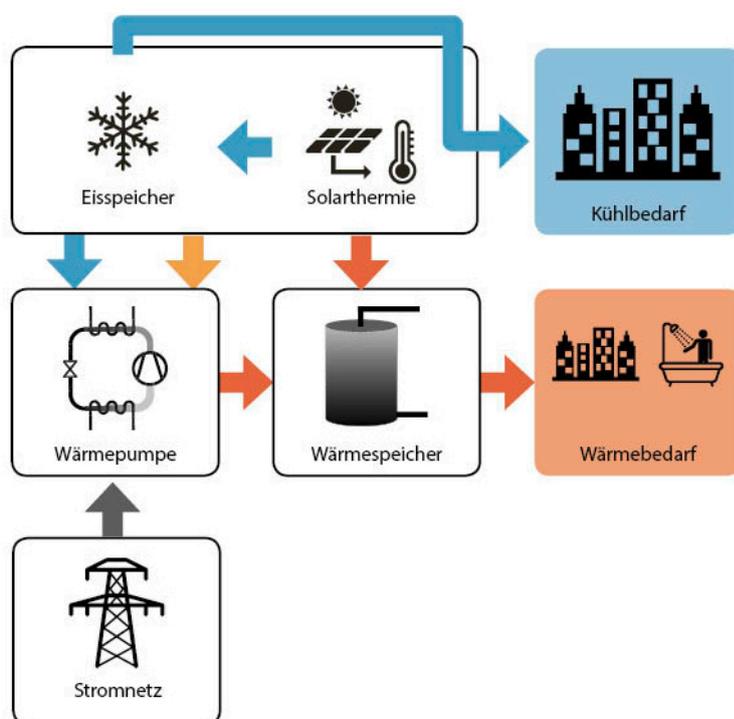


# ENERGIEVERSORGUNG AUS SONNE UND EIS

Die Übertragung der sommerlichen Wärme in den Winter ist eine zentrale Aufgabe für ein erneuerbares Energieversorgungssystem. Eine vielversprechende Technologie hierfür sind Solar-Eis-Speicher-Systeme: Sonnenkollektoren regenerieren Eis, das durch eine Heizungs-Wärmepumpe gebildet wurde. So eingesetzt liegt die Energieausbeute der Kollektoren im Sommer und Winter um ein Vielfaches höher als bei herkömmlichen Solaranlagen. Ein Forscherteam der Ostschweizer Fachhochschule hat untersucht, in welchen Fällen Solar-Eis-Systeme bei Mehrfamilienhäusern besonders effizient arbeiten. Zudem hat das Team einen Algorithmus als Grundlage für ein künftiges Online-Dimensionierungs-Tool entwickelt. Mit dem Tool sollen Bauherren in einer frühen Planungsphase abschätzen können, ob sich in ihrem Gebäude der Einbau eines Solar-Eis-Systems lohnt.



Schematische Darstellung eines Solar-Eis-Systems zur Produktion von Heizwärme und Warmwasser, aber auch von Kälte zur Deckung des Kühlbedarfs. Illustration: BFE-Schlussbericht Big-Ice

Wärmepumpen haben sich in den letzten 20 Jahren zum beliebtesten Heizsystem in der Schweiz entwickelt. Wärmepumpen stellen Heizwärme und Warmwasser mit einem Minimum an elektrischer Energie bereit. Sie nutzen dafür Wärme aus Umgebungsluft, Erdreich oder – wenn diese gängigen Wärmequellen nicht genutzt werden können – Solar Kollektoren. Seit einigen Jahren werden Wärmepumpen-Solar Kollektor-Systeme zur Steigerung der Gesamteffizienz um einen Eisspeicher erweitert. Ein Eisspeicher ist nichts anders als ein mit Wasser gefüllter Betonbehälter, in den sensible und latente Wärme eingelagert und bei Bedarf wieder entzogen werden können (vgl. Textbox unten). Solar-Eis-Systeme haben das Potenzial, grosse Wärmemengen vom Sommer in den Winter zu verlagern – um die Wärme dann über eine Wärmepumpe zum Heizen zu nutzen. Im Sommer sind Solar-Eis-Systeme dank sensibler Wärme effizienter als Erdsonden-Wärmepumpen, im Winter sind sie dank latenter Wärme effizienter als Luft-Wasser-Wärmepumpen.

Der Einsatz von Solar-Eis-Systemen in Einfamilienhäusern ist relativ teuer. „Wir sehen das eigentliche Potenzial dieses Wärmeerzeugungssystems bei Mehrfamilienhäusern, denn hier lohnt sich der Bau eines Eisspeichers“, sagt Dr. Daniel

## SENSIBLE UND LATENTE WÄRME

Als ‚sensible‘ Wärme bezeichnet man jene Wärme, die die Temperatur eines Stoffes verändert (z.B. Wasser von 0 auf 10 °C erwärmt). Davon zu unterscheiden ist ‚latente‘ Wärme: Das ist die Wärme, die nötig ist, um 0-grädiges Eis in 0-grädiges Wasser zu verwandeln. Die Nutzung der latenten Wärme ist das Schlüsselement von Eisspeichern: Das Schmelzen von Eis braucht 80mal mehr Energie als das Erwärmen von Wasser um 1 Grad. Umgekehrt steht diese Energie beim Vereisen des Wassers als latente Wärme für die Wärmepumpe zur Verfügung.

Ist ein Eisspeicher mit Wärme ‚gefüllt‘, hat das Wasser eine Temperatur von bis zu 30 °C. Beim ‚Entladen‘ der Wärme wird aus dem Speicher nun erst sensible Wärme entzogen (Wasser kühlt ab), dann latente Wärme (das 0-grädige Wasser vereist). Je nach Zustand des Speichers wird dem Speicher beim ‚Laden‘ latente Wärme zugeführt (das Eis schmilzt) oder sensible Wärme (die Wassertemperatur steigt). BV.



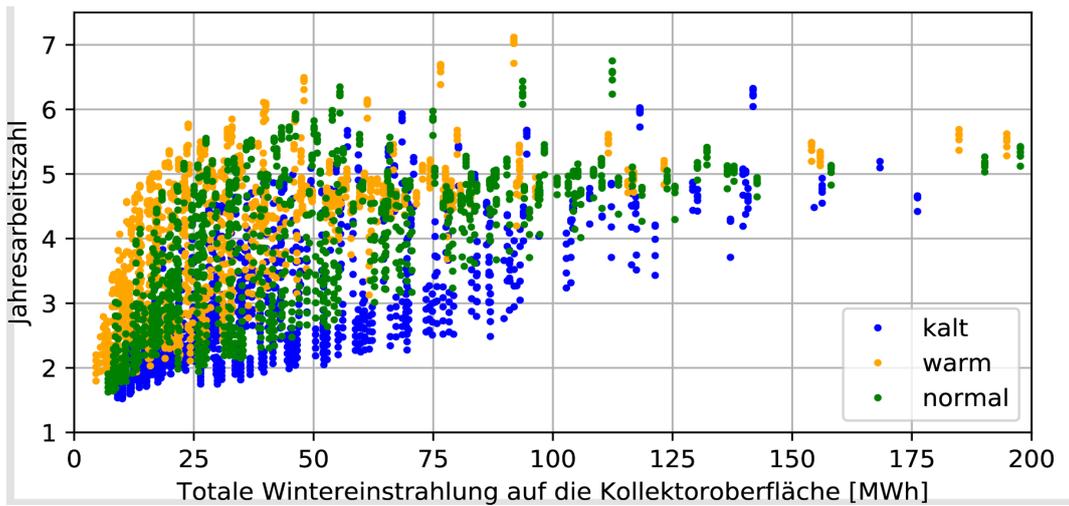
Das Team des Big-Ice-Projekts (v.l.n.r.): Dr. Daniel Carbonell, Dr. Martin Neugebauer, Maike Schubert. Fotos: privat

Carbonell, Leiter ‚Thermische Systeme und Modellierung‘ am Institut für Solartechnik (SPF) der Ostschweizer Fachhochschule (OST). Der Solarenergie-Experte hat zusammen mit einem OST-Forscherteam die Leistungsfähigkeit von Solar-Eis-Systemen in Mehrfamilienhäusern untersucht. Das Forschungsprojekt mit dem Namen ‚Big Ice‘ wurde vom Bundesamt für Energie unterstützt.

