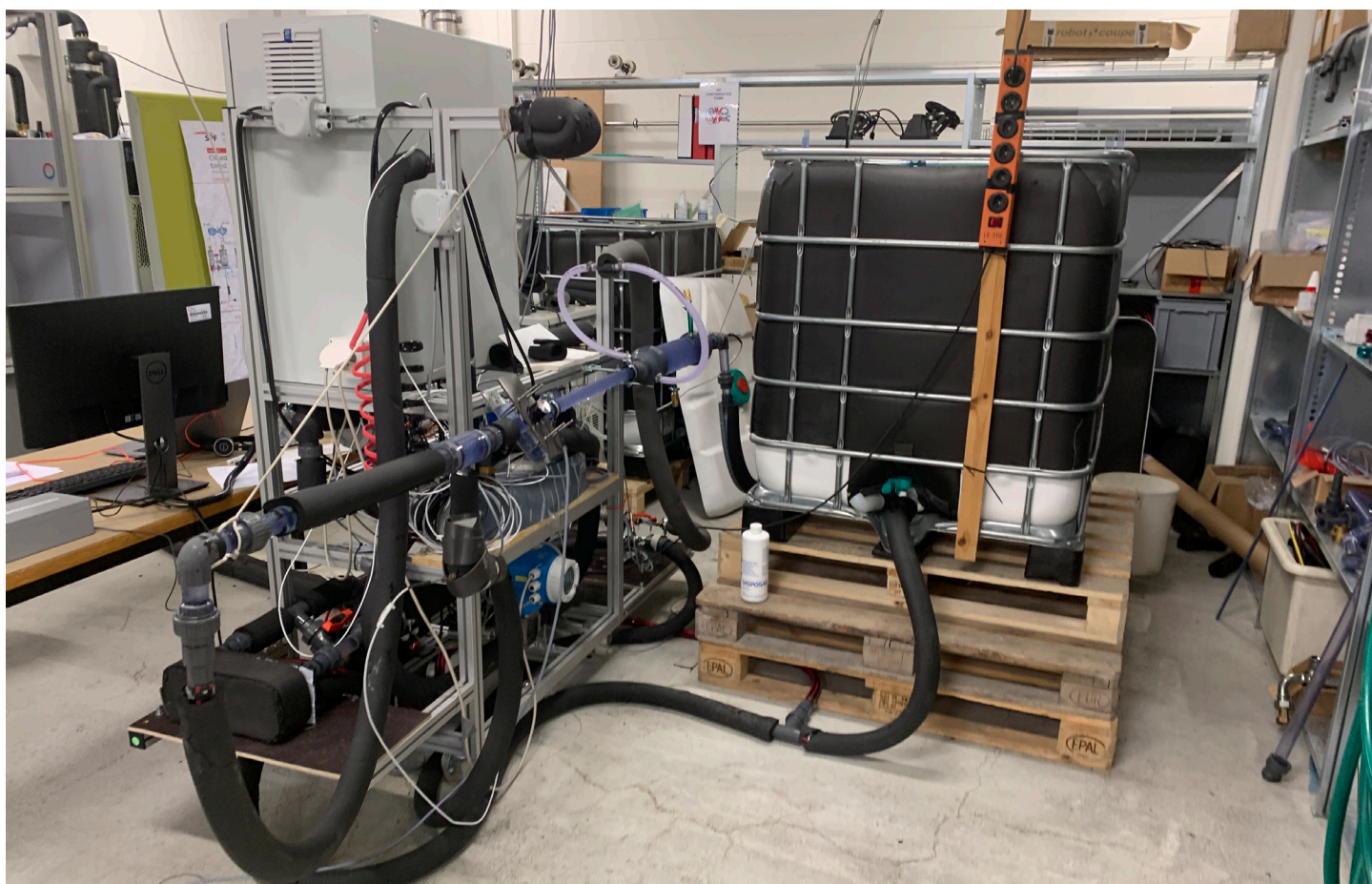


# EISBREI SPEICHERT ENERGIE

Eisspeicher haben ein grosses Potenzial zur Bereitstellung bzw. Zwischenspeicherung von Wärme und Kälte. Sie können in Wohngebäuden, aber auch in der Industrie für Kühl- und Heizzwecke eingesetzt werden. Damit Eisspeicher vermehrt Anwendung finden, müssen sie kostengünstiger und flexibler einsetzbar werden. Mit diesem Ziel arbeiten Forscherinnen und Forscher der Ostschweizer Fachhochschule an einem neuen Speicherkonzept, das einen Phasenwechsel von Wasser nutzt und das Eis in Form von «Slurry» – einer Art Eisbrei – speichert.



Im Rahmen des SlurryStore-Projekts wurde an der OST in Rapperswil dieser Prototyp eines Eisslurry-Speichers entwickelt: Links der Kristallisator, rechts der Speichertank. Der Supercooler ist in der Mitte erkennbar: das blau-graue, horizontal gelagerte Teil zwischen den schwarzen, isolierten Rohren. Foto: OST

Das energetische Speicherpotenzial von Eisspeichern beruht auf der latenten Wärme, die beim Phasenwechsel von Wasser zu Eis freigesetzt wird. Die heute gebräuchlichen Speicher bestehen aus einem Wassertank, der gleichmässig von einem Wärmetauscherrohr durchzogen ist. In diesem Rohr zirkuliert eine Wasser-Frostschutz-Mischung, die dem Wasser im Speicher bei tiefen Temperaturen, auch leicht unter dem Gefrierpunkt, Wärme entziehen kann. Die durch die Wärmepumpe erzeugte Wärme kann als Heizwärme oder für Warmwasser genutzt werden. Durch den Wärmeentzug bildet sich auf der Oberfläche der Wärmetauscherrohre eine stetig wachsende Eisschicht. Sobald Wärme – z.B. aus Solarkollektoren – über den Wärmetauscher zugeführt wird, schmilzt das Eis im Eisspeicher. Eisspeicher können aber nicht nur als Wärmequelle genutzt werden. Solange Eis vorhanden ist, lassen sie sich auch für die Bereitstellung von Kälte nutzen.

Der Aufbau von konventionellen Eisspeichern ist bestehend einfach, sie kommen ohne bewegliche Teile aus. Allerdings ist der Aufbau der Wärmetauscherrohre teuer. Zudem wirkt die auf der Oberfläche der Wärmetauscherrohre wachsende Eisschicht als thermischer Isolator: Sie hemmt den Wärme- bzw. Kälteübergang zwischen Frostschutzmittel und Tankinhalt und vermindert damit die Effizienz des Speichers. Diese Nachteile möchte ein Team aus Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern der Ostschweizer Fachhochschule durch Nutzung einer Phasenwechsel-Slurry ausmerzen. Slurry be-

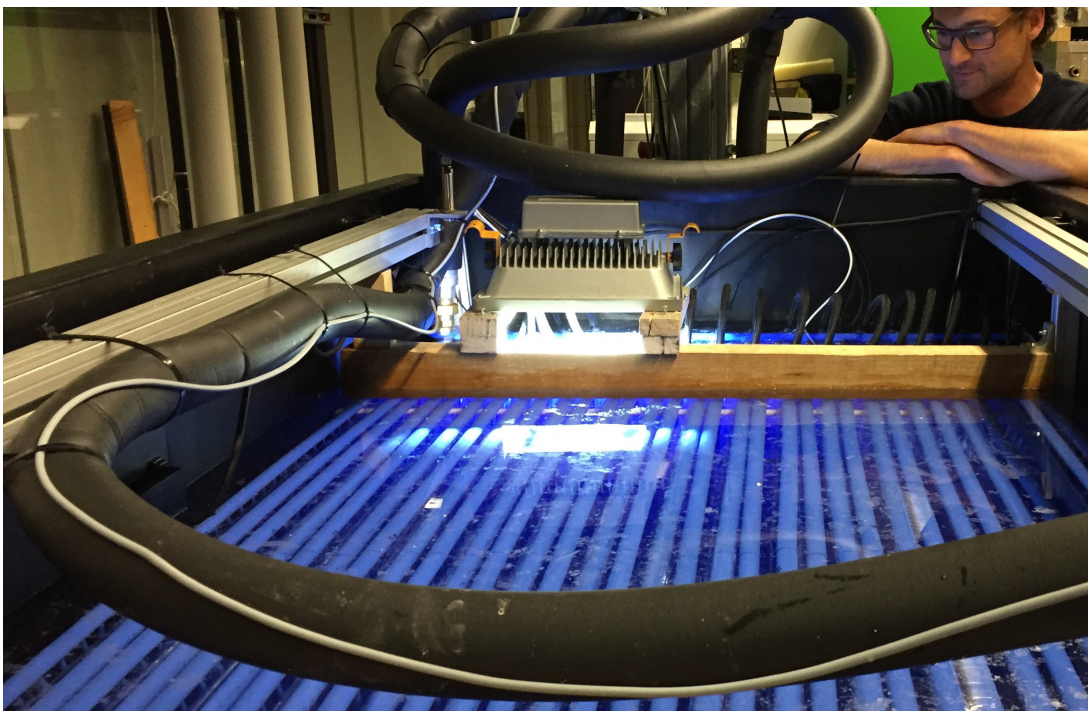


Eisbrei strömt in den Speichertank. Foto: OST

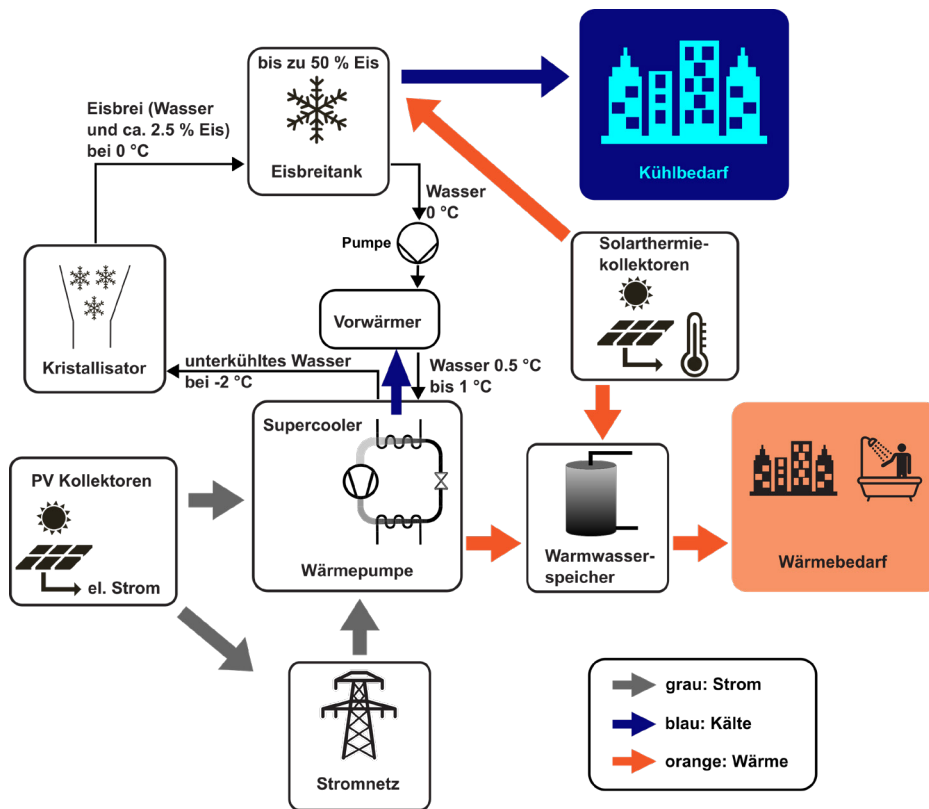
zeichnet in diesem Fall einen Brei aus Wasser und Eiskristallen mit einer Grösse von ca. 0.5 bis 1 cm. Beim Eis-slurry-Speicher entsteht nach dem Wärmeentzug also nicht festes Eis, sondern ein Eisbrei.

#### **Aus unterkühltem Wasser wird Eisbrei**

Eis-slurry-Speicher sind anders aufgebaut als herkömmliche Eisspeicher. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Instituts für Solartechnik SPF der OST arbeiten seit bald zehn Jahren an einem Konzept. 2017 legte eine Gruppe um Daniel Carbonell eine Machbarkeitsstudie vor. In den BFE-finanzierten Projekten SlurryStore (2020 bis 2023) und ModIceCry-



Aufnahme eines herkömmlichen Eisspeichers bei einem früheren Versuch im SPF-Labor in Rapperswil. Unter Wasser sieht man die Wärmetauscherrohre, auf denen sich bei Wärmeentzug eine Eisschicht bildet. Foto: B. Vogel



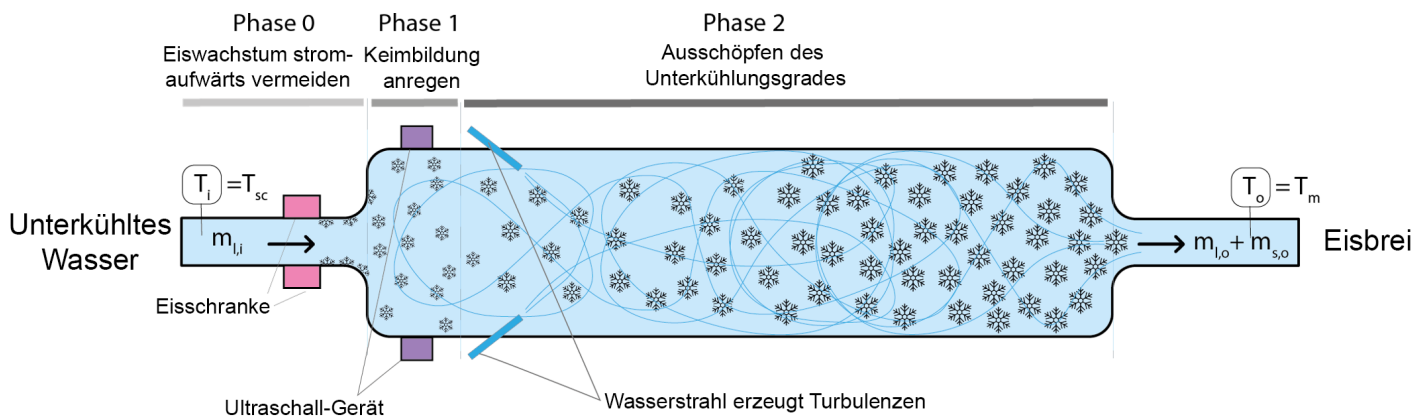
Der Eis slurry-Speicher besteht aus einem a) Eisbrei-Speichertank, b) einer Pumpe zur Förderung des unterkühlten flüssigen Wassers und des anschliessend erzeugten Eisbreis, c) einem Vorwärmer, d) einem Unterkühlungswärmetauscher («Supercooler»), der im Anwendungsfall der Verdampfer einer Wärmepumpe sein kann, und e) einem strömungsbasierten Kristallisor, der für die Umwandlung des unterkühlten Wassers in einen fluidisierten Eisbrei verantwortlich ist. Illustration: A.-K. Thamm/OST

## UNTERKÜHLUNG

Der Phasenwechsel von Wasser zu Eis erfolgt in der Regel bei  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Damit sich Eis bilden kann, braucht es einen Nukleationskeim, also einen geeigneten Ausgangspunkt, auf dem die Eiskristalle wachsen können. Ist ein solcher Keim nicht vorhanden, kann Wasser auch bei Minustemperaturen flüssig bleiben. Es ist dann «unterkühlt» (auch: «übersättigt»). Diesen physikalischen Zustand kann man unter gewissen Umständen im heimischen Tiefkühlgerät nachvollziehen: Dazu wird eine Flasche hoch-reines Wasser mit möglichst wenig Mineralstoffen im Tiefkühler auf eine Temperatur unter  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  abgekühlt, ohne dass es gefriert. Nimmt man die Flasche dann vorsichtig aus dem Tiefkühler und schüttelt sie oder klopft sie auf den Tisch, bilden sich in der Flüssigkeit Eiskristalle. Dasselbe Phänomen liegt der Herstellung des beliebten Slush-Eis-Getränks zugrunde. Die Eisbildung wird im obigen Experiment durch den Vorgang des Schüttelns/Klopfens ausgelöst. Im Kristallisor des Eis slurry-Speichers wird die Eisbildung initial durch Ultraschallwellen ausgelöst und durch geschicktes Mischen verstärkt.

Je stärker man Wasser durch Wärmeentzug unterkühlt, desto mehr Eis entsteht später bei der Kristallisation. Kühlt man dasselbe Volumen Wasser auf  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  ab statt auf  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kann man doppelt so viel Eis erzeugen. Würde man einen Liter Wasser auf  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  abkühlen, würde sämtliches Wasser zu Eis, wohingegen bei einer Abkühlung von  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  ca.  $1/20$  des Inhalts in Eis umgewandelt werden kann (unter der Annahme der sensiblen Wärme von Wasser bei  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Die Leistung eines Kristallisators (gemessen in Watt) gibt an, wie viel Energie beim Übergang von unterkühltem Wasser zu Eis umgesetzt wird. Diese Zahl ist eine wichtige Kennzahl für die Güte des Kristallisators. In der ersten Version des Kristallisators an der Ostschweizer Fachhochschule musste warmes Wasser ( $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) eingespritzt werden, damit dieser funktioniert; das hat die Leistung des Kristallisators gemindert. Der neueste Kristallisor kommt ohne das Beimischen von «warmem» Wasser aus; er arbeitet daher mit höherer Leistung.



Schema eines an der OST entwickelten Kristallisators: Von links strömt das unterkühlte Wasser ein und wird durch Kavitation (erzeugt mittels Ultraschallgerät) zur Keimbildung angeregt, wodurch sich Eiskristalle bilden. Diese setzen sich an den Wänden fest und dienen als Nukleationskeime für einen kontinuierlichen Kristallisationsprozess. Stromabwärts wachsen die Eispartikel an und werden weggespült, sobald sie eine gewisse Grösse erreichen. Um das Eiswachstum zu beschleunigen und Verklumpungen aufzubrechen, wird im Prototypen des Kristallisators 0.3-gradiges Wasser eingespritzt. Der Wasserstrahl stabilisiert das System, kostet allerdings Energie. Eine Warmwasser-Schranke sorgt dafür, dass keine Eiskristalle stromaufwärts wandern und den Supercooler vereisen. Beim Prototypen, der mit  $-2^\circ\text{C}$  unterkühltem Wasser arbeitet, wandelt der Kristallisator bei einem Durchgang weniger als 3 % des einströmenden Wassers in Eiskristalle um. Wird der Eisslurry-Speicher kontinuierlich betrieben, können in Prinzip beliebig grosse Mengen an Eisbrei produziert und in einem entsprechend dimensionierten Speichertank akkumuliert werden, der theoretisch mit bis zu 50 % Eis beladen werden kann. Illustration: OST

(2022 bis 2027) wurde bzw. wird der Eisslurry-Speicher nun experimentell und mit numerischer Modellierung erforscht. 2023 schätzte OST-Wissenschaftler Ignacio Gurruchaga das Kostensenkungspotenzial (CAPEX) des neuartigen Eisbrei-Speichers bei Einbau in ein solares Energiesystem auf 14 bis 17 % (bezogen auf den Standort Zürich; im Vergleich zu einem herkömmlichen Solar-Eisspeicher-System).

Die Hauptkomponenten sind ein Supercooler, ein Kristallisator und ein Speichertank (vgl. Abb. S. 3): Der Supercooler (auch: Unterkühlungswärmetauscher) entzieht dem einströmenden Wasser Wärme und kühlt dieses auf bis zu  $-2^\circ\text{C}$  ab. Das Wasser ist nun «unterkühlt», das heisst, seine Temperatur liegt unter dem Gefrierpunkt, es ist aber weiterhin flüssig. Das unterkühlte Wasser strömt in einen Kristallisator, der es in einen 0-gradigen Eisbrei verwandelt (hier vollführt ein Teil des Wassers den Phasenwechsel zu Eis, ohne Abgabe oder Aufnahme von Wärme aus der Umgebung). Der Eisbrei kann anschliessend in einem thermisch isolierten Tank gelagert und dort – beispielsweise durch Zuführung von Solarwärme – in Wasser rückverwandelt werden.

### Prototyp des Eisslurry-Speichers

Der Bau eines Eisslurry-Speichers hält eine Reihe von technischen Herausforderungen bereit. Im Projekt SlurryStore erreichte das OST-Team mehrere Ziele, die Zwischenschritte zu einem voll funktionsfähigen Speicher darstellen: Es wurde ein

erster Kristallisator gebaut, der während 24 h in einem kontinuierlichen Prozess Eisbrei mit einer Masse von insgesamt 70 kg herstellte. Die Leistung des Kristallisators (die im unterkühlten Wasser gespeicherte Kältenergie) betrug 560 Watt, seine Effizienz 60 %. Auf diese Weise konnte der Tank mit bis zu 12 % Eisbrei befüllt werden. Das Projektziel von 50 % wurde verfehlt – unter anderem wegen der unzureichenden Leistung des Kristallisators und weil beim Befüllen des Speichertanks Verstopfungen durch Eiswachstum auftraten. Projektleiterin Ann-Katrin Thamm zieht trotzdem eine positive Bilanz: «Mit dem Prototyp aus dem SlurryStore-Projekt konnten wir das Prinzip eines Eisslurry-Speichers erfolgreich demonstrieren, die kontinuierliche Speicherladung (Vereisen) ebenso wie die Speicherentladung (Enteisen).»

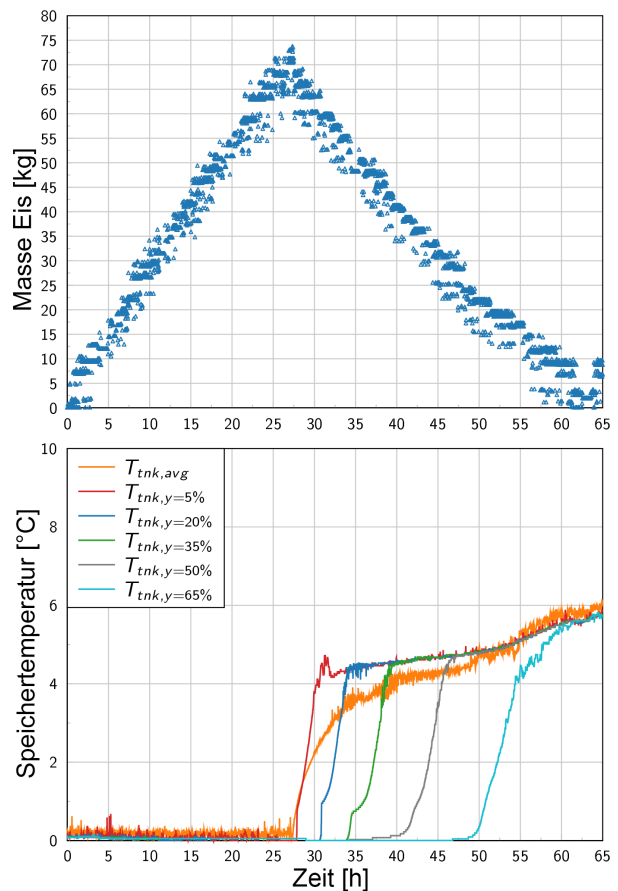
Seit Abschluss von SlurryStore wurde der Speicher nochmals optimiert. Durch Verbesserung des Mischverhaltens im Kristallisator, das die Eiskristallbildung unterstützt (Jet-Mixer), konnten die Leistung auf 1,7 kW und die Effizienz auf 77 % gesteigert werden. Im aktuell laufenden ModlceCrys-Projekt wird unter Einsatz von numerischen Modellierungen nun ein Kristallisator entwickelt, der auf einem neuen Funktionsprinzip beruht und eine Skalierung des Eisslurry-Speichers auf höhere Leistungen ermöglichen soll. Die Leistung soll in den nächsten Schritten auf 10 bzw. 20 kW angehoben werden. Für Anwendungen im Wohnsektor werden Leistungen von 50 bis 100 kW benötigt, für industrielle Kühllösungen

100 kW und mehr. Forschungsbedarf besteht ferner beim Speichertank: Dieser muss so konstruiert werden, dass die (festen) Eiskristalle vom (flüssigen) Wasser getrennt werden, bevor letzteres in den Supercooler gepumpt wird. Es dürfen nämlich keine Eiskristalle in den Supercooler gelangen, weil das unterkühlte Wasser sonst sofort (also noch im Supercooler) zu Eis kristallisieren würde. Die verschiedenen Herausforderungen wollen die OST-Forschenden unter anderem durch geeignete Design- und Materialwahl meistern.

### Eine neue Generation von Eisspeichern

Ann-Katrin Thamm blickt optimistisch in die Zukunft: «Wir hoffen, in den nächsten drei bis vier Jahren einen einsatztauglichen Eisslurry-Speicher bauen zu können. Dank seiner tieferen Investitionskosten wäre er den heute gebräuchlichen Eisspeichern mit Wärmetauscherrohren überlegen und könnte diese mittelfristig ablösen.» Ihr OST-Kollege Ignacio Gurruchaga, der im Eisslurry-Projekt mitarbeitet, sieht einen weiteren Vorteil im Umstand, dass sich der Speichertank in einem Haus an einem beliebigen Ort unterbringen lässt, also sehr flexibel wäre. Der Eisbrei könne durch Rohrleitungen verteilt werden, betont Gurruchaga. Dadurch könnten neuartige Wärme- und Kältelösungen in Arealnetzen möglich werden.

- Der **Schlussbericht** zum Projekt «Slurry Store – Experimental and numerical investigations of ice slurry storages» ist abrufbar unter:  
<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=47202>.
- Die laufenden **Arbeiten** zum Projekt «CFD Numerische Modellierung und experimentelle Analyse von Eiskristallisatoren für unterkühlte Strömungen» (ModIceCrys) sind dokumentiert unter:  
<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=51652>.
- **Auskünfte** zum Projekt erteilt Stephan A. Mathez ([stephan.mathez@bfe.admin.ch](mailto:stephan.mathez@bfe.admin.ch)), externer Leiter des BFE-Forschungsprogramms Solarthermie und Wärmespeicherung.
- Weitere **Fachbeiträge** über Forschungs-, Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte im Bereich Solarthermie und Wärmespeicherung finden Sie unter [www.bfe.admin.ch/ec-solar](http://www.bfe.admin.ch/ec-solar).



Die beiden Grafiken zeigen die Eisbildung (oben) und die Temperaturentwicklung (unten) im Speichertank in einem 65-Stunden-Versuch. In den ersten 28 Stunden wurde der Speicher mit 0-grädigem Eisbrei beladen; in der Folge wuchs die Eismenge im Speicher, die Temperatur verharrte auf 0 °C. Ab Stunde 28 wurde der Speicher entladen, indem ihm Wärme zugeführt wurde (bei einem realen Speicher wäre das typischerweise Solarwärme). Die Wärme wird dem Speicher von unten zugeführt; das hat zur Folge, dass das Eis im Speicher schmilzt, und zwar von unten nach oben. Die rote Linie zeigt den Wärmeverlauf ganz unten im Speicher, die hellblaue Linie den Wärmeverlauf ganz oben. Grafik: OST