ sowie der Referenztemperaturmessung ϑ_{Ref} mittels kalibrierten Pt100-Widerstandstemperaturfühlern

	Coriolis	Referenzmassenstrom		Referenztemperatur
		$\dot{m}_{Ref,1}$	$\dot{m}_{Ref,2}$	ϑ_{Ref}
Messbereich	$100 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \leq \dot{m}_{fluid} \leq 1.000 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$			$-15^\circ\text{C} \leq \vartheta_{fluid} \leq 40^\circ\text{C}$
erweiterte Messunsicherheit	$U(\dot{m}_{fluid})$ bzw. $U(\vartheta)$	$\pm 2,4 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$	$\pm 4,3 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$	$\pm 0,06 \text{ }^\circ\text{C}$

Im Außenlabor des IGTE wurde ein Messcontainer mit entsprechender Hydraulik für den Betrieb des Versuchseisspeichers aufgebaut (vgl. Abb. 1, Messcontainer links im Bild). Die über den Wärmeübertrager des Eisspeichers ab- und zugeführten Wärmemenge Q_{WT} (vgl. Gl. 7) werden üblicherweise mit Wärmesensoren, bestehend aus einem Volumenstromsensor in Kombination mit zwei Temperatursensoren, je einem in der Zu- und Rückleitung, ermittelt. Für die Bestimmung der Messunsicherheit der Wärmesensoren, d. h. Sensor A10, A11 und Sensor B (vgl. Tabelle 1), wurde eine Referenzmessstrecke aufgebaut um die richtige Wärmemenge $Q_{WT,Ref}$ zu bestimmen. Diese Referenzmessstrecke basiert auf zwei identischen magnetisch-induktiven Volumenstrommessgeräten (MID) und kalibrierten Temperatursensoren (Pt100-Widerstandstemperaturfühler) zur Dichtebestimmung. Mit der Kombination aus MID und Pt100 wird die Referenzmassenströme $\dot{m}_{Ref,1}$ und $\dot{m}_{Ref,2}$ bestimmt. Abb. 3 zeigt die Messstrecke der Referenzmessung sowie die Sensoren A10, A11 und B. Die Überprüfung und Bestimmung der Messunsicherheit der Referenzmassenstrommessung mit zwei identischen MID-Volumenstrommessgeräten in Kombination mit Pt100-Widerstandstemperaturfühlern erfolgt mittels eines kalibrierten Coriolis-Massenstrommessgeräts. Das Coriolis-Massenstrommessgerät wurde mit einer am IGTE vorhanden Kalibriereinrichtung in einem Messbereich von $100 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \leq \dot{m}_{fluid} \leq 1.000 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ kalibriert und die Messunsicherheit bestimmt. Die Pt100 Widerstandstemperaturfühler wurden ebenfalls mit einer am IGTE vorhanden Kalibriereinrichtung in einem Messbereich von $-15^\circ\text{C} \leq \vartheta_{fluid} \leq 40^\circ\text{C}$ kalibriert und die Messunsicherheit bestimmt. Die Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der erweiterten Messunsicherheit des Coriolis-Massenstrommessgeräts, der Referenzmassenstrommessung sowie der Referenztemperaturmessung mittels kalibrierten Pt100-Widerstandstemperaturfühlern.

5. Latente Wärmemenge auf Grund des Phasenwechsels

Die Berechnung der im Versuchseisspeicher freiwerdende latente Wärmemenge auf Grund des Phasenwechsels beim Entzug erfolgt nach Gl. 5 durch die Bestimmung der Eismasse im Eisspeicher. In *Juschka et al. 2022* wurden die Untersuchungen am Versuchseisspeicher zur Bestimmung der Eismasse und die Berechnung der Genauigkeit bei der Bestimmung des Beladungsgrads $G(S_{oc})$ vorgestellt. Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse der Genauigkeit bei der Bestimmung des Beladungsgrades $G(S_{oc})$ sowie der erweiterten Messunsicherheit der Eismasse $U(m_{fest})$ der untersuchten Beladungssensoren im Versuchseisspeicher im Außenlabor des IGTE. Weiterhin zeigt Tabelle 3 die daraus resultierende erweiterte Messunsicherheit der entzogenen latenten Wärmemenge auf Grund des Phasenwechsels $U(Q_{latent})$. Der

richtige Wert der Eismasse und die daraus resultierende richtige entzogene latente Wärmemenge wird mit einer Kranwaage am Ende des Versuches bestimmt (vgl. *Juschka et al. 2022*). Die kleinste erweiterte Messunsicherheit zur Bestimmung der latenten Wärmemenge erreicht der Sensor F mit $U(Q_{latent}) = \pm 26 \text{ kWh}$ (vgl. Tabelle 3). Die baugleichen Sensoren C1 - C3 erreichen eine erweiterte Messunsicherheit von $U_{C1}(Q_{latent}) = \pm 66 \text{ kWh}$, $U_{C2}(Q_{latent}) = \pm 111 \text{ kWh}$ und $U_{C3}(Q_{latent}) = \pm 47 \text{ kWh}$. Für den Sensor D beträgt die erweiterte Messunsicherheit $U(Q_{latent}) = \pm 88 \text{ kWh}$ und beim Sensor G $U(Q_{latent}) = \pm 69 \text{ kWh}$. Bei den Versuchen 1–4 wurde eine mittlere gesamte latente Wärmekapazität des Versuchseisspeichers von $\bar{C}_{latent} = 837 \text{ kWh}$ ermittelt.

Abb. 4 zeigt beispielhaft den Verlauf der Eismasse, die kontinuierlich mit dem Sensor F (Wägezelle) bestimmt wird. Nach einer Entzugszeit von ca. einem $\frac{1}{4}$ Tag beginnt die Eisbildung um die Entzugswärmeübertragerrohre im Eisspeicher. Bei dem Phasenwechsel von flüssigen Wasser zu Eis wird durch den Kristallisationsvorgang latente Wärme Q_{latent} frei. Die freiwerdende latente Wärme Q_{latent} wird über den Wärmeübertrager aus dem Eisspeicher transportiert und die aktuelle Wärmemenge $Q_{Esp,akt,l}$ im Eisspeicher verringert sich (vgl. Gl. 2). Ohne die Betrachtung der fühlbaren Wärme ist der Verlauf der aktuellen Wärmemenge im Eisspeicher dadurch umgekehrt proportional zum Verlauf der Eismasse m_{fest} . Da beim Vereisungsvorgang Luftblasen im Eis eingeschlossen werden, erfolgt die Bestimmung der Eismasse mittels des Sensors F in Abb. 4 und der Sensoren in Tabelle 3 unter Verwendung einer reduzierten Dichte des Eises. Die Vorgehensweise zur Bestimmung der Eismasse und zur Korrektur auf Grund von Lufteinschlüssen wird in *Juschka et al. 2022* erläutert.

Tabelle 3: Genauigkeit bei der kontinuierlichen Bestimmung des Beladungsgrads $G(S_{oc})$, erweiterte Messunsicherheit der Eismasse $U(m_{fest})$ und der entzogenen latenten Wärmemenge auf Grund des Phasenwechsels $U(Q_{latent})$ der untersuchten Beladungssensoren

	Sensor F (Wägezelle)	Sensor C1 (U-Schall)	Sensor C2 (U-Schall)	Sensor C3 (U-Schall)	Sensor D (Radarw.)	Sensor G (U-Schall)
Genauigkeit der Bestimmung des Beladungsgrads* $G(S_{oc})$	$\pm 3 \%$	$\pm 7 \%$	$\pm 12 \%$	$\pm 5 \%$	$\pm 10 \%$	$\pm 7 \%$
Anzahl Versuche N	4	4	3	3	3	2
Erweiterungsfaktor k	3,182	3,182	4,303	4,303	4,303	12,706
erweiterte Messunsicherheit Eismasse $U(m_{fest})$	$\pm 275 \text{ kg}$	$\pm 710 \text{ kg}$	$\pm 1.191 \text{ kg}$	$\pm 502 \text{ kg}$	$\pm 954 \text{ kg}$	$\pm 749 \text{ kg}$
erweiterte Messunsicherheit Wärmemenge $U(Q_{latent})$	$\pm 26 \text{ kWh}$	$\pm 66 \text{ kWh}$	$\pm 111 \text{ kWh}$	$\pm 47 \text{ kWh}$	$\pm 88 \text{ kWh}$	$\pm 69 \text{ kWh}$

* $G(S_{oc}) = U(Q) \cdot C_{latent,Nenn}^{-1}$ mit:

gesamte latente Nennwärmekapazität des Eisspeichers bei 10 m^3 $C_{latent,Nenn} = 928 \text{ kWh}$

Mittlere latente Wärmekapazität des Eisspeichers $\bar{C}_{latent} = 837 \text{ kWh}$ bei den bisherigen Versuchen

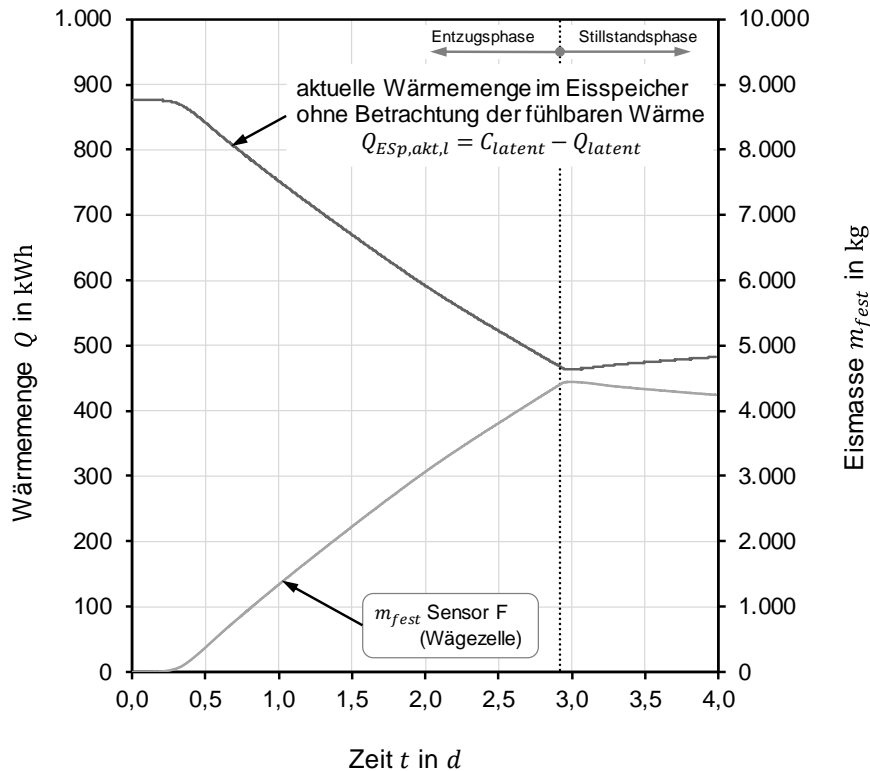


Abb. 4: Verlauf der Eismasse und die daraus resultierende Abnahme der aktuellen Wärmemenge im Eisspeicher auf Grund der frei gewordenen und entzogenen latenten Wärme beim Entzug, ohne Betrachtung der fühlbaren Wärmemenge

6. Fühlbare Wärmemenge von Wasser und Eis im Eisspeicher

Für die Bestimmung der fühlbaren Wärmemenge im Latentmaterial wurden kalibrierte Pt100-Widerstandstemperturfühler im Versuchseisspeicher positioniert. Die Abb. 5 links zeigt die Position der im Versuchseisspeicher sowie unterhalb des Versuchseisspeichers installierten Temperaturfühler und deren Bezeichnung. Für die Berechnung der mittleren Temperatur des Latentmaterials im Versuchseisspeicher wurde die Rotationsfläche des Speichers in 27 Einzelflächen unterteilt. In Abb. 5 rechts ist die Position der Flächen sowie deren Größe in m^2 dargestellt. Die Temperaturmessfühler sind als schwarze Punkte innerhalb der Flächen ebenfalls eingezeichnet. Die Abb. 6 links zeigt beispielhaft den Verlauf der Temperaturen im Versuchseisspeicher in der Reihe 3 (vgl. Abb. 5 links). Von einer anfänglichen Temperatur $6\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \vartheta_{\text{Latent}} \leq 9\text{ }^{\circ}\text{C}$ fallen die Temperaturen an den Messfühlern T_016 bis T_021 nach ca. 0,4 Tagen auf eine Temperatur von $\vartheta_{\text{Latent}} \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ab. Nach ca. 2,5 Tagen erreichen die Temperaturen an den Messfühlern T_020 und T_017 eine Temperatur von $\vartheta_{\text{Latent}} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ und es ist mit Eisbildung in diesem Bereich zu rechnen. Nach 2,9 Tagen wurde der Versuch beendet und es ist innerhalb ca. einer Stunde eine Homogenisierung der Temperatur an den Messfühlern T_020 und T_017 im Eis feststellbar. Die Temperatur des Wassers im Bereich des Messfühlers T_022 (Speicher unten) erreicht bis zum Ende der Entzugsphase eine Temperatur von ca. $\vartheta_{\text{Latent}} = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Anschließend steigt die Temperatur auf ca. $\vartheta_{\text{Latent}} = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ an, was auf Wärmegewinne über den Speicherwand zurückzuführen ist. Abb. 6 rechts zeigt die mittlere flächenbezogene Temperatur des Latentmaterials im Versuchseisspeicher. Die mittlere flächenbezogene Temperatur ist mit einer nicht quantifizierbaren

Unsicherheit belegt, da die Eisbildung im Eisspeicher inhomogen verläuft und die Temperatur nicht über das gesamte Speichervolumen, sondern ausschließlich über die Rotationsfläche, d. h. den halben Speicherquerschnitt, punktförmig gemessen wird (vgl. Abb. 5 links). Der Speicher weist eine mittlere Speichertemperatur am Beginn der Entzugsphase von $\bar{\vartheta}_{latent} = 7,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf und erreicht nach ca. einem halben Tag eine Temperatur von $\bar{\vartheta}_{latent} = 0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nach 2,3 Tagen durchschreitet die mittlere Temperatur die Null Grad Linie. Am Ende der Entzugsphase, d. h. nach 2,9 Tagen, weist der Speicher im Mittel eine Temperatur von $\bar{\vartheta}_{latent} = -0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf. Innerhalb von ca. 2 h weist der Speicher eine mittlere Speichertemperatur von $\bar{\vartheta}_{latent} = 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf und erhöht sich am Ende des Versuches (4. Tag) durch Wärmegewinne aus der Umgebung auf $\bar{\vartheta}_{latent} = 0,13\text{ }^{\circ}\text{C}$.

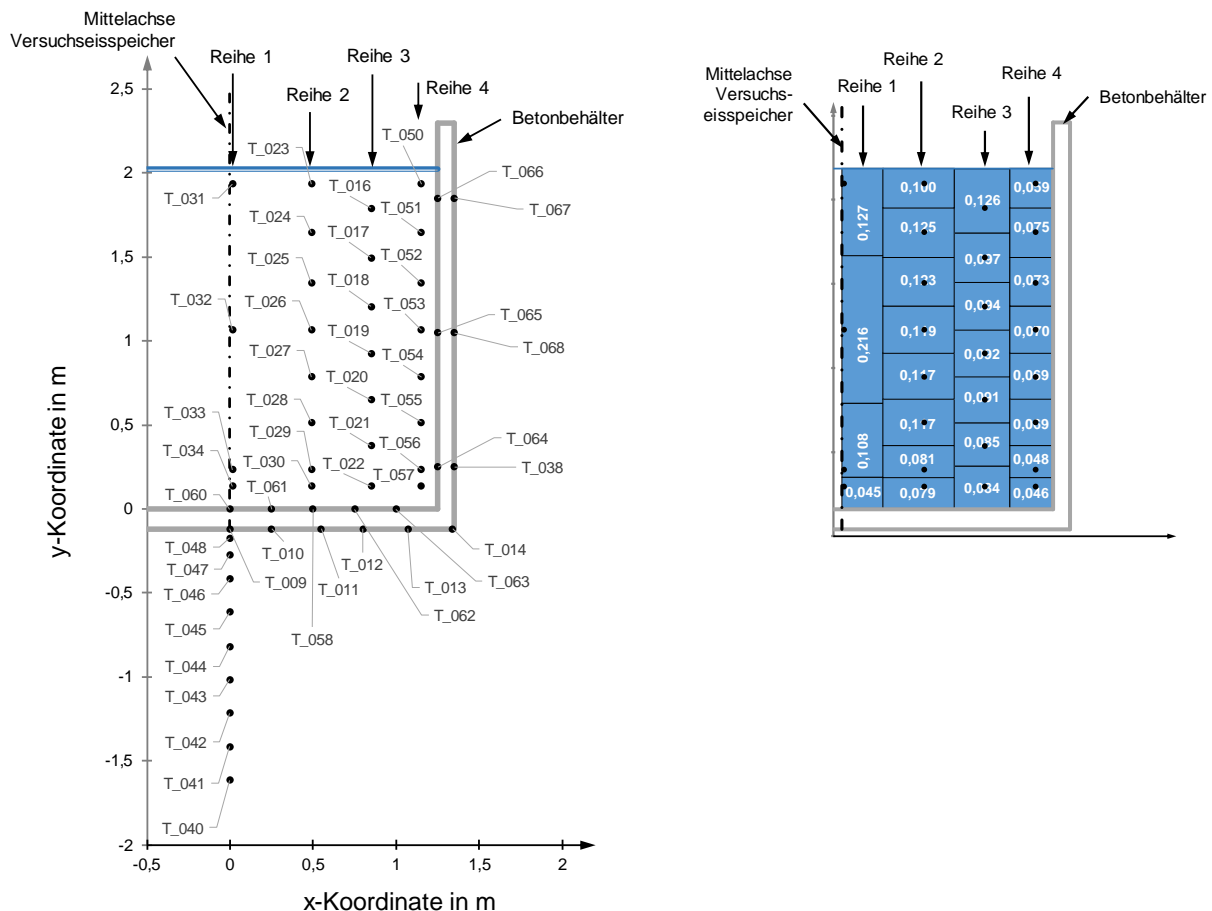


Abb. 5: links: Position der im und unterhalb des Versuchseisspeichers installierten Temperaturfühler und deren Bezeichnung.
 rechts: Position und Größe der Fläche (in m²) zur Berechnung der flächenbezogenen mittleren Temperatur des Latentmaterials im Versuchseisspeicher

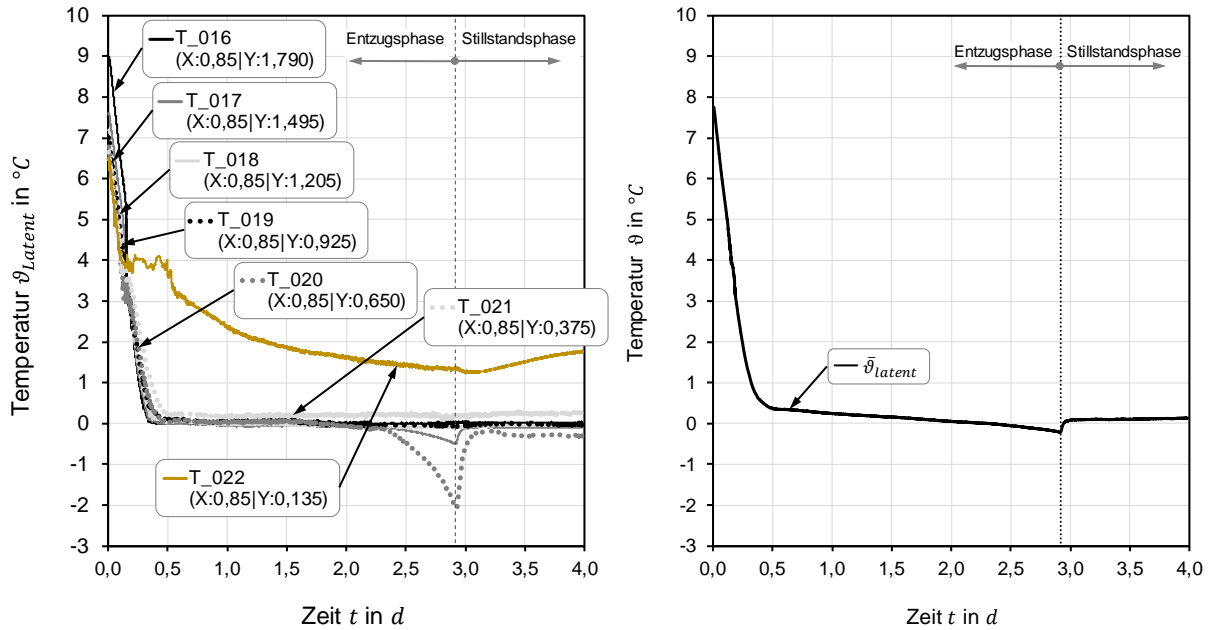


Abb. 6: links: Verlauf der Temperaturen im Versuchseisspeicher an der Position Reihe 3 (X: x-Koordinate in m | Y: y-Koordinate in m).
 rechts: Verlauf der mittleren flächenbezogenen Temperatur im Versuchseisspeicher (vgl. Abb. 5 rechts).

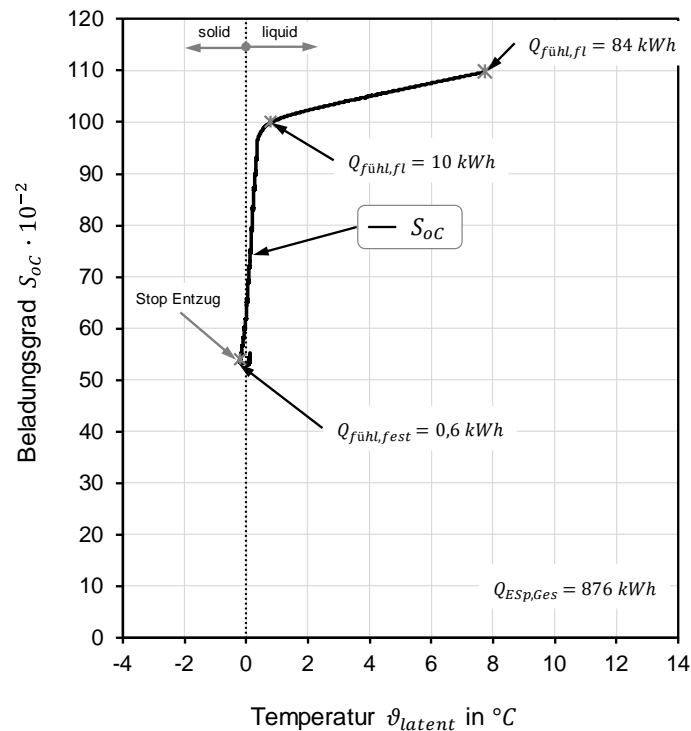


Abb. 7: Verlauf des Beladungsgrads S_{OC} in Abhängigkeit von der mittleren Temperatur im Versuchseisspeicher.

Mittels der latenten Wärmemenge Q_{latent} und der fühlbaren Wärmemenge $Q_{fuehl,l}$ kann die aktuelle Wärmemenge im Eisspeicher $Q_{ESp,akt,l}$ bestimmt und der Beladungsgrad S_{OC} berechnet werden. Abb. 7 zeigt den Verlauf des Beladungsgrads S_{OC} in Abhängigkeit von der mittleren Temperatur im Versuchseisspeicher. Ab einer mittleren

Temperatur von ca. $\vartheta_{latent} = 1\text{ }^\circ\text{C}$ beginnt sich Eis um die Wärmeübertragerrohre zu bilden. An diesem Betriebspunkt ist der Beladungsgrad $S_{oc} = 100\%$ und sein Verlauf fällt bei einem weiteren Entzug nahezu senkrecht ab. Mit der mittleren Temperatur des Latentmaterials kann nach Gl. 6 die fühlbare Wärmemenge des flüssigen Wassers und des Eises ermittelt werden. Beim Start der Entzugsphase besitzt der Eisspeicher auf Grund seiner mittleren Temperatur von $\bar{\vartheta}_{latent} = 7,8\text{ }^\circ\text{C}$ eine Wärmemenge von $Q_{f\ddot{u}hl,fl} = 84\text{ kWh}$. Diese sinkt auf $Q_{f\ddot{u}hl,fl} = 10\text{ kWh}$ bei einem Beladungsgrad von $S_{oc} = 100\%$. Am Ende des Entzugs wird eine fühlbare Wärmemenge des Eises von ca. $Q_{f\ddot{u}hl,est} = 0,6\text{ kWh}$ ermittelt (vgl. Abb. 7). Bei einem Beladungsgrad von $S_{oc} \leq 100\%$ und einer latenten Wärmekapazität von $C_{latent} = 876\text{ kWh}$ (bei $\vartheta_{latent} = 0\text{ }^\circ\text{C}$) liegen die Anteile der fühlbaren Wärme unter 1 % und können somit vernachlässigt werden.

7. Über den Wärmeübertrager übertragene Wärmemenge

Die Rohre der Wärmeübertrager für den Entzug, d. h. die Entladung und die Regeneration, also die Beladung des Eisspeichers sind schneckenförmig über mehrere Ebenen positioniert. Abb. 8 zeigt einen Blick in den Eisspeicher. Die Regeneration erfolgt über die an der Mantelfläche verlegten Rohre, die in Abb. 8 im linken Bereich dargestellt sind. Die vereisten Entzugswärmeübertragerrohre, in Abb. 8 im rechten Bereich dargestellt, sind weiter innen im Eisspeicher positioniert. In diesem Bericht wird nur die Entzugsphase betrachtet. In den Rohren zirkuliert ein

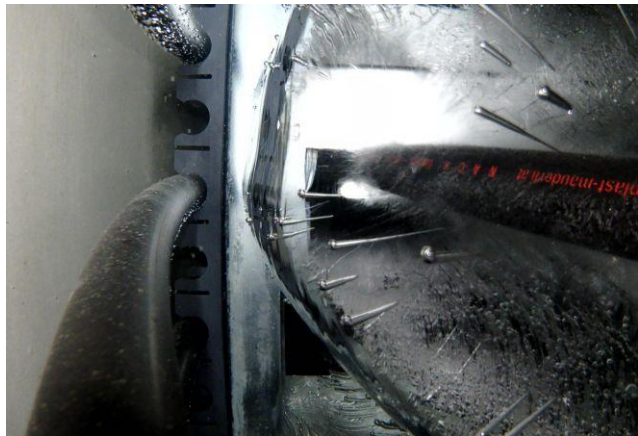


Abb. 8: Blick in den Eisspeicher mit Regenerationswärmeübertragerrohre (links) und vereistem Entzugswärmeübertragerrohre (rechts).

30-prozentiges Glykol-Wasser-Gemisch. Dieses Wärmeträgerfluid wird im realen Einsatz mittels Wärmepumpen unter $0\text{ }^\circ\text{C}$ abgekühlt und entzieht somit Wärmeenergie aus dem Eisspeicher. Bei den in diesem Beitrag beschriebenen Versuchen erfolgt der Wärmeentzug mittels eines Thermostaten. Abb. 9 zeigt das Schema der Messstrecke zur Bestimmung der Wärmemenge, die über den Wärmeübertrager aus dem Eisspeicher entzogen wird. Mit diesem Messaufbau ist es auch möglich die Messunsicherheit der Beladungssensoren A10, A11 und B zu bestimmen (vgl. Tabelle 4). Für die Bestimmung der Messunsicherheit der Beladungssensoren A10, A11 und B wird im Messcontainer ein Bypass geöffnet und die Zu- und Rückleitung zum Eisspeicher verschlossen. Dabei strömt das Wärmeträgerfluid unmittelbar von der Temperaturmessstelle $\vartheta_{Ref,3}$ zu der Temperaturmessstelle $\vartheta_{A11,out}$, ohne den Wärmeübertrager im Eisspeicher zu durchströmen (vgl. Abb. 9 – Bypass nicht dargestellt). Die Untersuchungen fanden somit innerhalb der Bilanzgrenze „Messunsicherheit“ statt. Bei diesen Ergebnissen wird der über den Entzugswärmeübertrager mittels der Beladungssensoren A10, A11 und B bestimmte Massenstrom mit dem mittels Referenzmessung (Ref.) bestimmten Massenstrom verglichen. Mittels des Referenzmesssystems werden zwei baugleiche

Ultraschallvolumenstromsensoren (U-Schall Firma A in Abb. 9 und Abb. 3) sowie ein magnetisch-induktiver Volumenstromsensor (MID Firma B in Abb. 9 und Abb. 3) in Kombination mit Pt100 bzw. Pt500 Temperatursensoren überprüft. Bei den bisherigen Messungen konnte auf die Kommunikationsschnittstelle des Sensors B nicht zugegriffen werden. Daher wurde der Wert der Volumenstrommessung von Sensor B direkt über die analoge Schnittstelle des Sensors ausgelesen. Die Temperaturmessung des Sensors B erfolgt auf Grund von Kommunikationsfehlen hier nicht über die integrierten Pt500-Widerstandstemperaturfühler, sondern über die Referenzmessung der Temperatur. Daher ist für diesen Sensor B hier keine Aussage über die Messunsicherheit bzgl. der Temperatur möglich. Die ermittelte Messunsicherheit des Sensors B bezieht sich nur auf die Volumenstrommessung- bzw. die Massenstromermittlung.

Die Tabelle 4 zeigt die erweiterte Messunsicherheit $U(\dot{m}_{sensor})$ der Beladungssensoren A10, A11 und B, die innerhalb der Bilanzgrenze „Messunsicherheit“ für einen Bereich des Massenstroms von $300 \text{ kg/h} \leq \dot{m} \leq 1.500 \text{ kg/h}$ bestimmt wurde. Außerdem wurde in einem Temperaturbereich von $-15 \text{ °C} \leq \vartheta_{fluid} \leq 40 \text{ °C}$ die erweiterte Messunsicherheit der Temperaturmessung $U(\vartheta_{sensor})$ der Beladungssensoren A10, A11 bestimmt. Für den Sensor A10 wurde eine erweiterte Messunsicherheit der Massenstrombestimmung von $U_{A10}(\dot{m}_{fluid}) = \pm 27 \text{ kg/h}$ ermittelt. Abb. 10 links zeigt für den Sensor A10 die Dichte der Gauß'schen Normalteilung in Abhängigkeit von der Abweichung des Massenstroms. Erkennbar ist eine Abweichung des Maximums der Normalverteilungskurve von dem richtigen Wert bzw. der Richtigkeit der Messung, d. h. der Mittelwert der Messungen weist eine Abweichung um $\Delta\dot{m}_{fluid,A10} = + 11,3 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ zum richtigen Wert auf, der mittels Referenzmessung ermittelt wurde. Für den Sensors A10 wurde eine erweiterte Messunsicherheit der Temperaturmessung von $U_{A10}(\vartheta_{fluid}) = \pm 0,81 \text{ °C}$ ermittelt.

Tabelle 4: Ermittlung der erweiterten Messunsicherheit $U(\dot{m}_{fluid})$, $U(\vartheta_{fluid})$ und $U(\Delta\vartheta_{fluid})$ der Beladungssensoren für einen Bereich des Massenstroms von $300 \text{ kg/h} \leq \dot{m} \leq 1.500 \text{ kg/h}$ sowie für einen Temperaturbereich von $-15 \text{ °C} \leq \vartheta_{fluid} \leq 40 \text{ °C}$, innerhalb der Bilanzgrenze „Messunsicherheit“

	Sensor A10	Sensor A11	Sensor B*
erweiterte Messunsicherheit des Massenstroms $U(\dot{m}_{fluid})$	$\pm 27 \text{ kg/h}$	$\pm 11 \text{ kg/h}$	$\pm 9 \text{ kg/h}$
erweiterte Messunsicherheit der Temperatur $U(\vartheta_{fluid})$	$\pm 0,81 \text{ °C}$	$\pm 0,90 \text{ °C}$	keine Angabe
erweiterte Messunsicherheit der Temperaturdifferenz $U(\Delta\vartheta_{fluid})$	$\pm 0,19 \text{ K}$	$\pm 0,28 \text{ K}$	keine Angabe

* Volumenstrommessung mit Sensor B und Temperaturmessung mittels Temperaturfühler der Referenzmessung

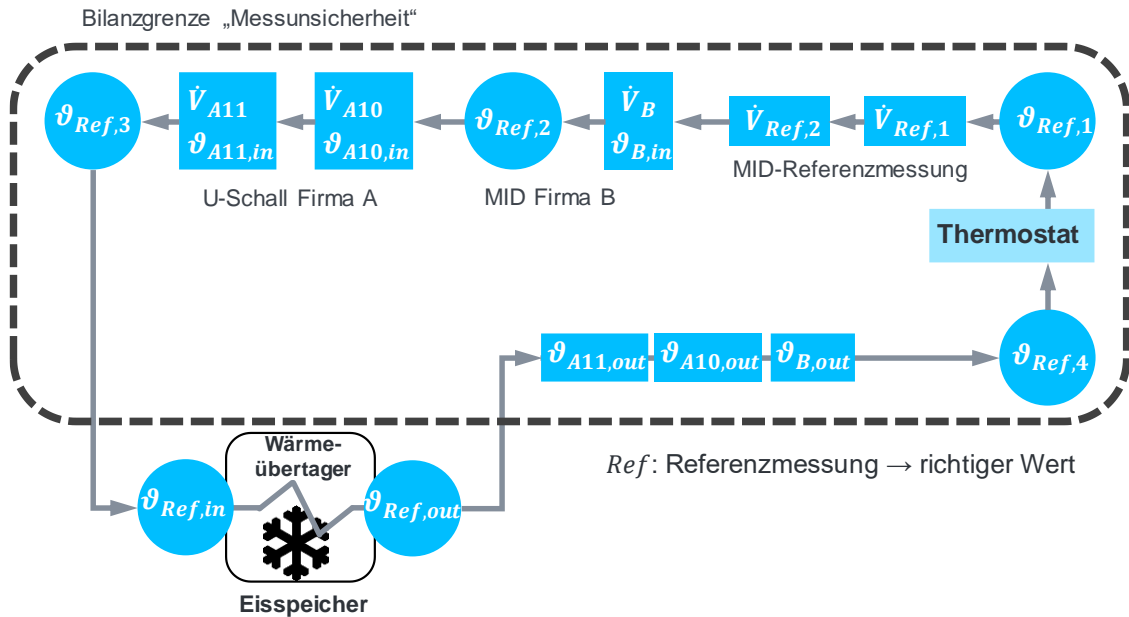


Abb. 9: Schematische Darstellung der Messstrecke zur Bestimmung der Wärmemenge über den Wärmeübertrager Q_{WT} und zur Bestimmung der Messunsicherheit der Beladungssensoren A10, A11 und B

Die Berechnung der Wärmemenge erfolgt nach Gl. 7 aus der Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt. Die erweiterte Messunsicherheit der Temperaturdifferenz für den Beladungssensor A10 wurde mit $U_{A10}(\Delta\vartheta_{fluid}) = \pm 0,19 \text{ K}$ ermittelt. Die erweiterte Messunsicherheit des Massenstroms des Sensors A11 mit $U_{A11}(\dot{m}_{fluid}) = \pm 11 \text{ kg/h}$ ist etwa halb so groß wie die des baugleichen Sensors A10. Der Sensor A11 weist eine erweiterte Messunsicherheit bzgl. der Temperaturmessung von $U_{A11}(\vartheta_{fluid}) = \pm 0,90 \text{ }^\circ\text{C}$ auf. Die Messunsicherheit der Temperaturdifferenz des Sensors A11 mit $U_{A11}(\Delta\vartheta_{fluid}) = \pm 0,28 \text{ K}$ ist um ca. 0,1 K höher als die des Sensors A10 (vgl. Tabelle 4).

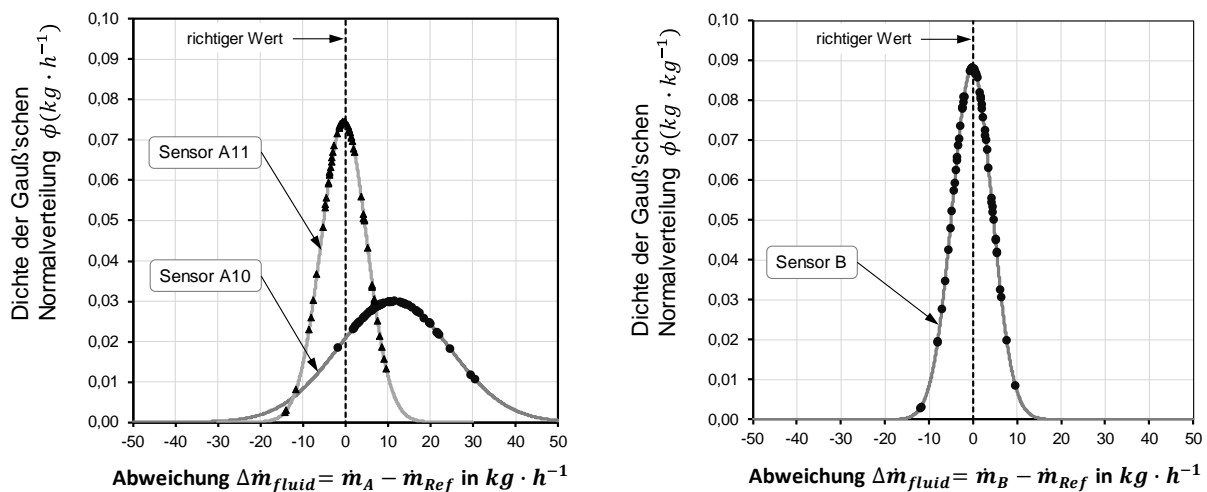


Abb. 10: Dichte der Gauß'schen Normalverteilung in Abhängigkeit von der Abweichung des Massenstroms für die Beladungssensoren A10 und A11 (links) sowie B (rechts) gegenüber der Referenzmessung für einen Bereich des Massenstroms von $300 \text{ kg/h} \leq \dot{m} \leq 1.500 \text{ kg/h}$

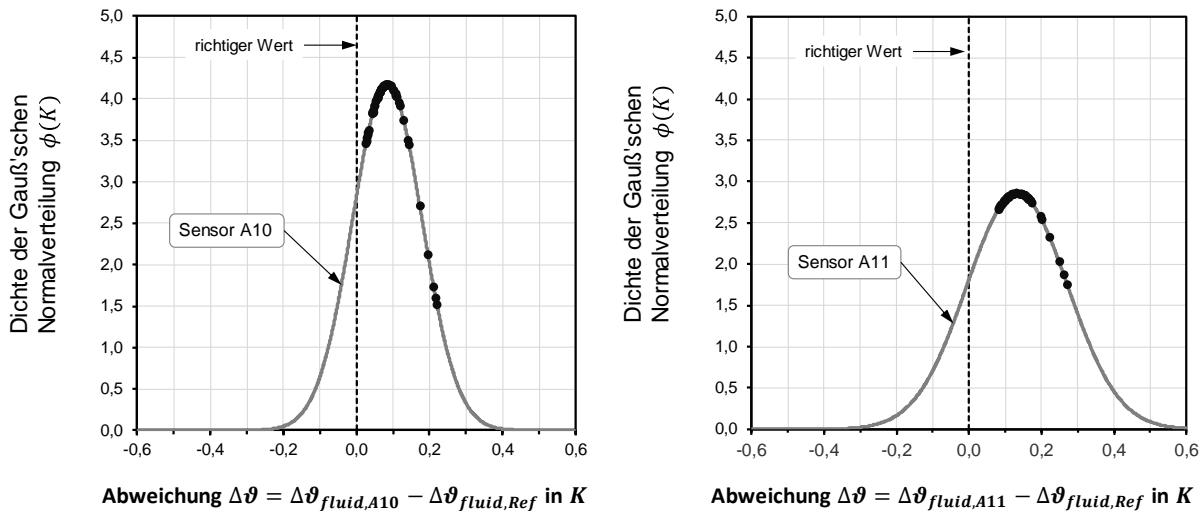


Abb. 11: Dichte der Gauß'schen Normalverteilung in Abhängigkeit von der Abweichung der Temperaturdifferenz der Beladungssensoren ($\Delta\vartheta_{fluid,sensor} = \vartheta_{in,Sensor} - \vartheta_{out,Sensor}$) von der Temperaturdifferenz der Referenzmessung ($\Delta\vartheta_{fluid,Ref} = \vartheta_{in,Ref} - \vartheta_{out,Ref}$) im Temperaturbereich von $-15\text{ °C} \leq \vartheta_{fluid} \leq 40\text{ °C}$ links: Sensor A10 und rechts: Sensor A11, ermittelt innerhalb der Bilanzgrenze „Messunsicherheit“

Für den Sensor B wurde eine erweiterte Messunsicherheit des Massenstroms von $U_B(\dot{m}_{fluid}) = \pm 9\text{ kg/h}$ ermittelt. Da die Temperaturmessung beim Sensor B mittels Referenzmessung erfolgte, kann hier keine erweiterte Messunsicherheit der Temperaturmessung angegeben werden. Abb. 11 zeigt die Dichte der Gauß'schen Normalverteilung in Abhängigkeit von der Abweichung der Temperaturdifferenz für die Sensoren A10 (links) und A11 (rechts). Erkennbar ist, dass beide Sensoren A10 und A11 eine Abweichung zwischen dem Mittelwert der Messungen und dem richtigen Wert aufweisen. Für den Sensor A10 konnte eine Abweichung von $\Delta\vartheta_{fluid,A10} = +0,08\text{ K}$ und für den Sensor A11 von $\Delta\vartheta_{fluid,A11} = +0,13\text{ K}$ zum richtigen Wert, ermittelt werden.

Die Abb. 12 links zeigt die erweiterte Messunsicherheit $U(\dot{m}_{fluid})$ der Beladungssensoren A10, A11 und B für den Massenstrom im Bereich von $300\text{ kg/h} \leq \dot{m} \leq 1.500\text{ kg/h}$ in Abhängigkeit von der Temperatur, ermittelt innerhalb der Bilanzgrenze „Messunsicherheit“. Der Sensor A10 weist gegenüber den Sensoren A11 und B ein höheres Niveau bzgl. der erweiterten Messunsicherheit des Massenstroms im Temperaturbereich von $-15\text{ °C} \leq \vartheta_{fluid} \leq 30\text{ °C}$ auf. Sensor A11 und Sensor B weisen einen ähnlichen Verlauf hinsichtlich der erweiterten Messunsicherheit des Massenstroms über den gesamten Temperaturbereich auf. Innerhalb der Bilanzgrenze „Messunsicherheit“ ist die erweiterte Messunsicherheit der Temperatur $U(\vartheta_{fluid})$ für die Sensoren A10 und A11 (vgl. Abb. 12 rechts) über den Temperaturbereich von $-15\text{ °C} \leq \vartheta_{fluid} \leq 40\text{ °C}$ nahezu konstant.

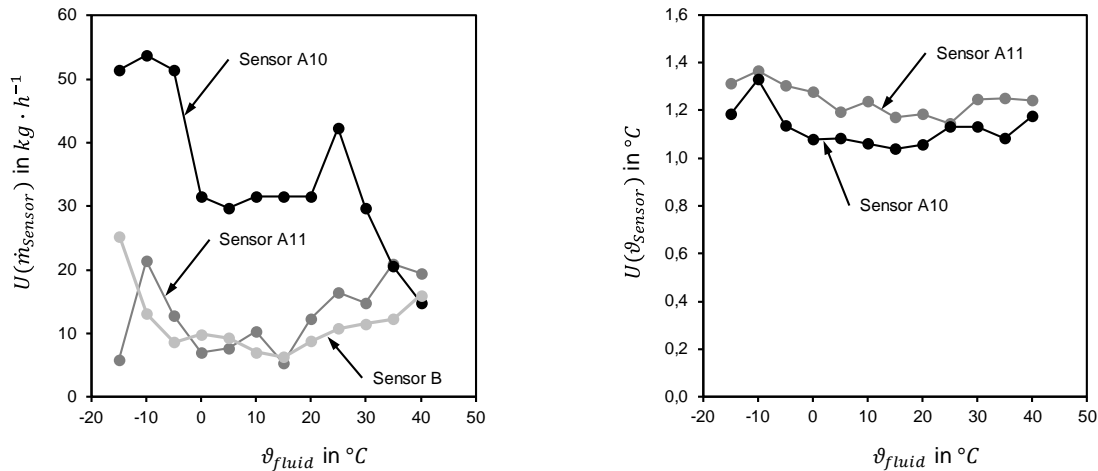


Abb. 12: links: Erweiterte Messunsicherheit $U(\dot{m}_{\text{Sensor}})$ der Beladungssensoren A10, A11 und B für den Massenstrom im Bereich von $300 \text{ kg/h} \leq \dot{m} \leq 1.500 \text{ kg/h}$ in Abhängigkeit von der Temperatur und
 rechts: Erweiterte Messunsicherheit $U(\vartheta_{\text{Sensor}})$ der Beladungssensoren A10 und A11 in Abhängigkeit von der Temperatur

Die Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse der ermittelten Genauigkeit der Beladungssensoren A10, A11 und B zur Bestimmung des Beladungsgrads mittels der entzogenen Wärmemenge aus dem Eisspeicher. Hierbei wurde der Einfluss der Wärmegewinne über die Speicherwand sowie der Zu- und Rückleitung zwischen Messcontainer und Eisspeicher nicht berücksichtigt. Die Genauigkeit ergibt sich somit durch die erweiterte Messunsicherheit der Wärmemenge $U(Q_{WT})$ bzw. des gemessenen Massenstroms $U(\dot{m}_{\text{fluid}})$ und der Temperaturmessung $U(\Delta\vartheta_{\text{fluid}})$ in der Bilanzgrenze „Messunsicherheit“ (vgl. Abb. 9 mit $\Delta\vartheta_{WT, \text{Sensor}} = \vartheta_{\text{Sensor, in}} - \vartheta_{\text{Sensor, out}}$ und $\Delta\vartheta_{WT, \text{Ref}} = \vartheta_{\text{Ref, 3}} - \vartheta_{\text{Ref, 4}}$). Mit den Beladungssensoren A10, A11 und B wird eine Genauigkeit der Bestimmung des Beladungsgrads zwischen $G(S_{OC}) = \pm 4\%$ und $G(S_{OC}) = \pm 8\%$ erreicht. Dies entspricht gegenüber der Referenzmessung einer erweiterten Messunsicherheit der entzogenen Wärmemenge $Q_{WT, \text{Sensor}}$ von $U_{A10}(Q_{WT}) = \pm 74 \text{ kWh}$, $U_{A11}(Q_{WT}) = \pm 43 \text{ kWh}$ und $U_B(Q_{WT}) = \pm 38 \text{ kWh}$. Abb. 13 zeigt die Dichte der Gauß'schen Normalverteilung für die Abweichung der aktuellen Energiemenge $Q_{Esp, akt, w}$ der Beladungssensoren A10, A11 und B gegenüber der Referenzmessung, d. h. dem richtigen Wert auf Basis der durchgeführten Versuche 1 – 4 (vgl. Tabelle 5).

Die Abweichung der Wärmemengen der Sensoren A10, A11 und B zu der Referenzmessung ergibt sich nach Gl. 7 aus den Messgenauigkeiten des Massenstroms $U(\dot{m}_{\text{fluid}})$ und den Temperaturmessung zur Bestimmung der Temperaturdifferenz $U(\Delta\vartheta_{\text{fluid}})$ innerhalb der Bilanzgrenze „Messunsicherheit“. Zu erkennen ist eine Abweichung des Maximums der Normalverteilungskurve von Sensor A10 vom richtigen Wert, d. h. der Mittelwert der Messungen weist eine Abweichung von $\Delta Q_{Esp, akt, w} = -17 \text{ kWh}$ zum richtigen Wert auf. Der Sensor A11 weist eine Abweichung des Mittelwerts von $\Delta Q_{Esp, akt, w} = -12 \text{ kWh}$ und der Sensor B von $\Delta Q_{Esp, akt, w} = +12 \text{ kWh}$ zum richtigen Wert auf.

Tabelle 5: Genauigkeit der Bestimmung des Beladungsgrads und der erweiterten Messunsicherheit $U_{\text{Sensor}}(Q_{WT})$ der Beladungssensoren A10, A11 und B, bestimmt mittels der entzogenen Wärmemenge innerhalb der Systemgrenze „Messunsicherheit“ und ohne Betrachtung der Wärmegewinne über die Zu- und Rückleitung

	Sensor A10	Sensor A11	Sensor B*
Genauigkeit der Bestimmung des Beladungsgrad $G(S_{oc})$	$\pm 8 \%$	$\pm 5 \%$	$\pm 4 \%$
Anzahl Versuche N	3	4	4
Erweiterungsfaktor k	4,303	3,182	4,303
erweiterte Messunsicherheit $U(Q_{WT})$	$\pm 74 \text{ kWh}$	$\pm 43 \text{ kWh}$	$\pm 38 \text{ kWh}$

* Volumenstrommessung mit Sensor B und Temperaturmessung mittels Temperaturfühler der Referenzmessung

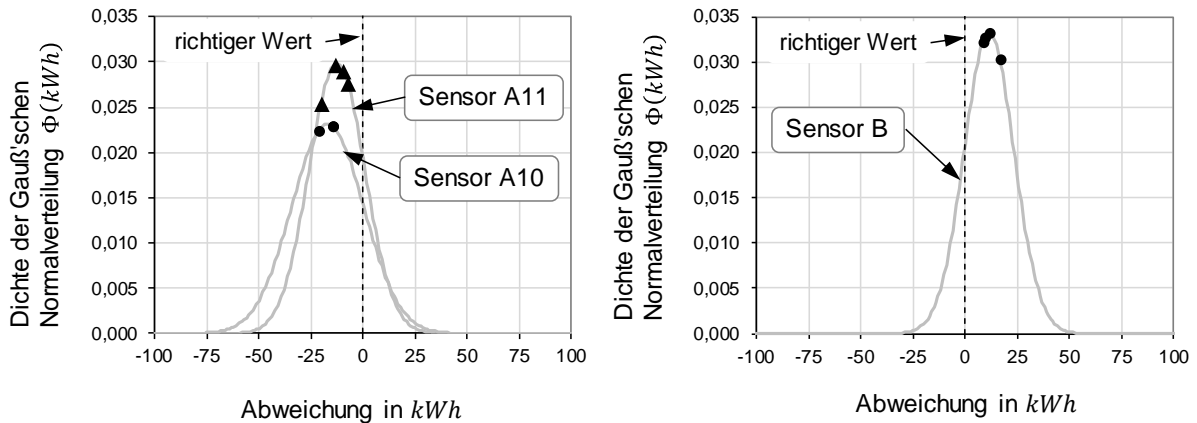


Abb. 13: Dichte der Gauß'schen Normalverteilung der Abweichung der aktuellen Energiemenge im Eisspeicher $Q_{ESp,akt}$ der Beladungssensoren A10, A11 (links) und B (rechts) gegenüber der Referenzmessung auf Basis der durchgeführten Versuche 1 – 4 (Tabelle 5) am Versuchseisspeicher ohne Berücksichtigung der Wärmegewinne der Zu- und Rückleitung, ermittelt innerhalb der Systemgrenze „Messunsicherheit“

Da bei Sensor B die Temperaturmessung mit der Referenzmessung erfolgt, ist die Abweichung allein auf die erweiterte Messunsicherheit der Massenstrommessung zurückzuführen.

Abb. 14 zeigt beispielhaft den Verlauf der aktuellen Wärmemenge im Eisspeicher $Q_{ESp,akt}$ beim Entzug über den Entzugswärmeübertrager, bestimmt mittels der Referenzmessung sowie den Beladungssensoren A10, A11 und B. Während des Versuchs unterbrach die Stromversorgung der Sensoren A10, A11 und B. Daher wurden die Signale nur bis zur Messzeit 2,2 d aufgezeichnet. In dem beispielhaften Versuch in Abb. 14 erfolgt die Bestimmung der Wärmemenge über den Entzugswärmeübertrager mittels Referenzmessung $Q_{WT,Ref}$ durch Messung der Temperaturdifferenz $\vartheta_{WT,Ref} = \vartheta_{Ref,in} - \vartheta_{Ref,out}$ direkt am Entzugswärmeübertrager (vgl. Abb. 9).

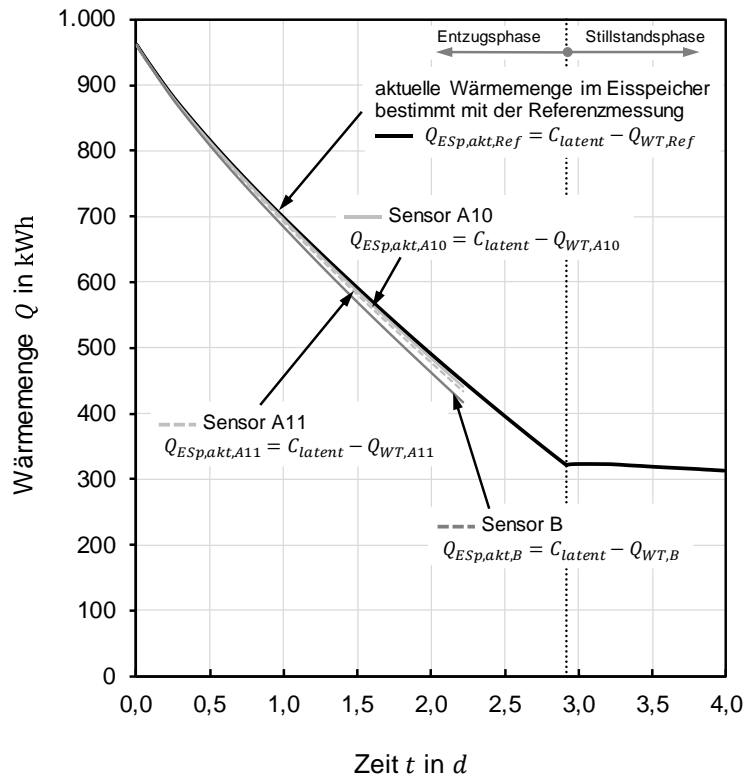


Abb. 14: Verlauf der aktuellen Wärmemenge im Eisspeicher während des Entzugs bestimmt mittels Referenzmessung, sowie mittels der Beladungssensoren A10, A11 und B, ohne Betrachtung der Wärmegewinne durch die Speicherwand und Speicherboden

Beladungssensoren: Wärmemengen Q gemessen innerhalb der Systemgrenze „Messunsicherheit“ mit den Temperaturmessfühlern der Sensoren A10 und A11 bzw. für den Sensor B mit den Temperaturmessfühlern $\vartheta_{Ref,3}$ und $\vartheta_{Ref,4}$
Referenzmessung: Temperaturmessung erfolgt direkt am Entzugswärmeübertrager, Massenstrom innerhalb der Systemgrenze „Messunsicherheit“

Die Entzugswärmemenge der Beladungssensoren $Q_{WT,Sensor}$ erfolgt durch Messung der Temperaturdifferenz $\vartheta_{WT,SensorA} = \vartheta_{Sensor,in} - \vartheta_{Sensor,out}$ bzw. $\Delta\vartheta_{WT,SensorB} = \vartheta_{Ref,3} - \vartheta_{Ref,4}$ im Messcontainer. Die Wärmegewinne über die Zu- und Rückleitung zwischen Messcontainer und Eisspeicher beeinflussen die gemessenen Temperaturen der Beladungssensoren A10, A11 und B. Aus diesem Grund ist die Differenz zwischen Ein- und Austrittstemperatur im Messcontainer etwas größer als die Differenz direkt am Entzugswärmeübertrager. Daher ist bei diesem beispielhaften Versuch die Wärmemenge $Q_{WT,Sensor}$ der Beladungssensoren A und B gegenüber der Referenzmessung ($Q_{WT,Ref}$) auch etwas größer. Tabelle 6 zeigt die Genauigkeit der Bestimmung des Beladungsgrads $G(S_{oc})$ sowie die erweiterte Messunsicherheit $U(Q_{WT})$ der Beladungssensoren A10, A11 und B. Bei dieser Auswertung findet ein Vergleich der an den jeweiligen Temperaturmessstellen im Messcontainer (Sensoren) und direkt am Eisspeicher (Referenzmessung) gemessenen Temperaturen statt. Gegenüber den in Tabelle 5 angegebenen Genauigkeiten und Messunsicherheiten werden in Tabelle 6 die Beladungssensoren A10, A11 und B innerhalb des Bilanzraums „Messunsicherheit“ berechnet (vgl. Abb. 9 mit $\Delta\vartheta_{Sensor} = \vartheta_{Sensor,in} - \vartheta_{Sensor,out}$) und mit der Wärmemenge, die direkt durch die am Entzugswärmeübertrager gemessene Temperaturdifferenz (vgl. Abb. 9 mit

$\Delta\vartheta_{Ref} = \vartheta_{Ref,in} - \vartheta_{Ref,out}$) bestimmt wurde, verglichen. Gegenüber der vorherigen Betrachtung mit Zu- und Rückleitung wird in Tabelle 6 eine höhere Genauigkeit zur Bestimmung des Beladungsgrads für den Sensor A10 von $G_{A10}(S_{oc}) = \pm 2\%$ und für den Sensor A11 von $G_{A11}(S_{oc}) = \pm 4\%$ (im Vergleich Tabelle 5 ohne Betrachtung der Zu- und Rückleitung: A 10 $G_{A10}(S_{oc}) = \pm 8\%$ und A11 $G_{A11}(S_{oc}) = \pm 5\%$) erreicht. Die erweiterte Messunsicherheit kann für den Sensor A10 mit $U_{A10}(Q) = \pm 10 kWh$ und für Sensor A11 mit $U_{A11}(Q) = \pm 41 kWh$ angegeben werden (im Vergleich mit Tabelle 5: A 10 $U_{A10}(Q) = \pm 74 kWh$ und A11 $U_{A11}(Q) = \pm 43 kWh$). Diese „Verbesserung“ der Genauigkeit der Sensoren A10 und A11 ist auf die Wärmegewinne der Zu- und Rückleitung zwischen Messcontainer und Eisspeicher zurückzuführen. In Abb. 13 ist erkennbar, dass die Sensoren A10 und A11 eine negative Abweichung des Maximums der Normalverteilungskurve von vom richtigen Wert aufweisen, d. h. die Sensoren A10 und A11 messen eigentlich eine zu geringe Wärmemenge. In dieser speziellen Anordnung am Versuchseisspeicher wirken sich die Wärmegewinne der Leitungen positiv auf die Genauigkeit aus, da die Wärmegewinne der Zu- und Rückleitung in die Bilanz der Wärmemenge $Q_{WT,A}$ der Sensoren A10 und A11 mit eingeht. Beim Sensor B wird auf Grund eines Fehlers bei der Datenübertragung die Wärmemenge $Q_{WT,SensorB}$ bisher mithilfe der Widerstandstemperturfühler $\Delta\vartheta_{WT,SensorB} = \vartheta_{Ref,3} - \vartheta_{Ref,A}$ der Referenzmessung bestimmt und mit der Wärmemenge der Referenzmessung ($\Delta\vartheta_{WT,Ref} = \vartheta_{Ref,in} - \vartheta_{Ref,out}$) verglichen (vgl. Abb. 9). Dabei gehen die Wärmegewinne der Zu- und Rückleitung mit in die Bilanz der Wärmemenge $Q_{WT,B}$ des Sensors B mit ein. Daher ist die Abweichung der Wärmemenge $Q_{WT,B}$, bestimmt im Messcontainer, gegenüber der Wärmemenge $Q_{WT,Ref}$, bestimmt mit der Referenzmessung direkt am Wärmeübertrager, größer und damit ist auch die erweiterte Messunsicherheit von $U_B(Q) = \pm 119 kWh$ gegenüber Tabelle 5 größer (Tabelle 5: Sensor B $U_B(Q) = \pm 38 kWh$). Die geringere Genauigkeit von Sensor B mit $G(S_{oc}) = \pm 13\%$ (im Vergleich mit Tabelle 5 $G(S_{oc}) = \pm 4\%$) bzw. die größere erweiterte Messunsicherheit $U_B(Q)$ ist auf die zusätzlichen Wärmegewinne der Zu- und Rückleitung zurückzuführen. Zum einen wird der Mittelwert der Messungen von Sensor B zum richtigen Wert hin verschoben (Richtigkeit der Messung) und zum weiteren wird aber die Messunsicherheit erhöht, da die Wärmegewinne über die Zu- und Rückleitung der Versuche 1 – 4 nicht konstant sind.

Abb. 15 zeigt die Dichte der Gauß'schen Normalverteilung über der Abweichung der Wärmemenge für die Beladungssensoren A10, A11 (links) und B (rechts) gegenüber der mittels Referenzmessung ermittelten Wärmemenge. Das Maximum der Normalverteilungskurve von Sensor A10 ist nahezu deckungsgleich mit dem richtigen Wert, d.h. der Mittelwert der Messungen von Sensor A10 weicht um $\Delta Q_{Esp,akt,A10} = + 2,4 kWh$ vom richtigen Wert, d. h. der Richtigkeit der Messung, ab. Eine Abweichung ist auch in Abb. 14 bei dem beispielhaften Verlauf der aktuellen Wärmemenge zwischen dem Sensor A11 und der Referenzmessung zu erkennen. Sensor A11 weist eine Abweichung des Mittelwerts von $\Delta Q_{Esp,akt,A11} = + 12 kWh$ zum richtigen Wert auf. In Abb. 14 ist die leicht höhere Abweichung des Sensor A11 gegenüber dem Sensor A10 bzgl. der aktuellen Wärmemenge erkennbar. Die größte Abweichung weist der Sensor B mit $\Delta Q_{Esp,akt,B} = + 36 kWh$ auf (vgl. Abb. 15 rechts).

Tabelle 6: Genauigkeit der Bestimmung des Beladungsgrads sowie die erweiterte Messunsicherheit $U_{Sensor}(Q)$ der Beladungssensoren A10, A11 und B mit Betrachtung der Zu- und Rückleitung
Beladungssensoren: Wärmemengen gemessen innerhalb der Systemgrenze „Messunsicherheit“ mit den Temperaturmessfühlern der Sensoren A bzw. für den Sensor B mit den Temperaturmessfühlern $\vartheta_{Ref,3}$ und $\vartheta_{Ref,4}$
Referenzmessung: Temperaturmessung erfolgt direkt am Entzugswärmeübertrager, Massenstrombestimmung innerhalb der Systemgrenze „Messunsicherheit“

	Sensor A10	Sensor A11	Sensor B*
Genauigkeit der Bestimmung des Beladungsgrad $G(S_{OC})$	$\pm 2 \%$	$\pm 4 \%$	$\pm 13 \%$
Anzahl Versuche N	3	4	4
Erweiterungsfaktor k	4,303	3,182	4,303
erweiterte Messunsicherheit $U(Q_{WT})$	$\pm 20 \text{ kWh}$	$\pm 41 \text{ kWh}$	$\pm 119 \text{ kWh}$

* Volumenstrommessung mit Sensor B und Temperaturmessung mittels Temperaturfühler der Referenzmessung

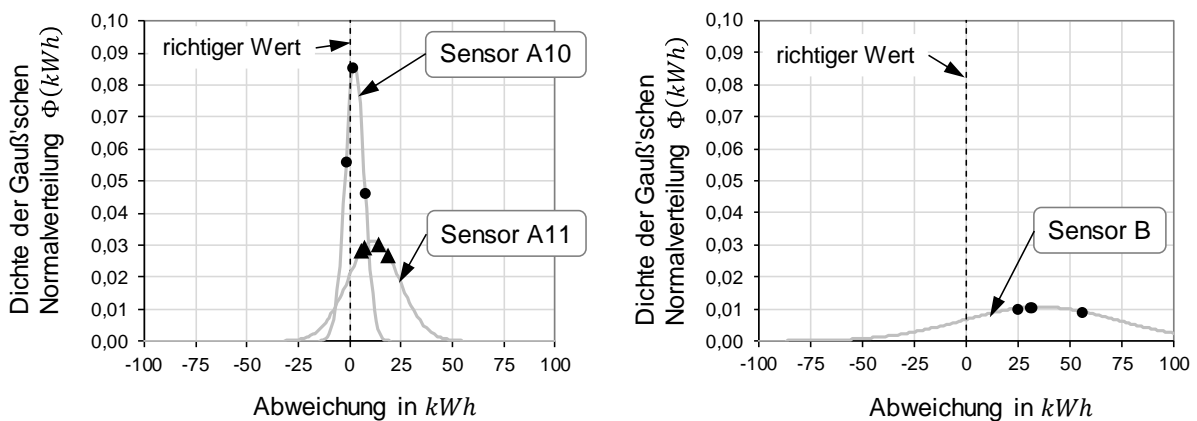


Abb. 15: Dichte der Gauß'schen Normalverteilung der Abweichung der aktuellen Energiemenge im Eisspeicher $Q_{Esp,akt}$ der Beladungssensoren A10, A11 (links) und B (rechts) gegenüber der Referenzmessung auf Basis der durchgeführten Versuche 1 – 4 (Tabelle 6) am Versuchseisspeicher ohne Berücksichtigung der Wärmegewinne über die Speicherwand
Beladungssensoren: Wärmemengen gemessen innerhalb der Systemgrenze „Messunsicherheit“ mit den Temperaturmessfühlern der Sensoren A10 und A11 bzw. für den Sensor B mit den Temperaturmessfühlern $\vartheta_{Ref,3}$ und $\vartheta_{Ref,4}$
Referenzmessung: Temperaturmessung erfolgt direkt am Entzugswärmeübertrager, Massenstrom innerhalb der Systemgrenze „Messunsicherheit“

Da bei Sensor B die Temperaturmessung mittels der Referenzmessung erfolgt, ist die größere erweiterte Messunsicherheit der Wärmemenge Q_{WT} überwiegend auf die zusätzlichen Wärmegewinne über die Zu- und Rückleitung zurückzuführen. In Abb. 14 ist diese Abweichung der mittels Sensor B ermittelten aktuellen Wärmemenge $Q_{Esp,akt,B}$ gegenüber der aktuellen Wärmemenge $Q_{Esp,akt,Ref}$ erkennbar. In der Praxis ist diese Anordnung der Temperaturmessfühler üblich, d.h. die Temperaturmessfühler werden nicht direkt am Ein- und Ausgang des Wärmeübertragers positioniert, sondern

innerhalb der Heizungszentrale. Dadurch werden die Wärmegewinne der Zu- und Rückleitung bei der Bilanzierung der aktuellen Wärmemenge des Eisspeichers miterfasst. Im Fall der Beladungssensoren A10 und A11 hat dies zu einer zufälligen Verbesserung bzw. im Fall des Sensors B zu einer Verschlechterung der Genauigkeit bei der Bestimmung des Beladungsgrades $G(S_{oc})$ geführt. Da der Beladungsgrad des Eisspeichers eine der wesentlichen Größen für die optimale Systemregelung der neuartigen Wärme- und Kälteversorgungskonzepte darstellt und eine zuverlässige und exakte Bestimmung des Beladungsgrades daher von zentraler Bedeutung ist, muss die Entzugs- bzw. Regenerationswärmemenge unmittelbar an Ein- und Austritt des jeweiligen Wärmeübertragers bestimmt werden.

Wird die Wärmemenge direkt am Eisspeicher mittels Beladungssensoren bestimmt, kann eine höhere Genauigkeit bei der Bestimmung des Beladungsgrades und eine geringere erweiterte Messunsicherheit $U(Q_{WT})$ wie in Tabelle 7 aufgeführt, erreicht werden. Die in Tabelle 7 dargestellten Genauigkeiten und Messunsicherheiten wurden mittels Volumenstrommessung der Beladungssensoren A und B in Kombination mit den Widerstandstemperaturfühler der Referenzmessung $\Delta\vartheta_{WT,Sensor} = \vartheta_{Ref,in} - \vartheta_{Ref,out}$ bestimmt. Dadurch sind die Werte in Tabelle 7 ausschließlich auf die Messunsicherheit des Massenstromes der Beladungssensoren zurückzuführen. Durch diese Betrachtungsweise wird eine Genauigkeit bei der Bestimmung des Beladungsgrad des Sensors A10 von $G(S_{oc}) = \pm 4\%$ und des baugleichen Sensors A11 von $G(S_{oc}) = \pm 1\%$ sowie des Sensors B von $G(S_{oc}) = \pm 4\%$ erreicht.

Tabelle 7: Genauigkeit der Bestimmung des Beladungsgrads sowie die erweiterte Messunsicherheit $U(Q_{WT})$ der Beladungssensoren A10, A11 und B, auf Basis der entzogenen Wärmemenge am Entzugswärmeübertrager, ohne Berücksichtigung der Wärmegewinne über die Speicherwand.

	Sensor A10*	Sensor A11*	Sensor B*
Genauigkeit der Bestimmung des Beladungsgrad $G(S_{oc})$	$\pm 4\%$	$\pm 1\%$	$\pm 4\%$
Anzahl Versuche N	3	4	4
Erweiterungsfaktor k	4,303	3,182	4,303
erweiterte Messunsicherheit $U(Q)$	± 37 kWh	± 3 kWh	± 36 kWh

* Volumenstrommessung mit Sensor A und B -Temperaturmessung mittels Temperaturfühler der Referenzmessung am Wärmeübertrager

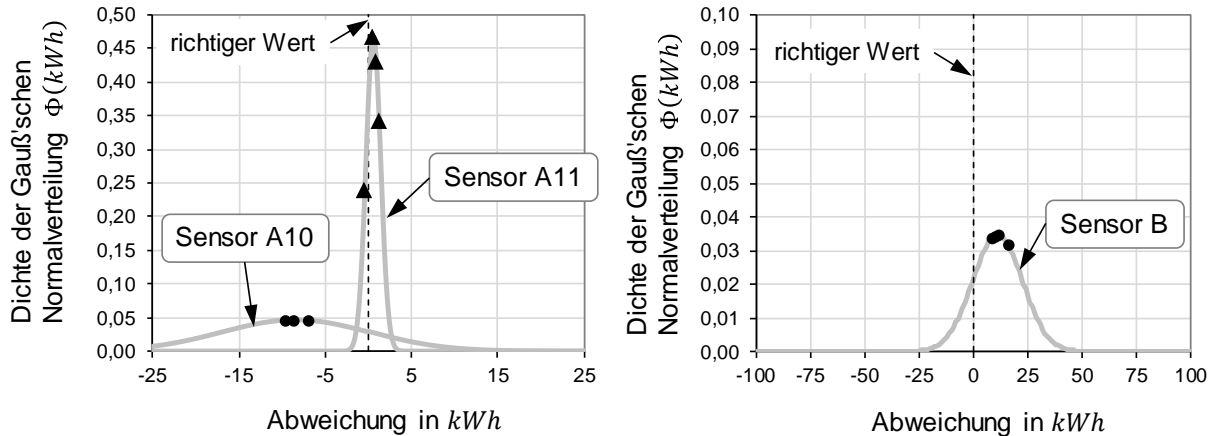


Abb. 16: Dichte der Gauß'schen Normalverteilung der Abweichung der aktuellen Wärmemenge im Eisspeicher $Q_{ESp,akt}$ für die Beladungssensoren A10, A11 (links) und B (rechts) gegenüber der Referenzmessung auf Basis der durchgeführten Versuche 1 – 4 (Tabelle 7) am Versuchseisspeicher ohne Berücksichtigung der Wärmegewinne über die Speicherwand
Beladungssensoren: Temperaturen gemessen mit den Messfühlern der Referenzmessung am Entzugswärmeübertrager
Referenzmessung: Temperaturen gemessen am Entzugswärmeübertrager.

Tabelle 8: Erweiterte Messunsicherheit des Massenstroms $U(\dot{m}_{sensor})$ der Beladungssensoren A und B, sowie der mittleren Fluidtemperatur für die Versuche 1 - 4.

erweiterte Messunsicherheit des Massenstroms $U(\dot{m}_{sensor})$	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4
Beladungssensor A10	± 33 kg/h	Ausfall Sensor	± 43 kg/h	± 45 kg/h
Beladungssensor A11	± 21 kg/h	± 29 kg/h	± 11 kg/h	± 16 kg/h
Beladungssensor B	± 56 kg/h	± 52 kg/h	± 53 kg/h	± 52 kg/h
mittlere Fluidtemperatur $\bar{\vartheta}_{fluid}$	- 5,5 °C	- 11 °C	- 10 °C	- 10 °C

Die erweiterte Messunsicherheit der Beladungssensoren kann mit $U_{A10}(Q) = \pm 37$ kWh, $U_{A11}(Q) = \pm 3$ kWh und $U_B(Q) = \pm 36$ kWh angegeben werden. Abb. 16 zeigt die Dichte der Gauß'schen Normalverteilung in Abhängigkeit von der Abweichung der aktuellen Wärmemenge gegenüber der Referenzmessung im Eisspeicher für die Beladungssensoren A (links) und B (rechts). Der Mittelwert der Messung von Sensor A10 weist eine Abweichung zum richtigen Wert von $\Delta Q_{ESp,akt,A10} = - 8$ kWh und der baugleiche Sensor A11 von $\Delta Q_{ESp,akt,A11} = + 0,6$ kWh auf. Der Sensor B weist eine Abweichung von $\Delta Q_{ESp,akt,B} = + 36$ kWh auf.

Bei dieser Betrachtungsweise kommt die erweiterte Messunsicherheit des Massenstroms des Beladungssensors A und B bei der Bestimmung der aktuellen Wärmemenge Q_{WT} zum Tragen. Tabelle 8 zeigt die erweiterte Messunsicherheit bei

der Bestimmung des Massenstroms für die Beladungssensoren A und B sowie die mittlere Temperatur des Fluides $\bar{\vartheta}_{fluid}$ der Referenzmessung für die Versuche 1 – 4. Erkennbar ist, dass der Beladungssensor A10 gegenüber dem baugleichen Sensor A11 in allen Versuchen einer größeren erweiterten Messunsicherheit bzgl. des Massenstroms $U(\dot{m}_{fluid})$ aufweist. Dies deckt sich auch mit der in Abb. 12 links dargestellten erweiterten Messunsicherheit bzgl. des Massenstroms in Abhängigkeit von der Fluidtemperatur. Für den Sensor B wurde eine erweiterte Messunsicherheit bzgl. des Massenstroms von $\pm 52 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \leq U(\dot{m}_{sensor}) \leq \pm 56 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ bestimmt. Diese rel. hohen Werte stimmten nicht mit der in Abb. 12 dargestellten erweiterten Messunsicherheiten für die entsprechende mittlere Fluidtemperatur überein. Bei Sensor B liegt hier ggf. ein Signalfehler vor und muss überprüft werden. Um eine angestrebte Genauigkeit bei der Bestimmung des Beladungsgrad von mindestens $G(S_{OC}) \leq \pm 2\%$ zu erreichen (vgl. *Juschka et al. 2022*), kann somit mittels der erweiterten Messunsicherheit des Massenstroms $U(\dot{m}_{fluid})$ aus Tabelle 8 eine Anforderung an die Beladungssensoren bzgl. erweiterten Messunsicherheit des Massenstroms gestellt werden. Nach Tabelle 7 weist der Sensor A11 eine Genauigkeit bei der Bestimmung des Beladungsgrad von $G(S_{OC}) = \pm 1\%$ ohne Betrachtung der Wärmegewinne durch die Speicherwand auf. Dabei wird eine erweiterte Messunsicherheit bzgl. des Massenstroms von $\pm 11 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \leq U_{A11}(\dot{m}_{fluid}) \leq \pm 29 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ (vgl. Tabelle 8) in Kombination mit kalibrierten Widerstandstemperaturfühler mit $U(\vartheta) = \pm 0,06 \text{ }^\circ\text{C}$ (vgl. Tabelle 2) erreicht. Dafür muss die Temperatur direkt am Ein- und Austritt des Wärmeübertragers erfasst werden.

8. Wärmegewinne über die Speicherwand

Mit der Erfassung der relevanten Wärmemengen, wie der gesamten latenten Wärmekapazität C_{latent} , der Wärmemenge auf Grund des Phasenwechsels Q_{latent} , der fühlbaren Wärmemenge des flüssigen Wassers und des Eises $Q_{f\u00fchl,i}$ sowie der über den Wärmeübertrager übertragenen Wärmemenge Q_{WT} , kann die über die Speicherwand gewonnene Wärmemenge nach Gl. 4 berechnet werden. Abb. 17 zeigt beispielhaft die aktuelle Wärmemenge $Q_{ESP,akt,l}$ im Eisspeicher bestimmt über die Erfassung der Eismasse und die daraus resultierende latente Wärmemenge Q_{latent} sowie der fühlbaren Wärmemengen $Q_{f\u00fchl,i}$ (schwarze Linie in Abb. 17). Dabei werden die Wärmegewinne über die Speicherwand berücksichtigt. Des Weiteren ist der Verlauf der aktuellen Wärmemenge im Eisspeicher $Q_{ESP,akt,w}$, bestimmt über die Erfassung der Wärmemenge, die durch den Wärmeübertrager Q_{WT} übertragen wird dargestellt (graue Linie in Abb. 17). Dabei werden die Wärmegewinne über die Speicherwand nicht berücksichtigt. Die Differenz dieser auf unterschiedliche Weise berechneten aktuellen Wärmemengen im Eisspeicher ergibt die kumulierten Wärmegewinne über die Speicherwand und ist in Abb. 17 als hellgraue Linie dargestellt. Tabelle 8 gibt einen Überblick der ermittelten Wärmemengen für die bisher durchgeführten und ausgewerteten Versuche 1 – 4. Die Wärmegewinne über die Speicherwand werden bisher über die Differenz der beiden Wärmemengen Q_{latent} und Q_{WT} berechnet. Damit die Bestimmung des Beladungsgrads mittels Beladungssensoren durch die Bestimmung der Wärmemenge über den Wärmeübertrager Q_{WT} möglich wird, muss eine Methode zur Bestimmung der Wärmegewinne über die Speicherwand Q_{Wand} entwickelt werden. Wie diese

Wärmemenge Q_{Wand} messtechnisch rel. einfach und kostengünstig erfasst werden kann ist gegenwärtig noch nicht geklärt. Wie sich die Bestimmung der Wärmemenge über die Wand auf die Genauigkeit zur Bestimmung des Beladungsgrads $G(S_{oc})$ auswirkt, muss dann ebenfalls noch untersucht werden.

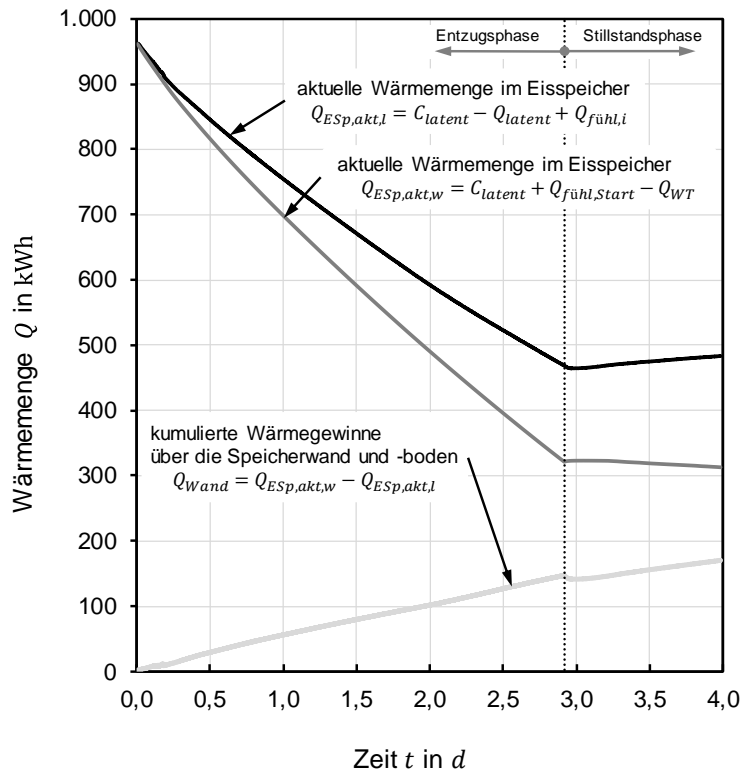


Abb. 17: Verlauf der aktuellen Wärmemenge im Eisspeicher bestimmt über:
 $Q_{ESp,akt,l}$: aktuelle Wärmemenge mittels kontinuierliche Eismassenbestimmung
 $Q_{ESp,akt,w}$: aktuelle Wärmemenge mittels entzogene Wärmemenge
 sowie die daraus resultierende Wärmegewinne durch die Speicherwand

Tabelle 8: Zusammenstellung des durch Wärmeentzug erreichten Beladungsgrads, der Versuchszeit und der mittels Referenzmesstechnik ermittelten Wärmemengen für die Versuche 1 - 4.

		Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4
Beladungsgrad	S_{oc}	35 %	13 %	60 %	54 %
Versuchszeit	t	168 h	212 h	53 h	96 h
latente Kapazität des Eisspeichers	C_{latent}	836 kWh	819 kWh	818 kWh	876 kWh
latente Wärmemenge	$Q_{latent,Ref}$	546 kWh	715 kWh	330 kWh	401 kWh
Wärmemenge über den Entzugswärmeübertrager	$Q_{WT,Ref}$	706 kWh	883 kWh	449 kWh	650 kWh
Wärmemenge über die Speicherwand	Q_{Wand}	keine Daten*	145 kWh	82 kWh	170 kWh

* Pt100-Widerstandstemperturfühler zur Messung des Latentmaterials bzw. Speichermediums nicht in Betrieb

9. Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der hier vorgestellten Untersuchungen ist die detaillierte energetische Bilanzierung von Eisspeichern. Dadurch soll das Verständnis zur Betriebsweise von Latentspeichern erhöht werden und mit dem Beladungsgrad eine messbare und zuverlässige Steuergröße für die Systemregelung bereitgestellt werden. Ein wesentliches Ziel des Forschungsvorhabens „Sol4City“ ist es daher kostengünstige und zuverlässige Sensorik zur Ermittlung des Beladungsgrades von Eisspeichern zu entwickeln. Die Beladungssensoren müssen dabei über die Dauer der Betriebszeit der Gesamtanlage eine möglichst hohe Genauigkeit bei der Bestimmung des Beladungsgrades aufweisen. Zur Bewertung von Beladungssensoren für Eisspeicher wird die tatsächliche Eismasse, d. h. der richtige Wert der Eismasse, im Eisspeicher durch ein aufgebautes Referenzmesssystem bestimmt. Für die Untersuchungen sowie die Entwicklung und insbesondere auch für die Prüfung der Praxistauglichkeit der Beladungssensoren wurde ein Versuchseisspeicher im Realmaßstab mit einem Volumen von 10 m^3 im Außenlabor des IGTE aufgestellt. Mit der am Versuchseisspeicher installierten umfangreichen Messtechnik und den entsprechenden Berechnungsverfahren ist die direkte Bestimmung des Beladungsgrades sowie die kontinuierliche indirekte Bestimmung des Beladungsgrades möglich. Dies schließt auch die Bestimmung der Messunsicherheit der verwendeten Messverfahren mit ein. Die kontinuierliche Erfassung des Beladungsgrades kann grundsätzlich durch die Bestimmung der Eismasse mittels Auftriebskraft oder Pegelstandsmessung erfolgen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin die zu- bzw. abgeführten Wärmemengen durch den Wärmeübertrager und durch die Speicherwand zu bestimmen. Beladungssensoren, die die latente Wärmemenge Q_{latent} mittels Auftriebskraftmessung ermitteln, erreichen eine Genauigkeit bei der Bestimmung des Beladungsgrades von bis zu $G(S_{oc}) = \pm 3 \%$ (Auftrieb). Mittels der Messung des Pegelstandes werden je nach Sensor Genauigkeiten von $G(S_{oc}) = \pm 5 \%$ bis $G(S_{oc}) = \pm 12 \%$ erreicht. Beladungssensoren, die auf Basis von Energiebilanzen den Beladungsgrad bestimmen, können unter optimalen Bedingungen eine Genauigkeit von $G(S_{oc}) \leq \pm 1 \%$ erreichen. Allerdings ist bei dieser Methode die Ermittlung der Wärmemenge durch Wärmetransport über die Speicherwand Q_{wand} mittels eines rel. einfachen und kostengünstig Sensors noch ungelöst. Die hier beschriebenen vorläufigen Ergebnisse werden im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens durch ergänzende Messungen präzisiert. Des Weiteren erfolgen Untersuchungen zur Skalierbarkeit der Ergebnisse und zur Übertragbarkeit auf andere Eisspeicherformen und -größen.

Literatur

JUSCHKA, Winfried; LOTT, Stefanie; DRÜCK, Harald; HAFNER, Bernd; DOTT, Ralf; SCHAUMANN, Jens (2022).: Entwicklung einer Sensorik zur Detektion des Beladungszustandes von Eisspeichern. In: Tagungsband zum 32.Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme, Bad Staffelstein, 03.-05. Mai. 2022
Download unter <https://www.igte.uni-stuttgart.de/forschung/aktuelle/sol4city/>

DOTT, Ralf; HAFNER, Bernd; SCHAUMANN, Jens; EISENMANN, Daniel; HILPERT, Jonas; DRÜCK, Harald; LOTT, Stefanie; JUSCHKA, Winfried (2023).: Regelungsverfahren für den Betrieb von Eisspeichern in kalten Netzen – Ergebnisse des Projekts Sol4City. In: Tagungsband zum 33.Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme, Bad Staffelstein, 09.-11. Mai. 2023

Danksagung

Das Forschungsprojekt *Sol4City* „Entwicklung integrierter solarer Versorgungskonzepte für klimaneutrale Gebäude der ‚Stadt der Zukunft‘“ wird aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) durch den Projektträger Jülich (PTJ) unter dem Förderkennzeichen 03ETW019A/B gefördert.

Die Autoren und die Autorin danken für diese Unterstützung und übernehmen die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung





Bestimmung des Beladungsgrades eines Eisspeichers mittels detaillierter energetischer Bilanzierung

Winfried Juschka¹, Stefanie Lott¹, Harald Drück¹, Bernd Hafner², Ralf Dott², Jens Schaumann²

¹ Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE), Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 6, 70569 Stuttgart, Deutschland

² Viessmann Climate Solutions SE, Viessmannstrasse 1, 35108 Allendorf (Eder), Deutschland

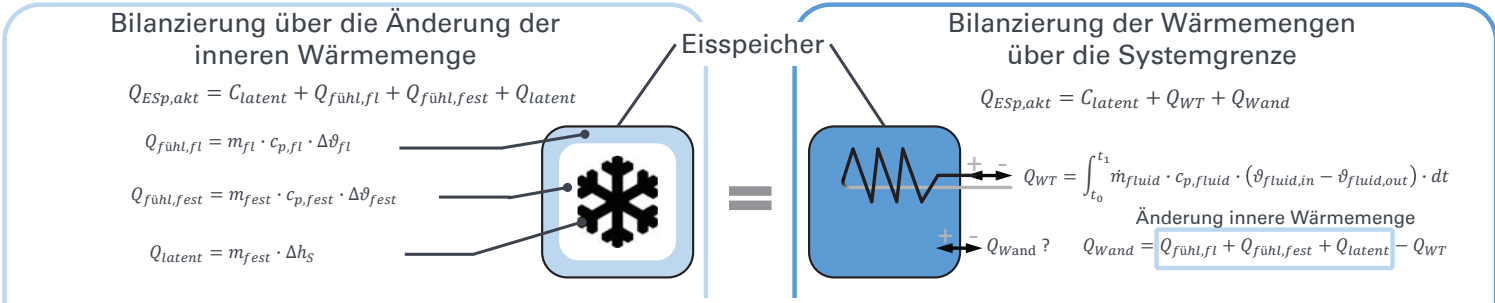
Einleitung

Der Beladungsgrad eines Eisspeichers ist eine wesentliche Stellgröße für eine optimierte Betriebsführung der in Sol4City behandelten neuartigen Wärme- und Kälteversorgungskonzepte. Eine zuverlässige und exakte Bestimmung des Beladungsgrades ist daher von zentraler Bedeutung (siehe Poster C3). Gleichzeitig stellt die Bestimmung des Beladungsgrades eine große Herausforderung dar.

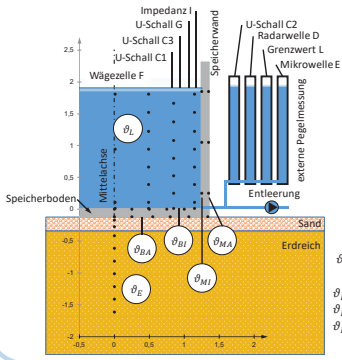


Ziel

Um den Eisspeicherzustand möglichst exakt für die Systemregelung bereitzustellen, wird primär angestrebt den Beladungsgrad mittels Beladungssensoren mit einer Genauigkeit von mindestens $G(S_{OC}) \leq \pm 2\%$ zu bestimmen. Eine Genauigkeit von $\pm 2\% < G(S_{OC}) \leq \pm 5\%$ ist gerade noch akzeptabel. Als ungenügend wird eine Genauigkeit von $\pm 5\% < G(S_{OC}) \leq \pm 10\%$ betrachtet.

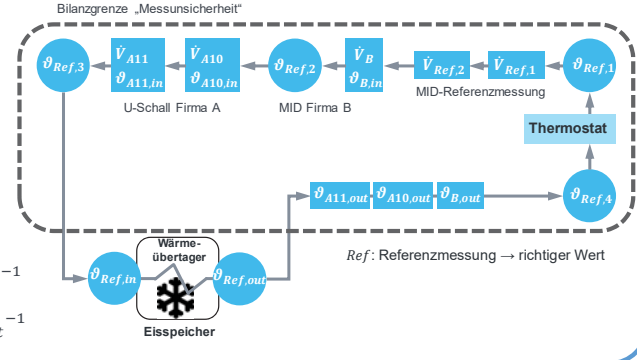


Messanordnung zur detaillierten energetischen Bilanzierung von Eisspeichern und zur Bestimmung der Messunsicherheit von Beladungssensoren



Referenzmessung: Richtiger Wert der Eismasse mittels Kranwaage
Beladungssensoren: Kontinuierliche Eismassebestimmung mittels Auftriebskraft und Pegelstandsänderung

Clatent = mGes * DhS
SOC = QEsp,akt * Clatent^-1
G(SOC) = U(Q) * Clatent^-1



Ergebnis und Schlussfolgerung

Die messtechnische Erfassung der aktuellen Wärmemenge im Eisspeicher kann grundsätzlich durch die Änderung der inneren Wärmemenge oder der Wärmemengen über die Systemgrenze erfolgen. Mit dem Versuchseisspeicher von 10 m³ im Außenlabor des IGTE ist die Bestimmung des richtigen Wertes der latenten Wärmemenge mittels Erfassung der Eismasse sowie der richtige Wert der Wärmemenge über den Wärmeübertrager möglich.

Table with columns: Beladungssensoren, A10, A11, B, C1, C2, C3, D, E, F, G. Rows: Genauigkeit G(Soc) in %, erw. Messunsicherheit U(Q) in kWh.

Table with columns: Symbol, Description, Unit. Rows: SOC, G(SOC), Clatent, QEsp,akt, QWT, Qwand, Qfuhi,l, Qlatent, U.

Sol4City logo and text: Das Forschungsprojekt Sol4City „Entwicklung integrierter solarer Versorgungskonzepte für klimaneutrale Gebäude für die ‚Stadt der Zukunft‘“ wird aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) durch den Projektträger Jülich (PtJ) unter dem Förderkennzeichen 03ETW019 A/B gefördert.