### Software-Tool zur Abklärung der Machbarkeit

Die Ergebnisse der Untersuchung bilden die Grundlage für die Entwicklung eines Software-Werkzeugs für Bauherrinnen und Bauherren. Mit diesem Tool könnten sie und ihre Planer künftig schnell und einfach beurteilen, ob bei Neubauten oder der Erneuerung eines Mehrfamilienhauses der Einbau eines Solar-Eis-Systems erfolgversprechend ist. „Es wurde ein schneller Algorithmus entwickelt, der auf maschinellem Lernen basiert und die Systemeffizienz von Solar-Eis-Systemen mit wenigen Eingabedaten vorhersagen kann“, hält der Big-Ice-Schlussbericht fest. Zu beachten ist dabei, dass das Tool die Machbarkeit eines Solar-Eis-Systems beurteilt. Für die eigentliche Planung einer Anlage ist es aber nicht gedacht.

Bei den Eingabedaten, die das Software-Werkzeug benutzt, handelt es sich in erster Linie um den jährlichen Wärmebedarf des Gebäudes (Heizwärme und Warmwasser) sowie die solare Einstrahlung am Standort des Gebäudes. Dazu schreibt das Autorenteam im Big-Ice-Schlussbericht: „Es konnte gezeigt werden, dass unter Verwendung von jährlichen Daten über das Wetter und den Heizwärmebedarf des Gebäudes eine Vorhersage der Effizienz mit einer Genauigkeit von 10% erreicht werden kann. Werden zusätzlich der Heizwärmebedarf und die solare Einstrahlung in den Wintermonaten als Eingabeparameter berücksichtigt, kann die Genauigkeit auf 5% gesteigert werden.“ Eine Genauigkeit von 10 % (bzw. 5 %) bedeutet, dass 90 % der Daten einen Fehler von 10 % (bzw. 5 %) oder weniger aufweisen.



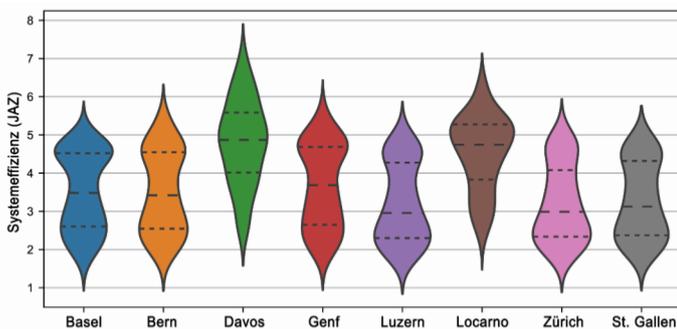
Jeder Punkt entspricht einer Simulation, die am SPF in Rapperswil durchgeführt wurde. Die Grafik zeigt den grossen Einfluss der Wetterdaten auf das Verhalten des Eisspeichers. Grafik: BFE-Schlussbericht Big-Ice

### 3600 Simulationen

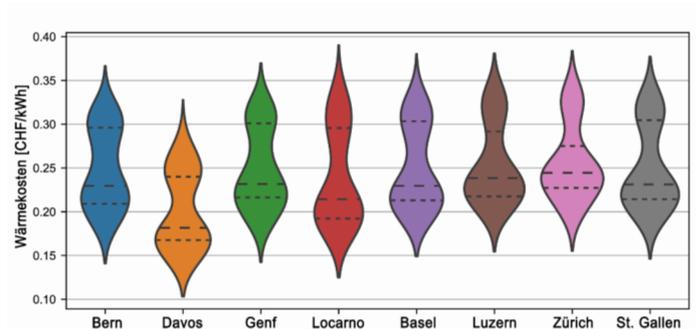
Diese allgemeingültige ‚Eis-Speicher-Formel‘ ist das praktische Ergebnis einer ausführlichen Grundlagenstudie, in der die OST-Forschenden untersuchten, welche Faktoren die Effizienz von Solar-Eis-Systemen beeinflussen. Dieser Untersuchung legten sie zwei Sechs-Familien-Häuser (Neubau mit einem Heiz- und Warmwasserbedarf von ca. 30 kWh/m<sup>2</sup>, renovierter Bestandsbau mit 100 kWh/m<sup>2</sup> in Zürich) und zwei Nutzertypen (energetisch gesehen ideales Verhalten bzw. tatsächlich beobachtetes Verhalten) zugrunde. Daraus leiteten sie vier Wärmebedarfs-Profile ab. Gleichzeitig wurden die Wetterdaten von acht Schweizer Städten aus einem warmen, einem kalten und einem durchschnittlichen Jahr herangezogen. Unter Verwendung der TRNSYS-Software wurden insgesamt 3600 Simulationen durchgeführt, in denen jeweils errechnet wurde, mit welcher Effizienz und welchem

Strombedarf sich der jeweilige Wärmebedarf mit einem Solar-Eis-System decken lässt. Die maximale Fläche des Solarkollektorfeldes wurde auf 350 m<sup>2</sup> beschränkt, was der realistischere verfügbaren Fläche des modellierten Mehrfamilienhauses entspricht.

Eine zentrale Erkenntnis: Solar-Eis-Systeme sind in der Lage, in allen untersuchten Konstellationen den Wärmebedarf mit einer guten Systemeffizienz (auch: Jahresarbeitszahl/JAZ) von 3.5 bis 4.5 zu decken – durchschnittliche Wetterlagen vorausgesetzt. Bei tieferen Aussentemperaturen sinkt die Systemeffizienz um bis zu 25%, und wie bei konventionellen Heizungen steigen dann die Energieausgaben entsprechend. Durch einen grösser dimensionierten Speicher könnte dies zwar verhindert werden, die Autorinnen und Autoren des Big-Ice-Projekts raten aber davon ab, die Anlagen auf „das



Die Grafik zeigt für acht Schweizer Städte die Verteilung der Systemeffizienz (JAZ) für alle durchgeführten Simulationen. Bei normalem und warmem Wetter ist eine Systemeffizienz über 3.5 für alle Städte erreichbar. Ziel ist, reale Systeme immer auf eine Jahresarbeitszahl von 4 bei normalen Wetterbedingungen auszuliegen. Grafik: BFE-Schlussbericht Big-Ice



Verteilung der Wärmegestehungskosten nach Städten (für alle durchgeführten Simulationen). Zum Vergleich: Das Erdsonden-Wärmepumpensystem, welches die Forscherinnen und Forscher der Ostschweizer Fachhochschule als Referenzsystem heranzogen, hat Wärmegestehungskosten von 15 bis 19 Rappen/kWh. Grafik: BFE-Schlussbericht Big-Ice

## EMPFEHLUNGEN FÜR DIE AUSLEGUNG VON SOLAR-EIS-SYSTEMEN

Die am Big-Ice-Projekt beteiligten Forscher und Forscherinnen haben ihre Erkenntnisse in Empfehlungen für Planer von Solar-Eis-Systemen zusammengefasst. Diese werden nachfolgend in vereinfachter Form wiedergegeben:

- 1) Um ökonomisch und mit einer Systemeffizienz (JAZ) von ca. 4 betrieben werden zu können, sollten Eisspeicher ein Volumen von  $0.32 \text{ m}^3_{\text{lat}}/\text{MWh}$  bis  $0.48 \text{ m}^3_{\text{lat}}/\text{MWh}$  haben. Das zugehörige Kollektorfeld sollte  $1.5 \text{ m}^2/\text{MWh}$  bis  $2.5 \text{ m}^2/\text{MWh}$  gross sein. Legt man ein Mehrfamilienhaus (renovierter Bestandsbau) mit sechs Wohnungen mit einem Wärmebedarf von typischerweise 140 MWh pro Jahr zu Grunde, ergibt sich eine Eisspeichergrosse von  $44.8 \text{ m}^3_{\text{lat}}$  bis  $67.2 \text{ m}^3_{\text{lat}}$  (entspricht einem Eisspeicher mit  $56 \text{ m}^3$  bis  $84 \text{ m}^3$  Volumen) und ein Kollektorfeld von  $210 \text{ m}^2$  bis  $350 \text{ m}^2$  (dies unter der Annahme, dass der Eisspeicher maximal zu 80 % vereisen darf).
- 2) Die Grösse des Eisspeichers und der Kollektorfläche sollten auf den Wärmebedarf im Winter ausgerichtet werden, weil der Winterbedarf eine zentrale Rolle für die Systemeffizienz spielt.
- 3) Um eine Überdimensionierung zu vermeiden, sollte das Solar-Eis-System nicht für den schlimmsten Fall ausgelegt werden, sondern für durchschnittliche Wetterbedingungen einer längeren Periode (z.B. ein Jahrzehnt).
- 4) Die direkte Nutzung der Solarwärme im Verdampfer der Wärmepumpe ist empfohlen, ausser wenn im Kollektorkreislauf im Verdampferkreislauf unterschiedliche Fluide zum Einsatz kommen.
- 5) Die direkte Nutzung von Solarwärme im Warmwasserspeicher ist empfohlen, sofern die Kollektoren hohe Temperaturen bereitstellen (wie im Fall ungedeckter Kollektoren).
- 6) Indem man das Schmelzen des Eisspeichers im Frühling stoppt, kann man Kühlenergie in die heissen Sommermonate übertragen. Mit dieser „Nice-to-have“-Betriebsweise kann man die Gesamteffizienz des Eis-Speicher-Systems um 2 bis 5 % steigern. Nach Berechnungen der OST-Forschenden stehen als Daumenregel 80 bis 100 kWh/m<sup>3</sup><sub>lat</sub> als Free-Cooling (passives Kühlen) zur Verfügung.

Das OST-Forscherteam stellt in seiner Arbeit zudem eine Formel bereit, mit der sich die Leistungsfähigkeit eines Solar-Eis-Systems mit relativ wenig Informationen in einer ersten Näherung abschätzen lässt. BV

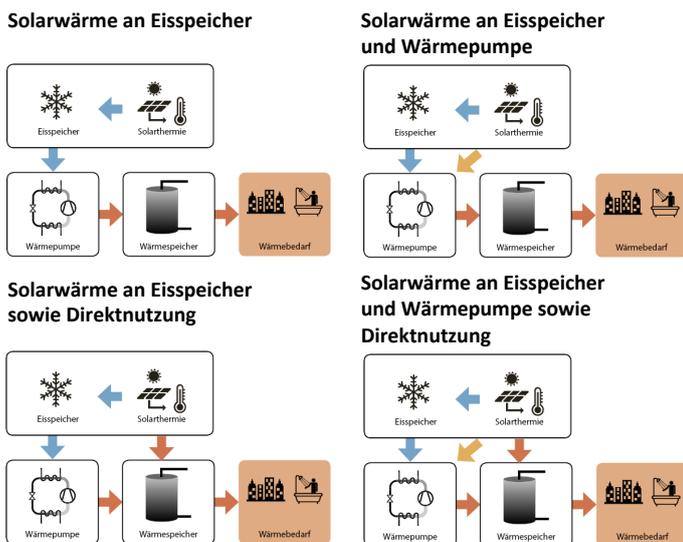
Worst-case-Szenario mit kaltem Wetter und geringer Solarstrahlung“ auszulegen, weil das zu „überdimensionierten und ökonomisch nicht optimalen Systemen“ führe (diese und weitere Empfehlungen an Planer von Solar-Eis-Systemen sind in der Textbox oben zusammengefasst).

### Nicht in jedem Fall teurer

Solar-Eis-Systeme bestehen aus einer Wärmepumpe, einem Kollektorfeld und dem Eisspeicher. Sie sind damit komplexer und tendenziell teurer als Heizsysteme mit Erdsonden-Wärmepumpen, die die Wärme dem Erdreich entziehen. Die Kosten für die Wärmeproduktion liegen gemäss OST-Berechnungen für einen renovierten Bestandsbau bei 17 bis 24 Rp./kWh, für einen Neubau zwischen 19 bis 34 Rp./kWh (jeweils abhängig von Ort, Wetter und Nutzerverhalten). „In Einzelfällen ist das Solar-Eis-System mit einem Erdsonden-Wärmepumpensystem konkurrenzfähig, in den meisten Fällen aber ist letzteres ohne Regeneration des Erdreiches günstiger.

Wenn das Erdsonden-Wärmepumpensystem allerdings um eine Regeneration ergänzt werden muss, dürfte das Solar-Eis-System die günstigere Lösung sein“, hält der Big-Ice-Schlussbericht fest.

Das Solar-Eis-System kann für die Raumkühlung im Sommer herangezogen werden. Um dies zu ermöglichen, wird das Abschmelzen des Eisspeichers im Frühjahr gestoppt, um die im Eisspeicher verbliebene Kälte in den Sommer zu retten: „Diese passive Free-Cooling-Option verursacht in gut dimensionierten Solar-Eis-Systemen in Gebieten mit geringem Kühlbedarf wie z.B. Genf keinen Anstieg des Strombedarfs“, hält der Schlussbericht fest. In Gebieten mit höherem Kühlbedarf, z.B. Locarno, kann zusätzliche Kühlkapazität geschaffen werden. Hierzu wird im Sommer das Warmwasser nicht über die Kollektoren, sondern über die Wärmepumpe bereitgestellt, womit der Eisspeicher abgekühlt wird. „Dabei sinkt die Systemeffizienz nicht, wenn Heizen und Kühlen berücksichtigt



Vier Typen für die Integration von Solar-Eis-Systemen; die blauen Pfeile zeigen Wärmeflüsse niedriger Temperatur ( $< 10\text{ °C}$ ), die roten Pfeile Wärmeflüsse höherer Temperatur ( $> 30\text{ °C}$ ). Die beiden Systeme rechts sind am verbreitetsten. Das System rechts unten benutzt ungedeckte selektive Kollektoren, die direkt Warmwasser zur Verfügung stellen. Dieses System bildet auch die Grundlage der Big-Ice-Studie, denn es wurde immer mit ungedeckten, selektiven Kollektoren kalkuliert. Diese Kollektoren sind zwar teurer, bringen aber eine bessere Systemeffizienz. Grafik: Schlussbericht Big-Ice

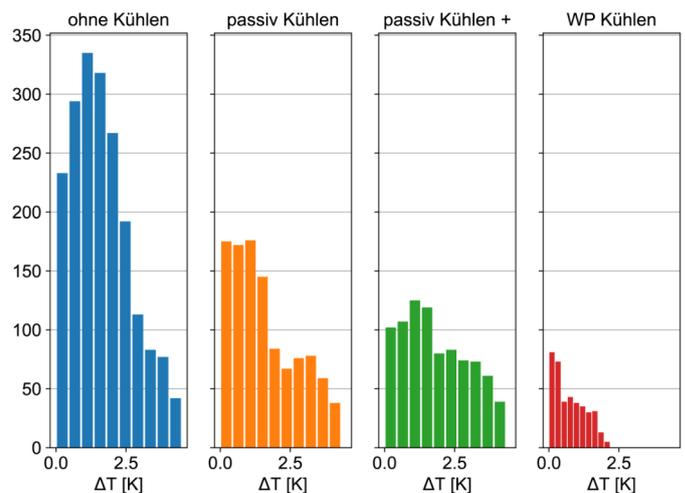
werden“, betonen die Autoren im BFE-Schlussbericht. Den Eisspeicher für Kühlzwecke heranzuziehen hat allerdings auch seine Grenzen: Für Gebäude mit einem hohen Kühlbedarf wie z.B. