

# Entwicklung einer Sensorik zur Detektion des Beladungszustandes von Eisspeichern

*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](mailto: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 Versorgungskonzepte basieren u. a. auf einem Anergienetz, auch kaltes Nahwärmenetz genannt, welches als Wärmequelle für dezentrale Wärmepumpen dient. In Kombination mit einem zentralen, saisonalen Niedertemperatur-Latentspeicher mit Wasser als Speichermedium und einer adaptiven und prädiktiven Systemregelung werden Technologien zur effektiven Nutzung von Solarstrahlung und Umweltwärme weiterentwickelt.

Für die Regelung des Gesamtsystems ist die Detektion des Beladungsgrades des Latentspeichers von großer Bedeutung. Gleichzeitig stellt diese Detektion gerade für Latentspeicher wie z. B. Eisspeicher, mit dem Phasenwechsel fest-flüssig aufgrund der auftretenden Volumenänderung und der daraus ggf. folgenden Zerstörung von Speicherbehälter und/oder Wärmeübertrager einen sehr wichtigen Aspekt dar. Um das Gesamtsystem so zu betreiben, dass zum einen die Zerstörung des Speichers verhindert wird und zum anderen die Effizienz des Systems maximiert wird, ist die Entwicklung einer Sensorik zur zuverlässigen Detektion des Beladungszustandes von Eisspeichern ein zentrales Projektziel.

## 2. Stand der Technik

Latentspeicher nutzen den Phasenwechsel zur Speicherung thermischer Energie. Insbesondere im Bereich kleiner Speichertemperaturdifferenzen ist die dadurch effektiv nutzbare spezifische Speicherkapazität um ein Vielfaches höher, als dies ohne die Ausnutzung des Phasenwechsels der Fall wäre (vgl. Abb. 1). Da der Einsatz von Wasser als Speichermedium für Latentspeicher unter anderem unter ökonomischen und ökologischen Aspekten sehr attraktiv ist, stellen sogenannte Eisspeicher eine äußerst interessante Technologie dar. Aufgrund der Nutzung der Eisspeicher als Wärmequelle für Wärmepumpen während der Heizperiode werden diese meist als

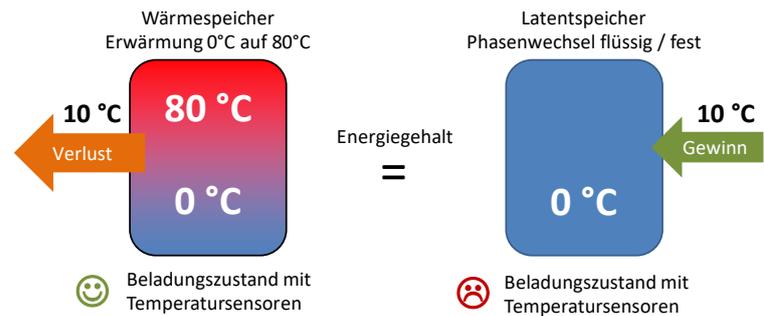
saisonale Speicher betrieben. Bei Anlagen, in denen Eisspeicher als Wärmequelle für Wärmepumpen dienen, wurden in Feldmessungen Jahres-Arbeitszahlen nachgewiesen, die im Bereich von mit Erdsonden als Wärmequelle ausgerüsteten Wärmepumpenanlagen liegen (Minder et al. 2014). Besteht zusätzlich zum winterlichen Wärmebedarf im Sommer ein

Kühlbedarf, so kann der Eisspeicher in diesem Fall auch zur Bereitstellung von Kälte genutzt werden. Durch diese Möglichkeit der multifunktionalen Nutzung ergeben sich für Eisspeicher deutliche Vorteile gegenüber klassischen, saisonalen Wärmespeichern.

Ein gravierender Nachteil der Latentspeichertechnologie ist jedoch der gegenüber der Wärmespeicherung ohne Phasenwechsel extrem schwierig zu ermittelnde Beladungsgrad des Speichers. Dies trifft insbesondere auf Latentspeicher mit dem Phasenwechsel fest-flüssig, also auf Eisspeicher, zu. Durch die bei einem Phasenwechsel von flüssig nach fest auftretende Volumenzunahme des Wassers kann es zu einer Zerstörung des Speicherbehälters sowie der darin befindlichen Wärmeübertrager kommen. Eine zuverlässige und preiswerte Technik zur Messung des „Vereisungsgrades“ ist bisher nicht verfügbar und hemmt daher gegenwärtig den Einsatz der Eisspeichertechnologie. Aus diesem Grund ist die Entwicklung einer entsprechenden Sensorik zur Bestimmung des Beladungsgrades von Eisspeichern notwendig.

Den aktuellen Stand der Technik zur Bestimmung des Beladungsgrades von Eisspeichern repräsentieren vertikale Radarwellen- oder Ultraschallsensoren, welche ausschließlich die, durch den Dichteunterschied von Wasser zu Eis, verändernde Wasserstandshöhe im Speicher erfassen. Die Zuverlässigkeit dieser Beladungssensoren ist auf Grund diverser Einflussgrößen nur eingeschränkt gegeben. Außerdem kann mit diesen Sensoren aufgrund der ungleichmäßigen und asymmetrischen Ver- und Enteisung nicht sichergestellt werden, dass der Speicher vor Zerstörung geschützt wird.

Auf Basis einer Literaturrecherche und Anwendung einer Bewertungsmatrix wurden insbesondere horizontale Ultraschallsensoren, Auftriebskraftsensoren, Sensoren zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit sowie die Aufstellung einer Energiebilanz als aussichtsreichste Lösungen zur Bestimmung des Beladungsgrades identifiziert. Für eine Bewertung der Beladungssensoren muss der tatsächliche bzw. wahre Beladungsgrad des Eisspeichers sowie die Messunsicherheit des verwendeten Verfahrens bekannt sein. Für weitere Entwicklungen und insbesondere auch für die Prüfung der Praxistauglichkeit der zu untersuchenden Beladungssensoren wurde ein Versuchseisspeicher im Realmaßstab mit einem Volumen von 12 m<sup>3</sup> im Außenlabor des IGTEs errichtet und mit umfangreicher Messtechnik versehen (vgl. Abb. 2).



**Abb. 1:** Vergleich eines Wasserspeichers mit fühlbarer und latenter Speicherung der gleichen Wärmemenge



Abb. 2: Versuchseisspeicher im Außenlabor des IGTEs

### 3. Beladungsgrad von Latentspeichern

Abb. 3 links stellt den theoretischen Zusammenhang zwischen dem Beladungsgrad  $S_{OC}$  (State of Charge) bzw. dem Vereisungsgrad  $S_{OI}$  (State of Icing) in Abhängigkeit von der Speichertemperatur  $\vartheta_{Latent}$  und der Massenkonzentration  $x_{liquid}$  von flüssigem Wasser im Eisspeicher dar. Bei einer homogenen Speichertemperatur  $\vartheta_{Latent} > 0\text{ °C}$  weist der Eisspeicher einen Beladungsgrad von  $S_{OC} \geq 1$  auf. Dabei befindet sich das Speichermedium in einem vollständig flüssigen Aggregatzustand, der Vereisungsgrad des Latentspeichers nimmt daher einen Wert von  $S_{OI} = 0$  an. Die Massenkonzentration an flüssigem Wasser im Speicher ist hier maximal ( $x_{liquid} = 1$ ). Wird dem Speicher Wärme entzogen findet ein Phasenwechsel von dem flüssigen Wasser im Speicher zu festem Eis statt. Bei dem Phasenechsel bleibt die Temperatur im Latentspeicher konstant bei  $\vartheta_{Latent} = 0\text{ °C}$ . Dabei ändert sich der Beladungsgrad von  $S_{OC} = 1$  auf  $S_{OC} = 0$ . Analog ändert sich der Vereisungsgrad von  $S_{OI} = 0$  bei vollständig flüssigem Aggregatzustand des Wassers im Speicher zu  $S_{OI} = 1$  bei vollständig festem Aggregatzustand. Während dieser Entzugsphase nimmt die Massenkonzentration von flüssigem Wasser direktproportional mit dem Vereisungsgrad  $S_{OI}$  von  $x_{liquid} = 1$  auf  $x_{liquid} = 0$  ab. Bei einem Beladungsgrad von  $S_{OC} = 0$  ist das flüssige Wasser im Speicher vollständig zu Eis

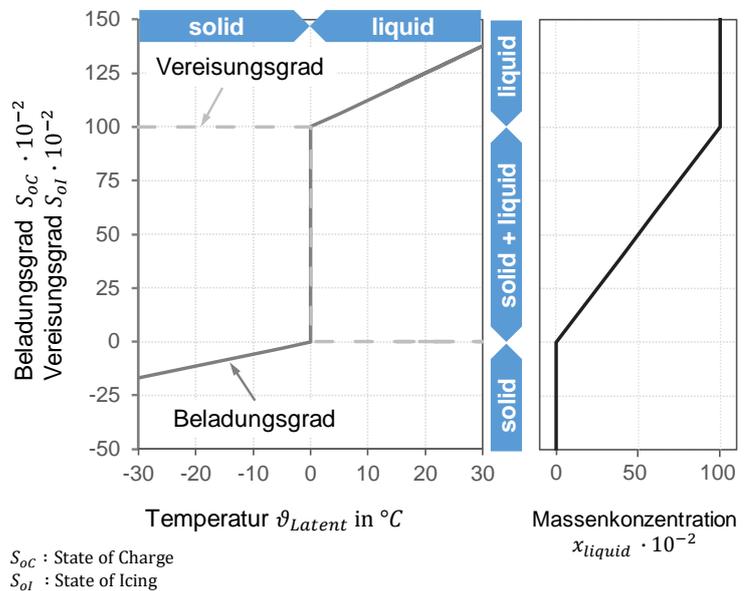


Abb. 3: Beladungsgrad bzw. Vereisungsgrad in Abhängigkeit von der mittleren Speichertemperatur (links) und der Massenkonzentration von flüssigem Wasser (rechts)

umgewandelt. An diesem Punkt ist die latente Wärme vollständig aus dem Latentspeicher entzogen. Wird dem Latentspeicher weiter Wärme entzogen, unterkühlt das Eis und im Speicher wird eine Temperatur von  $\vartheta_{Latent} < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$  erreicht. Der Beladungsgrad nimmt dann einen Wert von  $S_{oC} < 0$  an, der Vereisungsgrad bleibt bei einem Wert von  $S_{oI} = 1$ .

#### 4. Genauigkeit der Bestimmung des Beladungsgrades

Für die Regelung eines Gesamtsystems zur Wärme- und Kälteversorgung ist die Detektion des Beladungsgrades des Latentspeichers von großer Bedeutung. Um das Gesamtsystem so zu betreiben, dass zum einen die Zerstörung des Speichers verhindert wird und zum anderen die Effizienz des Systems maximiert wird, muss die Messgenauigkeit der Beladungssensoren bestimmte Anforderungen erfüllen. Ebenso muss gewährleistet sein, dass die Messgenauigkeit über die Dauer der Betriebszeit gewährleistet ist. Die Genauigkeit der Bestimmung des Beladungsgrades wird nach Gl. 1 berechnet. Der angestrebte Bereich der Genauigkeit ist nebenstehend dargestellt. Eine Genauigkeit von  $G(S_{oC}) \leq \pm 2 \%$  wird primär angestrebt, 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.

$$G(S_{oC}) \pm 2 \%$$



$$G(S_{oC}) \pm 5 \%$$



$$G(S_{oC}) \pm 10 \%$$



$$G(S_{oC}) = U(m_{Eis}) \cdot m_{Nenn}^{-1} \quad (\text{Gl. 1})$$

mit:

$G(S_{oC})$	Genauigkeit der Bestimmung des Beladungsgrades ( $S_{oC}$ : State of Charge)	[%]
$U(m_{Eis})$	Erweitere Messunsicherheit des Beladungssensors zur Bestimmung der Eismasse $m_{Eis}$ im Latentspeicher (vgl. Gl. 8)	[kg]
$m_{Nenn}$	Nennmasse von (flüssigem) Wasser im Latentspeicher (für Speicher vom Typ SE12 $m_{Nenn} = 10.000 \text{ kg}$ )	[kg]

#### 5. Bestimmung des wahren Beladungsgrades von Eisspeichern

Für die Untersuchungen und die Entwicklung von Beladungssensoren muss der wahre Wert des Beladungsgrades bzw. des Vereisungsgrades bekannt sein. Die Bestimmung des wahren Wertes des Vereisungsgrades soll durch Wiegen des am Wärmeübertrager anhaftenden Eises direkt bestimmt werden. Bei der Bestimmung des wahren Wertes des Beladungsgrades wird davon ausgegangen, dass der Beladungsgrad im Bereich  $0 \leq S_{oC} \leq 1$  dem reziproken Vereisungsgrad entspricht (vgl. Abb. 3). Die Energieanteile der Beladung durch fühlbare Wärme des Wassers und des Eises werden dabei vernachlässigt. Somit kann der Beladungsgrad anhand des Anteils an flüssigem Wassers nach Gl. 2 bestimmt werden. Der Massenanteil an

flüssigem Wasser im Latentspeicher lässt sich durch den Anteil an festem Eis, zur Gesamtmasse von flüssigem Wasser nach Gl. 3 bestimmen. Somit lässt sich der Beladungsgrad von Latentspeichern durch die Messung der Eismasse nach Gl. 4 bestimmen:

$$S_{oC} = 1 - S_{oI} = x_{liquid} \quad \text{für: } 0 \leq S_{oC} \leq 1 \quad (\text{Gl. 2})$$

$$x_{liquid} = 1 - m_{Eis} \cdot m_{Gesamt}^{-1} \quad (\text{Gl. 3})$$

$$S_{oC} = 1 - m_{Eis} \cdot m_{Gesamt}^{-1} \quad \text{für: } 0 \leq S_{oC} \leq 1 \quad (\text{Gl. 4})$$

mit:

$S_{oC}$	Beladungsgrad ( $S_{oC}$ : State of Charge)	[–]
$S_{oI}$	Vereisungsgrad ( $S_{oI}$ : State of Icing)	[–]
$x_{liquid}$	Massenkonzentration von flüssigem Wasser im Latentspeicher	[–]
$m_{Eis}$	Masse von Eis im Latentspeicher	[kg]
$m_{Gesamt}$	Gesamtmasse von (flüssigem) Wasser im Latentspeicher	[kg]

Die wahre Eismasse wird durch das Wiegen des am Wärmeübertrager anhaftenden Eises nach Gl. 5 bestimmt. Diese Bestimmung der wahren Eismasse stellt das Referenzmessverfahren für die Bestimmung des Beladungsgrades dar.

$$m_{Eis,R} = m_{WTE} - m_{WT} \quad (\text{Gl. 5})$$

mit:

$m_{Eis,R}$	Masse von Eis im Latentspeicher (Referenzmessverfahren)	[kg]
$m_{WTE}$	Masse des Wärmeübertragers mit anhaftendem Eis	[kg]
$m_{WT}$	Masse des Wärmeübertragers	[kg]

## 6. Angewandte Methode zur Bewertung der Messgenauigkeit von Beladungssensoren

Die Bestimmung der Messgenauigkeit von Sensoren zur Ermittlung des Beladungsgrades soll mit den Methoden zur Ermittlung der Standardunsicherheit nach DIN EN ISO 20988 erfolgen. Dabei wird die Standardunsicherheit anhand von Vergleichsmessungen ermittelt. Bei der direkten Bewertungsmethode wird die Eismasse, die mit einem Beladungssensor ermittelt wurde, mit der Eismasse, die mit dem Referenzmessverfahren ermittelt wurde verglichen. Die Berechnung der Messunsicherheit erfolgt nach Gl 6.

$$u_{SVS}(m_{Eis}) = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (m_{i,S} - m_{i,R})^2 - [u_{MR}(m_{Eis})]^2} \quad (\text{Gl. 6})$$

mit:

$u_{SVS}(m_{Eis})$	Standardunsicherheit des zu prüfenden Beladungssensors, ermittelt anhand von Vergleichsmessungen	[kg]
$u_{MR}(m_{Eis})$	Messunsicherheit des Referenzmessverfahrens	[kg]
$m_{i,S}$	i-ter Messwert des zu prüfenden Beladungssensors	[kg]
$m_{i,R}$	i-ter Messwert des Referenzmessverfahrens (wahrer Messwert)	[kg]
$N$	Anzahl Messungen	[–]

Bei signalproportionalen Standardunsicherheiten ( $u_{SVS}(m_{Eis}) \cdot m^{-1} = \text{konstant}$ ) wird die relative Standardunsicherheit  $w_{SVS}(m_{Eis})$  nach Gl. 7 berechnet:

$$w_{SVS}(m_{Eis}) = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{m_{i,S}}{m_{i,R}} - 1\right)^2 - \left(\frac{m_{MR}(m_{Eis})}{m_{Eis,R}}\right)^2} \quad (\text{Gl. 7})$$

mit:

$w_{SVS}(m_{Eis,S})$	relative Standardunsicherheit des zu prüfenden Beladungssensors ermittelt anhand von Vergleichsmessungen	[%]
$u_{MR}(m_{Eis})$	Messunsicherheit des Referenzmessverfahrens	[kg]
$m_{i,Eis,S}$	i-ter Messwert des zu prüfenden Beladungssensors	[kg]
$m_{i,Eis,R}$	i-ter Messwert des Referenzmessverfahrens (wahrer Messwert)	[kg]
$m_{Eis,R}$	anerkannter Messwert des Referenzmessverfahrens (wahrer Messwert)	[kg]
$N$	Anzahl Messungen	[–]

Um den Vertrauensbereich der Messunsicherheit  $u_{SVS}(m_{Eis})$  von 68,3 % auf 95,5 % zu erweitern, wird die erweiterte Messunsicherheit  $U_{SVS}(m_{Eis})$  bzw. die relative erweiterte Messunsicherheit  $W_{SVS}(m_{Eis})$  durch die Multiplikation der Messunsicherheit  $u_{SVS}(m_{Eis})$  mit einem Erweiterungsfaktor  $k$  nach Gl. 8 bzw. Gl. 9 berechnet. Der Erweiterungsfaktor  $k$  ergibt sich aus der Studentischen t-Verteilung und hängt von der Anzahl der Messungen  $N$  ab. Tabelle 1 zeigt den Erweiterungsfaktor  $k$  in Abhängigkeit der Anzahl an Messungen  $N$ .

**Tabelle 1:** Erweiterungsfaktor  $k$  zur Berechnung der erweiterten Messunsicherheit

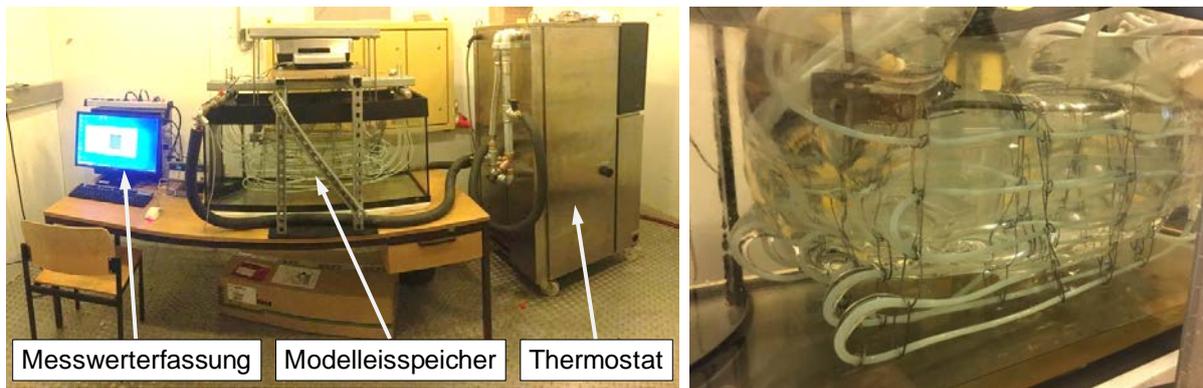
$N$	$k$
1	12,706
2	4,303
10	2,228
15	2,131
20	2,086
60	2,000
$\infty$	1,960

$$U_{SVS}(m_{Eis,S}) = k \cdot u_{SVS}(m_{Eis,S}) \quad (\text{Gl. 8})$$

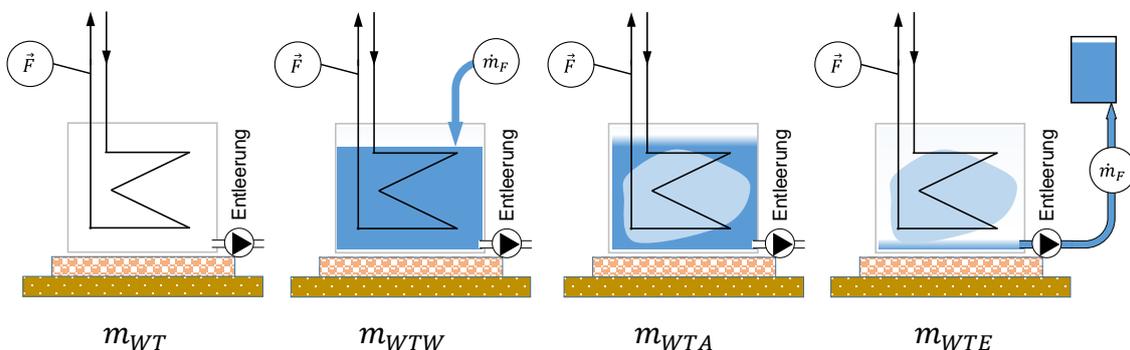
$$W_{SVS}(m_{Eis,S}) = k \cdot w_{SVS}(m_{Eis,S}) \quad (\text{Gl. 9})$$

## 7. Modelleisspeicher

Die Methode zur Bestimmung des wahren Wertes des Beladungsgrades durch Wiegen der am Wärmeübertrager anhaftenden Eismasse wurde mit Hilfe des in Abb. 4 dargestellten Modelleisspeichers im Labor überprüft. Dabei wurden die Herausforderungen der Messmethodik identifiziert und dafür entsprechende Lösungsansätze erarbeitet. In einem ersten Schritt wurde hierfür die Messunsicherheit der Präzisionswaage bestimmt. Diese Bestimmung erfolgte bis zu einem Gewicht von 50 kg. Für die Präzisionswaage wurde eine Messunsicherheit von  $u_{SVS}(m) = \pm 3,3 \text{ g}$  und eine erweiterte Messunsicherheit von  $U_{SVS}(m) = \pm 6,6 \text{ g}$  (Vertrauensbereich 95 %) bzw. eine relative erweiterte Messunsicherheit von  $W_{SVS}(m) = \pm 0,08 \%$  ermittelt. Mit der Präzisionswaage kann bei einer Nennmasse des Wassers von  $m_{Nenn} = 145 \text{ kg}$  im Modelleisspeicher der Beladungszustand mit einer Genauigkeit von  $G(S_{oc}) \pm 0,005 \%$  bestimmt werden. Die Methode zur Bestimmung der wahren Eismasse zeigt Abb. 5 und die Berechnung erfolgt nach Gl. 5. Ebenso zeigt Abb. 5 die Methode zur kontinuierlichen, indirekten Bestimmung der Eismasse  $m_{Eis,R}$  während der Entzugsphase durch Erfassung der Änderung der Masse des Wärmeübertrages  $m_{WTF}$  auf Grund der Auftriebskraft von anhaftendem Eis.



**Abb. 4** Versuchsaufbau zur Bestimmung der wahren Eismasse mit Hilfe eines Modelleisspeichers (links) und Ausformung des Eises um die Wärmeübertragerrohre (rechts).



**Abb. 5:** Methode zur kontinuierlichen, indirekten Bestimmung der Eismasse  $m_{WTA}$  und zur direkten Bestimmung der wahren Eismasse durch Wiegen der am Wärmeübertrager anhaftenden Eismasse  $m_{WTE}$  am Ende der Entzugsphase (Nomenklatur vgl. Gl. 10 und Gl. 11)

Die Berechnung zur kontinuierlichen, indirekten Bestimmung der Eismasse  $m_{Eis,S}$  erfolgt mit Hilfe eines Beladungssensors zur Detektion der Auftriebskraft nach Gl. 10 und Gl. 11.

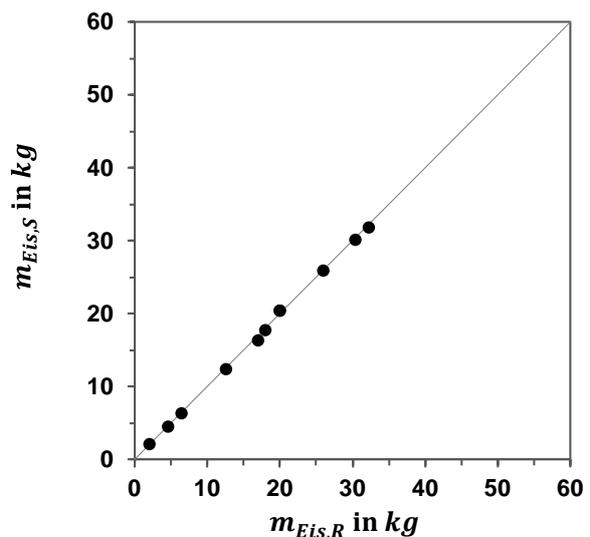
$$m_{Eis,S} = r_{\rho} \cdot (m_{WTA} - m_{WTW}) \quad \text{und} \quad \text{(Gl. 10)}$$

$$r_{\rho} = \rho_{Eis} \cdot (\rho_{liquid} - \rho_{Eis})^{-1} \quad \text{(Gl. 11)}$$

mit:

$m_{Eis,S}$	Masse von Eis im Latentspeicher ermittelt mit einem Beladungssensor	[kg]
$m_{WT}$	Masse des Wärmeübertragers (vgl. Abb. 5)	[kg]
$m_{WTW}$	Masse des Wärmeübertragers im flüssigen Wasser	[kg]
$m_{WTA}$	Masse des Wärmeübertragers mit anhaftendem Eis im flüssigen Wasser	[kg]
$m_{WTE}$	Masse des Wärmeübertragers mit anhaftender Eismasse am Ende der Entzugsphase (vgl. Abb. 5)	[kg]
$\rho_{Eis}$	Dichte von Eis bei $\vartheta_{Eis} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$	[kg · m <sup>-3</sup> ]
$\rho_{liquid}$	Dichte von Wasser bei $\vartheta_{liquid} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$	[kg · m <sup>-3</sup> ]
$r_{\rho}$	Faktor des Dichteverhältnisses zwischen flüssigem Wasser und Eis	[–]

Abb. 6 zeigt alle gültigen Ergebnisse der Bestimmung der Eismasse  $m_{Eis,S}$  (indirekte Eismassenbestimmung auf Basis der Auftriebskraft) und die der direkten Messung der Eismasse  $m_{Eis,R}$  im Modelleisspeicher. Auf Grund von stark vereisten Wärmeübertragerrohren oberhalb der Wasseroberfläche im Luftraum oder bei der Bildung von Wasser- bzw. Luftblasen im Eis sind Abweichungen in der Reproduzierbarkeit der Bestimmung der wahren Eismasse vorhanden. Diese Messungen wurden als Fehlmessungen deklariert und für die Bestimmung der Messunsicherheit nicht mitbetrachtet. Bei dieser Art der Eismassenbestimmung im Modelleisspeicher ergibt sich eine Messunsicherheit von  $u_{SVS}(m_{Eis}) = \pm 290 \text{ g}$  und eine erweiterte Messunsicherheit von  $U_{SVS}(m) = \pm 636 \text{ g}$  bzw. eine relative erweiterte Messunsicherheit von  $W_{SVS}(m_{Eis}) = \pm 35 \text{ } \%$ . Mit der kontinuierlichen, indirekten Bestimmung der Eismasse auf Basis der Auftriebskraft konnte bei einer Nennmasse des Wassers von  $m_{Nenn} = 145 \text{ kg}$  im Modelleisspeicher der Beladungszustand mit einer Genauigkeit von  $G(S_{oc}) \pm 0,44 \text{ } \%$  bestimmt werden.



$$m_{Eis,S} = 0,9987 \cdot m_{Eis,R} \quad R^2 = 0,9991$$

**Abb. 6:** Vergleich der Ergebnisse der indirekten Bestimmung der Eismasse auf Grund der Auftriebskraft  $m_{Eis,S}$  und der direkten Messung der Eismasse  $m_{Eis,R}$  im Modellspeicher

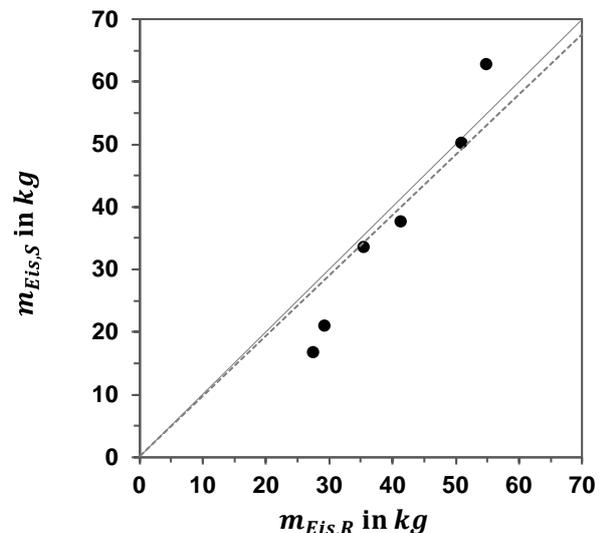
Für die indirekte Bestimmung des Beladungsgrades von Eisspeichern werden derzeit Abstandssensoren zur Bestimmung der Änderung des Wasserstands eingesetzt. Hierbei wird der Abstand zwischen der Wasseroberfläche und dem Sensorkopf durch die Laufzeit von z. B. Ultraschallwellen (U-Schall) oder von Radarschallwellen bestimmt. Bei der Entladung von Eisspeichern steigt der Wasserspiegel auf Grund der Dichteunterschiede zwischen flüssigen Wasser und Eis. Die Eismasse kann mit diesem Beladungssensor nach Gl. 12 indirekt bestimmt werden. Bei dem Versuchseisspeicher vom Typ SE12, mit einer Grundfläche von  $A_0 = 4,91 \text{ m}^2$  und einem Nenngewicht des Wassers von  $m_{Nenn} = 10.000 \text{ kg}$ , führt eine Erhöhung des Wasserstandes von  $\Delta l_{mess} = 1 \text{ mm}$  zu einer Änderung des Beladungsgrades von  $\Delta S_{oc} = 0,61 \%$ .

$$m_{Eis,S} = \rho_{Eis} \cdot A_0 \cdot \Delta l_{mess} \left( 1 - \frac{\rho_{Eis}}{\rho_{Eis} - \rho_{liquid}} \right) \quad (\text{Gl. 12})$$

mit:

$m_{Eis,S}$	Masse von Eis im Latentspeicher, ermittelt mit einem Beladungssensor	[kg]
$\Delta l_{mess}$	Änderung der Wasserstandshöhe (kontinuierlich gemessen)	[m]
$A_0$	Grundfläche des Latentspeichers	[m <sup>2</sup> ]
$\rho_{Eis}$	Dichte von Eis bei $\vartheta_{Eis} = 0 \text{ °C}$	[kg · m <sup>-3</sup> ]
$\rho_{liquid}$	Dichte von Wasser bei $\vartheta_{liquid} = 0 \text{ °C}$	[kg · m <sup>-3</sup> ]

Abb. 7 zeigt alle Ergebnisse der Bestimmung der Eismasse  $m_{Eis,S}$  (indirekte Eismassenbestimmung auf Basis einer Wasserstandsänderung) und die der direkten Messung der wahren Eismasse  $m_{Eis,R}$  im Modelleisspeicher. Der Wasserstand im Modelleisspeicher wurde dabei nicht mit einem Sensor bestimmt, sondern mit einem Metallmeterstab mit einer Ablesegenauigkeit von 0,5 mm. Auf Grund der geringen Änderung des Wasserstandes bei der Vereisung kann die Eismasse mit dieser Methode im Modelleisspeicher nicht zuverlässig bestimmt werden. Bei dieser Art der Eismassenbestimmung ergibt sich eine erweiterte Messunsicherheit von  $U_{SVS}(m) = \pm 16.191 \text{ g}$ . bzw. eine relative erweiterte Messunsicherheit von  $W_{SVS}(m) = \pm 51 \%$ . Mit der kontinuierlichen, indirekten Bestimmung der Eismasse auf Grund der Änderung des Wasserstandes konnte bei einer Nennmasse des Wassers von  $m_{Nenn} = 145 \text{ kg}$  im Modelleisspeicher der Beladungsgrad mit einer Genauigkeit von  $G(S_{oc}) \pm 11 \%$  bestimmt werden.



$$m_{Eis,S} = 0,9673 \cdot m_{Eis,R} \quad R^2 = 0,835$$

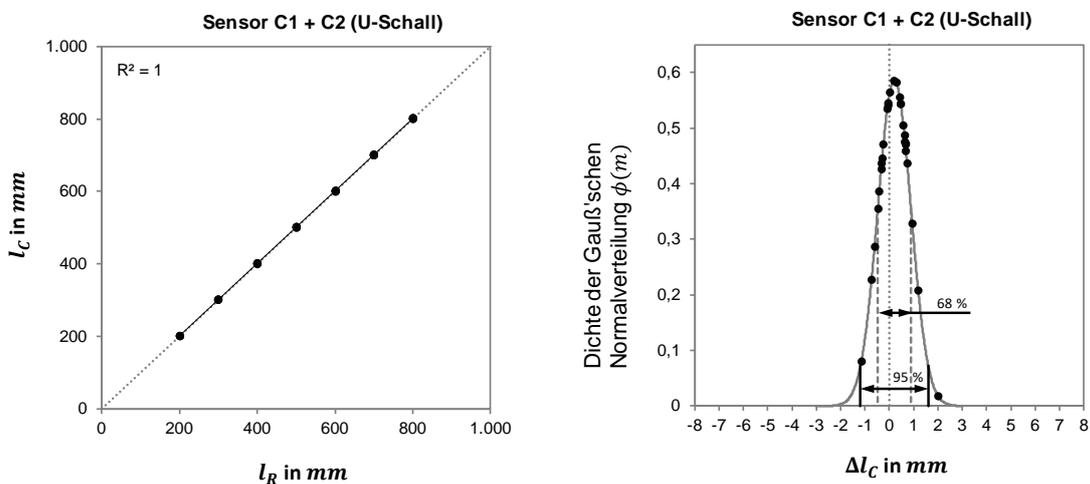
**Abb. 7:** Vergleich der Ergebnisse der indirekten Bestimmung der Eismasse auf Grund der Änderung des Wasserstandes  $m_{Eis,S}$  und der wahren Eismasse  $m_{Eis,R}$  im Modelleisspeicher

## 8. Pegelprüfstand

Für die Bestimmung der Messunsicherheit von Beladungssensoren, die auf der indirekten Bestimmung des Beladungsgrades durch die Änderung des Wasserstandes im Speicher beruhen, wurde am IGTE ein Pegelprüfstand entwickelt und aufgebaut (vgl. Abb. 8). An diesem Prüfstand kann die Messunsicherheit der Abstandsmessung, d.h. ohne den Einfluss der Eisausbildung im Speicher, eindeutig und reproduzierbar bestimmt werden. Die Bestimmung der Messunsicherheit erfolgte dabei mit zwei identischen U-Schall Sensoren (Sensor C1 und C2). In Abb. 9 links ist exemplarisch das Ergebnis der Längenmessung der U-Schall Sensoren C1 und C2 im Vergleich zur Referenzlängenmessung dargestellt. Die Dichte der Gauß'schen Normalverteilung für die Messungen mit den Sensoren C1 und C2 zeigt Abb. 9 rechts. Es ist zu erkennen, dass die U-Schall Sensoren C1 und C2 durchschnittlich eine Mittelpunktverschiebung von  $\Delta l_C = 0,21 \text{ mm}$  aufweisen.



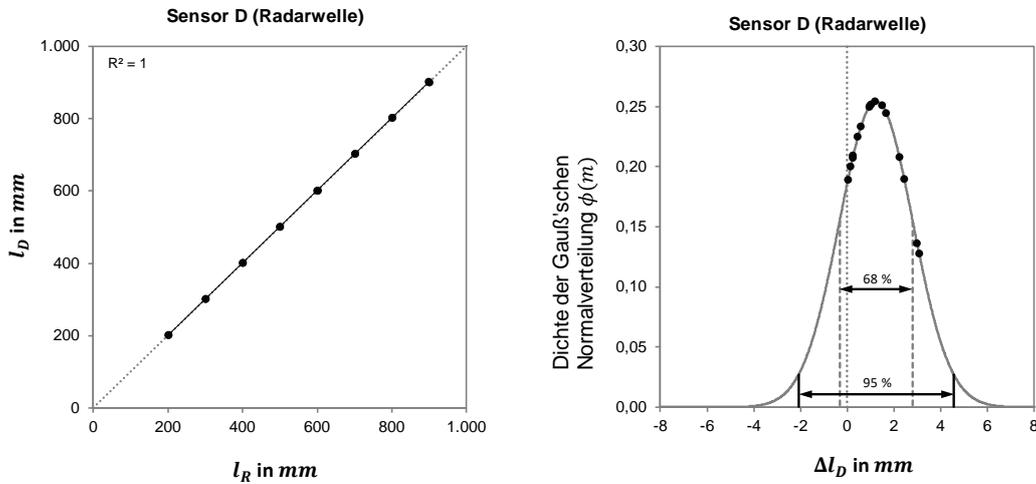
**Abb. 8:** Pegelprüfstand zur Bestimmung der Messunsicherheit von Sensoren zur Bestimmung des Beladungsgrades von Eisspeichern, die auf einer Messung der Änderung der Höhe des Wasserstands basieren



**Abb. 9:** links: Ergebnis der Längenmessung mit den U-Schall Sensoren C1 und C2 ( $l_C$ ) im Vergleich zur Referenzlängenmessung ( $l_R$ ); rechts: Dichte der Gauß'schen Normalverteilung für die Messungen mit den U-Schall Sensoren C1 und C2

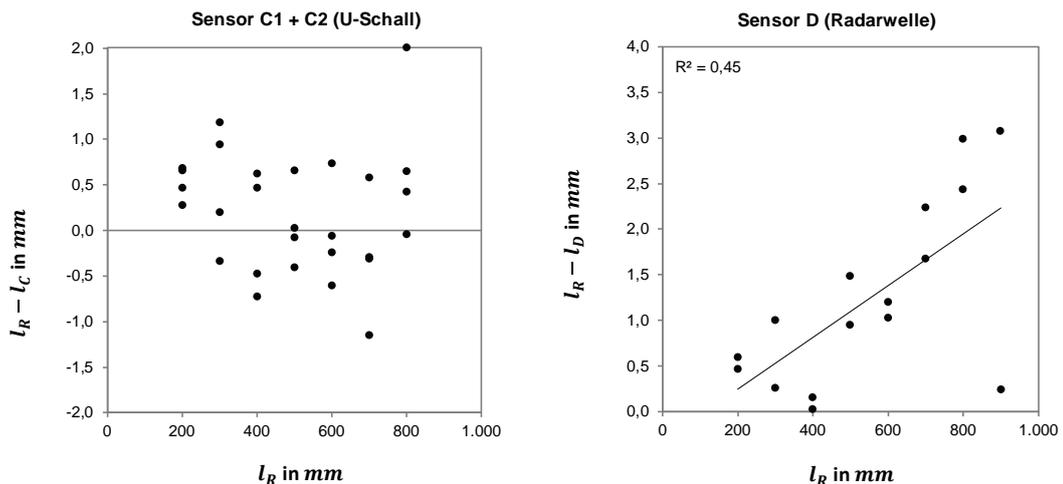
In Abb. 10 links ist das Ergebnis der Längenmessung ( $l_D$ ) mit dem Radarwellen Sensor D im Vergleich zur Referenzlängenmessung ( $l_R$ ) dargestellt. Die Bestimmung der Messunsicherheit erfolgte dabei nur für einen Radarwellen Sensor D. Abb. 10 rechts zeigt die Dichte der Gauß'schen Normalverteilung für die Messergebnisse mit

dem Radarwellen Sensor D im Vergleich zur Referenzlängenmessung. Es ist zu erkennen, dass der Radarwellen Sensor D durchschnittlich eine Mittelpunktverschiebung von  $\Delta l_D = 1,24 \text{ mm}$  aufweist.



**Abb. 10:** Links: Ergebnis der Längenmessung mit dem Radarwellen Sensor D ( $l_D$ ) im Vergleich zur Referenzlängenmessung ( $l_R$ ). Rechts: Dichte der Gauß'schen Normalverteilung für die Messungen mit dem Radarwellen Sensor D

Abb. 11 zeigt die Abweichung der Füllstandshöhe, bestimmt mit den Ultraschall Sensoren C1 und C2 (links) und mit dem Radarwellen Sensor D (rechts) zur Referenzmessung  $l_R$ , in Abhängigkeit von der tatsächlichen Füllstandshöhe. Es ist zu erkennen, dass bei den Ultraschall Sensoren C1 und C2 die Abweichung der gemessenen Füllstandshöhe gleichmäßig über den gesamten Messbereich vorhanden ist. Im Gegensatz dazu steigt die Abweichung der gemessenen Füllstandshöhe bei den Messungen mit dem Radarwellen Sensor D mit zunehmender Abstandslänge an. Tabelle 2 zeigt die ermittelte Messunsicherheit  $u_{SVS}(l)$  und die erweiterte Messunsicherheit  $U_{SVS}(l)$  bzw. die rel. erweiterte Messunsicherheit  $W_{SVS}(l)$ , sowie die



**Abb. 11:** Abweichung der Füllstandshöhe, bestimmt mit den Ultraschall Sensoren C1 und C2 (links) und mit den Radarwellen Sensor D (rechts) zur Referenzmessung ( $l_R$ ), in Abhängigkeit von der tatsächlichen Füllstandshöhe

Abweichung zum Mittelwert sowohl für die Ultraschall Abstandssensoren als auch für den Radarwellen Abstandssensor, für die im Pegelprüfstand durchgeführten Messungen. Bei einer Nennmasse des Wassers im Latentspeicher von  $m_{Nenn} = 10.000 \text{ kg}$  ergibt sich nach Gl. 1 die in Tabelle 2 aufgeführte theoretische Genauigkeit des Beladungsgrades  $G(S_{OC})$ . Die Bestimmung der Genauigkeit des Beladungsgrades  $G(S_{OC})$  von Latentspeichern mit Sensoren im praxisüblichen Betrieb wird im Versuchseisspeicher weiter untersucht.

**Tabelle 2:** Ermittelte Messunsicherheit  $u(l)$ , erweiterte Messunsicherheit  $U(l)$  und die Abweichung zum Mittelwert für die beiden Ultraschall-Abstandssensoren und den Radarwellen-Abstandssensor, basierend auf Messungen im Pegelprüfstand mit der daraus folgenden theoretischen Genauigkeit des Beladungsgrades  $G(S_{OC})$

	Sensor C1	Sensor C2	Sensor D
Messprinzip	Ultraschall	Ultraschall	Radarwellen
$u_{SVS}(l)$	$\pm 0,66 \text{ mm}$	$\pm 0,70 \text{ mm}$	$\pm 1,57 \text{ mm}$
Erweiterungsfaktor $k$	2,145	2,145	2,120
$U_{SVS}(l)$	$\pm 1,4 \text{ mm}$	$\pm 1,5 \text{ mm}$	$\pm 3,3 \text{ mm}$
$W_{SVS}(l)$	$\pm 0,43 \%$	$\pm 0,50 \%$	$\pm 9,9 \%$
Abstand zum Mittelwert	0,33 mm	0,08 mm	1,24 mm
$U_{SVS}(m_{Eis})^*$	$\pm 77 \text{ kg}$	$\pm 81 \text{ kg}$	$\pm 180 \text{ kg}$
$G(S_{OC})^{**}$	$\pm 0,76 \%$	$\pm 0,81 \%$	$\pm 1,8 \%$

\* erw. Messunsicherheit der Eismasse  $U_{SVS}(m_{Eis})$  berechnet mit Gl. 12 und der Messunsicherheit der Abstandsmessung  $U_{SVS}(l)$

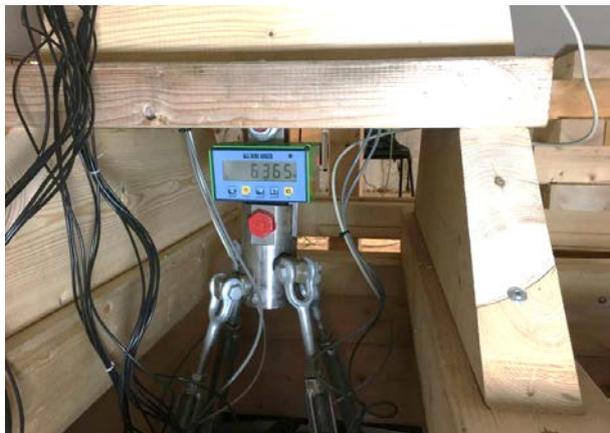
\*\* theoretische Genauigkeit des Beladungsgrades für einen Speicher vom Typ SE12 bei einer Nennmasse des Wassers im Latentspeicher von  $m_{Nenn} = 10.000 \text{ kg}$

## 9. Versuchseisspeicher im Außenlabor des IGTE

Für weitere Entwicklungen und insbesondere auch für die Prüfung der Praxistauglichkeit der neu entwickelten Beladungssensoren wurde zusätzlich ein Versuchseisspeicher im Realmaßstab mit einem Volumen von  $12 \text{ m}^3$  im Außenlabor des IGTE errichtet (vgl. Abb. 2 – Außenansicht und Abb. 12 – Innenansicht). Für die Wägung der am Entzugswärmeübertrager anhaftenden Eismasse wurde eine Tragstruktur erstellt (vgl. Abb. 13 links). Dadurch ist eine direkte Bestimmung der tatsächlichen bzw. wahren Eismasse am Ende der Entzugsphase mit einer Kranwaage möglich, wenn zuvor das noch im Speicher befindliche restliche flüssige Wasser abgepumpt wird. Zur kontinuierlichen, indirekten Bestimmung der Eismasse sind Kraftsensoren installiert (vgl. Abb. 13 rechts). Zur Bestimmung der mittleren Speichertemperatur und zur Messung der Innen- und Außenwandtemperatur des Speicherbodens sowie der Mantelfläche des Eisspeichers ist der Versuchseisspeicher mit einer umfangreichen Anzahl an Temperatursensoren versehen (vgl. Abb. 14).

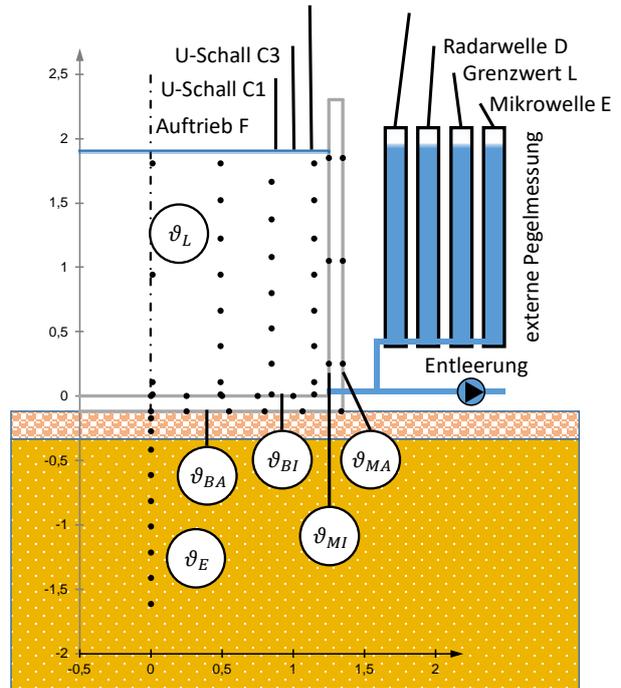


**Abb. 12:** Versuchseisspeicher mit angehobenem Speicherdeckel und umgebender Arbeitsplattform sowie Zugang zu den extern angebrachten Beladungssensoren

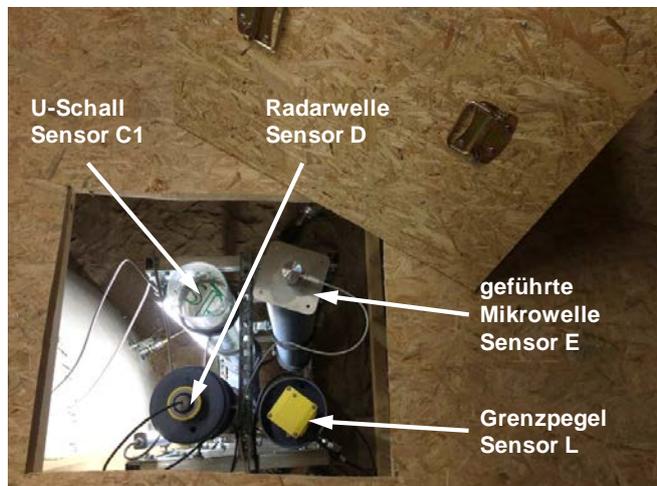
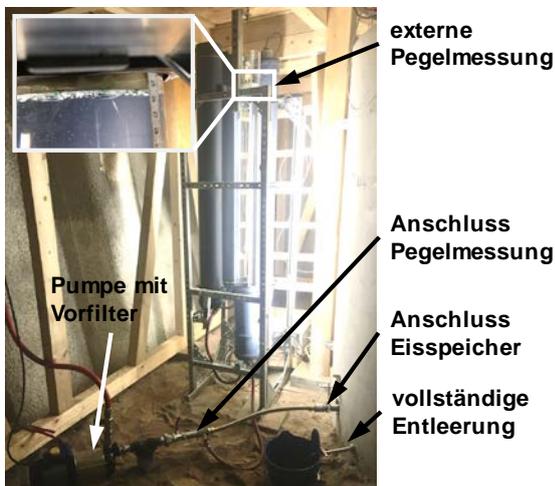


**Abb. 13:** links: Kranwaage zur direkten Bestimmung der wahren Eismasse am Ende der Entzugsphase  
rechts: Kraftsensoren (Sensor F) zur kontinuierlichen, indirekten Bestimmung der Eismasse während der Be- und Entladung

Abb. 15 links zeigt außerhalb am Versuchsspeicher positionierte vertikale Röhren, die mit dem Versuchsspeicher verbunden sind. Der Wasser- bzw. Pegelstand in den außerhalb angebrachten vertikalen Röhren zeigt somit den aktuellen Pegelstand im Versuchseisspeicher an. Dadurch ist die absolute Höhe des Wasserniveaus im Versuchseisspeicher während der gesamten Versuchszeit auch bei geschlossenem Deckel ersichtlich. Zusätzlich sind in den vertikalen Röhren Beladungssensoren montiert, die auf Grund ihrer Geometrie nicht in den Versuchseisspeicher eingebaut werden können (vgl. Abb. 16 rechts). Die außerhalb des Versuchseisspeichers positionierten Beladungssensoren sind der Grenzpegelsensor L, Radarwellen Sensor D und U-Schall Sensor C1 mit alukaschiertem Polystyrol-Schwimmer, sowie eine Abstandsmessung mit geführter Mikrowelle durch Sensor E.



**Abb. 14:** Messanordnung am Versuchsspeicher:  $\vartheta_L$  – Temperaturen Latentmaterial  
 $\vartheta_B$  – Temperaturen Speicherboden  
 $\vartheta_M$  – Temperaturen Speichermantel  
 $\vartheta_E$  – Temperaturen Erdreich



**Abb. 15:** links: Vertikale Röhren zur Messung des Pegelstandes mit Beladungssensoren, die außerhalb des Versuchseisspeichers angebracht sind und Pumpe mit Vorfilter zur Entleerung des Versuchseisspeichers  
rechts: Beladungssensoren, die außerhalb des Versuchseisspeichers in den vertikalen Röhren angebracht sind.

Die Bestimmung der wahren Eismasse im Versuchseisspeicher basiert auf der in Abb. 5 dargestellten Vorgehensweise. Dabei wird das Gewicht des Wärmeübertrages  $m_{WT}$  im nicht gefüllten Zustand bestimmt. Anschließend erfolgt die Befüllung des Versuchsspeichers mit der Bestimmung der Masse des Wärmeübertrages  $m_{WTW}$ . Zur

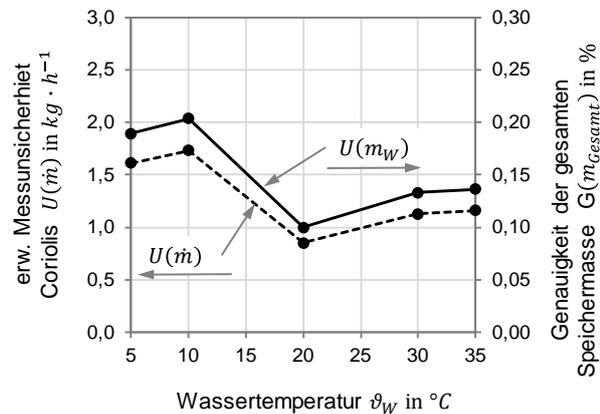
kontinuierlichen indirekten Ermittlung der Eismasse während der Entzugsphase wird die Masse des Wärmeübertragers  $m_{WTA}$  kontinuierlich mit Hilfe von Kraftsensoren ermittelt. Am Ende der Entzugsphase wird das restliche flüssige Wasser aus dem Versuchseisspeicher gepumpt und dabei dessen Masse bestimmt. Die wahre Eismasse kann dann durch Wiegen des Wärmeübertragers  $m_{WTE}$  mit anhaftendem Eis bestimmt werden. Die Genauigkeit der Bestimmung der Gesamtmasse  $G(m_{Gesamt})$  erfolgt nach Gl. 13:

$$G(m_{Gesamt}) = 1 - (m_{Eis,R} + m_{liquid,Rest}) \cdot m_{Gesamt}^{-1} \quad (\text{Gl. 13})$$

mit:

$G(m_{Gesamt})$	Genauigkeit der Bestimmung der Gesamtmasse	[%]
$m_{Gesamt}$	Gesamtmasse an Wasser im Latentspeicher	[kg]
$m_{Eis,R}$	Masse von Eis im Latentspeicher (Referenzmessverfahren)	[kg]
$m_{liquid,Rest}$	Abgepumptes restliches flüssiges Wasser aus dem Latentspeicher	[kg]

Die Befüllung des Latentspeichers mit flüssigem Wasser erfolgt mit einem kalibrierten Coriolis-Massenstrommessgerät. Abb. 19 zeigt die erweiterte Messunsicherheit  $U(\dot{m})$  des kalibrierten Coriolis-Massenstrommessgerätes zur Befüllung des Versuchseisspeichers, sowie die daraus resultierende Genauigkeit  $G(m_{Gesamt})$  der Masse des Wassers im Versuchseisspeicher (Speichermasse) in Abhängigkeit von der Temperatur  $\vartheta_W$  des zulaufenden Wassers während des Befüllvorgangs. Bei einer erweiterten Messunsicherheit von  $U(\dot{m}) < \pm 2 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$  des kalibrierten Coriolis-Massenstrommessgerätes ergibt sich eine Genauigkeit der gesamten Speichermasse von  $G(m_{Gesamt}) < \pm 0,2 \%$ . Um den Beladungsgrad mit einer angestrebten Genauigkeit von  $G(S_{oc}) = \pm 2 \%$  zu bestimmen, ist eine Genauigkeit der Speichermasse von  $G(m_{Gesamt}) < \pm 0,2 \%$  bei der Befüllung des Versuchseisspeichers mit einem kalibrierten Coriolis-Massenstrommessgerät ausreichend.



**Abb. 18:** Erweiterte Messunsicherheit  $U(\dot{m})$  des Coriolis Massendurchflussmessgerätes zur Befüllung des Versuchseisspeichers, sowie die daraus resultierende Genauigkeit der gesamten Speichermasse im Versuchsspeicher in Abhängigkeit von der Wassertemperatur während des Füllvorgangs

## 10. Erste Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Versuchseisspeicher

Abb. 20 zeigt die Eisformation, die sich während der Entzugsphase um die Wärmeübertragerrohre des Versuchseisspeichers mit einem Volumen vom 12 m<sup>3</sup> gebildet hat. Tabelle 3 zeigt die Massenbilanz der ersten beiden Vorversuche für eine Entzugsphase bis zu je einem Beladungsgrad von  $S_{OC} = 0,347$  und  $S_{OC} = 0,128$ . Bei dem Vorversuch Nr. 1 ist eine Genauigkeit der Gesamtmasse von  $G(m_{Gesamt}) = 2,0\%$  gegeben. Diese Abweichung ist mit Schwierigkeiten bei der Befüllung und beim Abpumpen des restlichen flüssigen Wassers am Ende der Entzugsphase zu begründen. Im 2. Vorversuch wurde eine Genauigkeit der Gesamtmasse von  $G(m_{Gesamt}) = 0,19\%$  erreicht. Dies entspricht einer Massendifferenz von  $\Delta m_{Gesamt} = 17,1\text{ kg}$  und kann als sehr gut bezeichnet werden. Abb. 22 zeigt den Verlauf der indirekten Eismasse während der Entzugsphase im 2. Vorversuch. Es ist erkennbar, dass zu Beginn die indirekt ermittelten Eismassen aller Sensoren ähnlich sind. Der Sensor D (Radarwelle) zeigt jedoch nach einer Betriebszeit von ca. einem halben Tag eine Drift. Die Eismasse, bestimmt durch den Sensor D (Radarwelle), ist dadurch geringer als bei den anderen Sensoren. Nach 1,5 Tagen gefriert der Eismantel, der sich um die Entzugsrohre gebildet hat, an der Speicherwand fest. Dies ist durch Frostbildung an der Speicheraußenwand erkennbar (vgl. Abb. 21). Dadurch wird die Auftriebskraft von Sensor F (Auftrieb) und damit auch die Eismasse nicht richtig bestimmt. Nach ca. 5,8 Tagen wurde der Entzug gestoppt und eine Stillstandphase wurde begonnen. An den Sensoren C1 bis C3 und dem Sensor D ist ein „nachvereisen“ durch eine Homogenisierung der Temperatur des Eises erkennbar (vgl. Abb. 22). Auf Grund von Wärmegewinnen über die Speicherwand beginnt die Eismasse ab dem 6,8-ten Tag wieder abzunehmen. Am 7. Tag löst



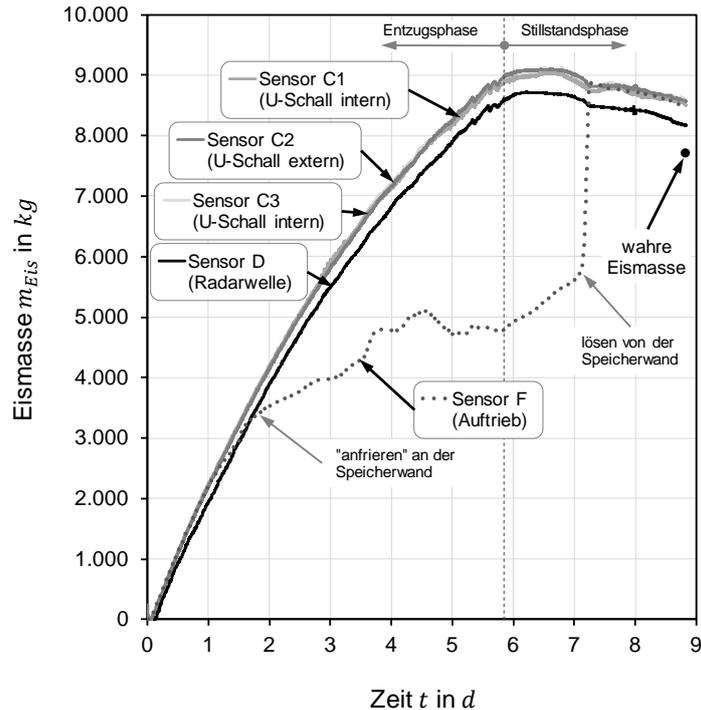
**Abb. 20:** Blick in den Versuchseisspeicher auf die Eisformation, die sich um die Wärmeübertragerrohre gebildet hat



**Abb. 21:** Frostbildung an der Speicheraußenwand

**Tabelle 3:** Ermittelte Massenbilanz der ersten Vorversuche

Vorversuch	Beladungsgrad $S_{OC}$	Speicher- masse $m_{Gesamt}$	Eismasse Referenz $m_{Eis,R}$	Restliches Wasser $m_{liquid,Rest}$	Massen- differenz $\Delta m_{Gesamt}$	Genauigkeit Gesamtmasse $G(m_{Gesamt})$
1	0,347	9.015 kg	5.883 kg	2.949 kg	183 kg	2,0 %
2	0,128	8.831 kg	7.703 kg	1.112 kg	17,1 kg	0,19 %



**Abb. 22:** Verlauf der kontinuierlichen, indirekten Eismassenbestimmung mit dem Sensor F (Auftrieb), den U-Schall Sensoren C1, C2 und C3 (Pegeländerung), dem Radarwellen Sensor D (Pegeländerung) sowie mit der wahren Eismasse (Referenz) während der Entzugsphase im 2. Vorversuch

sich durch den Schmelzvorgang der an der Speicherinnenwand anhaftende Eismantel. Nach rel. kurzer Zeit wird mit dem Sensor F (Auftrieb) nahezu die gleiche Eismasse wie mit den Sensoren C1 bis C3 (Pegeländerung) bestimmt. Das restliche flüssige Wasser wurde am Ende des Vorversuches aus dem Speicher abgepumpt und die wahre Eismasse bestimmt. Bei den beiden Vorversuchen ist eine Abweichung der indirekt bestimmten Eismasse gegenüber der wahren Eismasse am Ende der Entzugsphase feststellbar. Tabelle 4 gibt die Abweichung der indirekt bestimmten Eismasse gegenüber der wahren Eismasse wieder. Die Abweichung der indirekt bestimmten Eismasse kann durch Luft einschüsse hervorgerufen werden.

**Tabelle 4:** Vergleich der mittels verschiedener Beladungssensoren ermittelten Eismasse  $m_{Eis,S}$  mit der wahren Eismasse  $m_{Eis,R}$  (Referenz)

Vor- versuch	Beladung $S_{0C}$	Abweichung Sensor F	Abweichung Sensor C1	Abweichung Sensor C2	Abweichung Sensor C3	Abweichung Sensor D
		$\frac{m_{Eis,F} - m_{Eis,R}}{m_{Gesamt}}$	$\frac{m_{Eis,C1} - m_{Eis,R}}{m_{Gesamt}}$	$\frac{m_{Eis,C2} - m_{Eis,R}}{m_{Gesamt}}$	$\frac{m_{Eis,C3} - m_{Eis,R}}{m_{Gesamt}}$	$\frac{m_{Eis,D} - m_{Eis,R}}{m_{Gesamt}}$
1	0,347	8,5 %	9,5 %	10,4 %	nicht in Betrieb	7,8 %
2	0,128	8,8 %	9,1 %	9,7 %	9,9 %	5,3 %

$m_{Eis,F}$  : Sensor F (Auftrieb)

$m_{Eis,C1}$  : Sensor C1 (U-Schall – intern)

$m_{Eis,C2}$  : Sensor C2 (U-Schall – extern)

$m_{Eis,C3}$  : Sensor C3 (U-Schall – intern)

$m_{Eis,D}$  : Sensor D (Radarwellen – extern)

Am Anfang der Entzugsphase bildet sich kristallklares Eis um die Entzugswärmeübertrager (vgl. Abb. 23). Gegen Ende der Entzugsphase sind Lufteinschlüsse im Eis erkennbar (vgl. Abb. 24). Sowohl bei der Auftriebskraftmessung als auch bei der Pegeländerung erfolgt die indirekte Eismassenbestimmung volumenbasiert. In Folge dessen bewirken Lufteinschlüsse im Eis eine Überschätzung der Eismasse. Für eine Korrektur der Eismasse wurde ein Luftanteil im Eis von 1 % abgeschätzt. Dadurch ergibt sich gegenüber reinem Eis eine veränderte Dichte des Eis/Luft-Gemisches. In Tabelle 5 ist die volumengewichtete Dichte eines Eis/Luft-Gemisches bei einem 1 % Volumenanteil von Luft im Eis angegeben. Bei einer indirekten Bestimmung der Eismasse nach Gl. 10 (basierend auf der Auftriebskraft) und Gl. 12 (Pegelstandsänderung) mit einer korrigierten Dichte ergeben sich die in Tabelle 6 angegebenen Abweichungen zur wahren Eismasse. Die Abweichungen zur wahren Eismasse fallen durch eine Korrektur der Dichte von Eis bei allen Sensoren deutlich geringer aus. Negative Werte bedeuten eine Unterschätzung der Eismasse. In Abb. 25 ist die aus den beiden Vorversuchen ermittelte indirekte Eismasse mit dem Sensor F (basierend auf der Auftriebskraft), den Sensoren C1 bis C3 (U-Schall, Pegelstandsänderung) und der Sensor D (Radarwellen, Pegelstandsänderung) am Ende des Versuchs über der wahren Eismasse aufgetragen.



**Abb. 23:** Kristallklares Eis ohne Lufteinschlüsse am Anfang der Entzugsphase beim 2. Vorversuch



**Abb. 24:** Lufteinschlüsse im Eis am Ende der Entzugsphase; konnte bei beiden Vorversuchen beobachtet werden.

**Tabelle 5:** Korrektur der Dichte von Eis auf Grund von Lufteinschlüssen im Eis

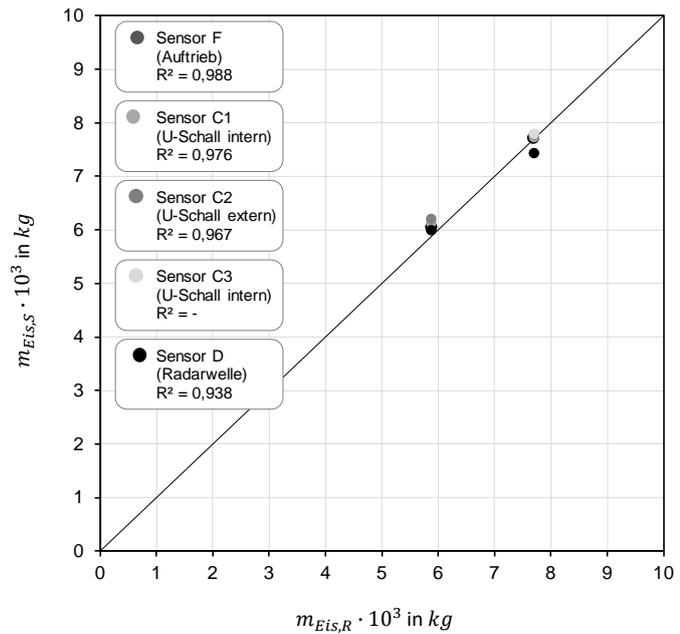
Dichte von Eis ( $\vartheta_{Eis} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Dichte Eis/Luft-Gemisch (volumengewichtet) $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Volumenanteil Luft im Eis %
916,67	907,9	1 %

**Tabelle 6:** Abweichung der mit Beladungssensoren  $m_{Eis,S}$  bestimmte und dichtekorrigierten Eismasse zur wahren Eismasse  $m_{Eis,R}$

Vorversuch	Beladung $S_{0C}$	Abweichung Sensor F $\frac{m_{Eis,F} - m_{Eis,R}}{m_{Gesamt}}$	Abweichung Sensor C1 $\frac{m_{Eis,C1} - m_{Eis,R}}{m_{Gesamt}}$	Abweichung Sensor C2 $\frac{m_{Eis,C2} - m_{Eis,R}}{m_{Gesamt}}$	Abweichung Sensor C3 $\frac{m_{Eis,C3} - m_{Eis,R}}{m_{Gesamt}}$	Abweichung Sensor D $\frac{m_{Eis,D} - m_{Eis,R}}{m_{Gesamt}}$
1	0,347	0,8 %	1,7 %	2,5 %	nicht in Betrieb	0,2 %
2	0,128	- 1,2 %	- 1,0 %	- 0,4 %	- 0,2 %	- 4,3 %

Der Sensor F, welcher die Eismasse auf Basis der Auftriebskraft des am Entzugswärmeübertrager anhaftenden Eises ermittelt, weißt eine Übereinstimmung mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,988$  mit der wahren Eismasse auf. Anhand dieser beiden Vorversuche kann für die Beladungssensoren eine erweiterte Messunsicherheit  $U(m_{Eis,S})$  nach Gl. 6 und eine Genauigkeit der Bestimmung des Beladungsgrads  $G(S_{oc})$  bestimmt werden. Tabelle 6 zeigt die ersten Ergebnisse auf Basis der beiden Vorversuche. Dabei konnte der Beladungssensor F die Eismasse mit einer Messunsicherheit von  $U(S_{oc}) = \pm 397 \text{ kg}$  bestimmen.

Dies entspricht eine Genauigkeit zur Bestimmung des Beladungsgrad von  $G(S_{oc}) = 4 \%$ . Die U-Schall Sensoren C1 und C2 erreichen für beide Vorversuche eine Genauigkeit von  $G(S_{oc}) = 5 \%$  (Sensor C1) und  $G(S_{oc}) = 7 \%$  (Sensor C2). Der Sensor C3 (U-Schall, Pegelstandsänderung) war erst bei dem 2. Vorversuch betriebsbereit. Bei diesem 2. Vorversuch erreichte der U-Schall Sensor C3 eine Genauigkeit von  $G(S_{oc}) = 3 \%$ . Der Sensor D (Radarwelle) erreicht eine Genauigkeit von  $G(S_{oc}) = 12 \%$ . Diese vorläufigen Ergebnisse werden durch weitere Messungen präzisiert.



**Abb. 25:** Eismasse bestimmt durch div. Sensoren im Vergleich zur Referenzmessung

**Tabelle 6:** Erste Ergebnisse der beiden Vorversuche: Genauigkeit der Bestimmung des Beladungsgrads und die erweiterte Messunsicherheit  $U_{SVS}(m_{Eis,S})$  von Beladungssensoren

	Sensor F (Auftrieb)	Sensor C1 (U-Schall)	Sensor C2 U-Schall)	Sensor C3 (U-Schall)	Sensor D (Radarwelle)
Genauigkeit der Bestimmung des Beladungsgrad $G(S_{oc})$	<b>4 %</b>	<b>5 %</b>	<b>7 %</b>	<b>3 %</b>	<b>12 %</b>
Anzahl Versuche $N$	2	2	2	1	2
Erweiterungs-faktor $k$	4,303	4,303	4,303	12,706	4,303
erweiterte Messunsicherheit $U_{SVS}(m_{Eis,S})$	$\pm 397 \text{ kg}$	$\pm 532 \text{ kg}$	$\pm 692 \text{ kg}$	$\pm 275 \text{ kg}$	$\pm 1.167 \text{ kg}$
rel. erweiterte Messunsicherheit $W_{SVS}(m_{Eis,S})$	$\pm 5,7 \%$	$\pm 8,6 \%$	$\pm 12 \%$	$\pm 3,6 \%$	$\pm 15 \%$

## Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der hier vorgestellten Untersuchungen ist es eine möglichst kostengünstige und zuverlässige Sensorik zur Messung des Beladungsgrades von Eisspeichern zu entwickeln, um so deren sicheren Betrieb zu gewährleisten und gleichzeitig einen zuverlässigen Parameter für prognosebasierte Systemregelungsverfahren bereitzustellen. Die Beladungssensoren müssen über die Dauer der Betriebszeit der Gesamtanlage eine möglichst hohe Genauigkeit bei der Bestimmung des Beladungsgrades ermöglichen. Zur Bewertung von Beladungssensoren für Latentspeicher wird die tatsächliche bzw. wahre Eismasse im Eisspeicher sowie die Messunsicherheit des verwendeten Messverfahrens bestimmt. Die experimentelle Validierung der Methode zur Bestimmung der wahren Eismasse erfolgte mit einem Modelleisspeicherprüfstand im Labormaßstab. Die Bestimmung der Messunsicherheit von Beladungssensoren, die auf der indirekten Bestimmung des Beladungsgrades durch die Änderung des Wasserstandes im Speicher beruhen, wurde an einem durch das IGTE entwickelten und realisierten Pegelprüfstand ermittelt. Für weitere Untersuchungen und Entwicklungen und insbesondere auch für die Prüfung der Praxistauglichkeit der Beladungssensoren wurde ein Versuchseisspeicher im Realmaßstab mit einem Volumen von 12 m<sup>3</sup> im Außenlabor des IGTE errichtet. Mit der am Versuchseisspeicher installierten umfangreichen Messtechnik und den entsprechenden Berechnungsverfahren ist die direkte Bestimmung des wahren Beladungsgrades sowie die kontinuierliche indirekte Bestimmung des Beladungsgrades möglich. Der angestrebte Bereich der Genauigkeit der Bestimmung des Beladungsgrades von  $G(S_{oc}) \pm 5\%$  wird in den beiden Vorversuchen mit dem Sensor F (basierend auf der Auftriebskraft) mit  $G(S_{oc}) = 4\%$  und in dem 2. Vorversuch mit dem U-Schall Sensor C3 mit  $G(S_{oc}) = 3\%$  erreicht. Diese vorläufigen Ergebnisse werden im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens durch weitere Messungen präzisiert. Des Weiteren erfolgen umfangreiche Untersuchungen am Versuchseisspeicher, um u. a. auch eine zeitaufgelöste Erfassung der relevanten Energieströme zu ermitteln und so den Versuchseisspeicher vollständig energetisch zu bilanzieren.

## Literatur

DIN EN ISO 20988 (2007): Leitlinien zur Schätzung der Messunsicherheit. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, Beuth Verlag 2007

MINDER, Stefan; WAGNER, Roland; MÜHLEBACH, Martin; WEISSKOPF, Thomas (2014).: Eisspeicher-Wärmepumpen-Anlagen mit Sonnenkollektoren- Technologiestudie. In: Schlussbericht im Auftrag von Bundesamt für Energie, 15. Sept. 2014.

## 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.

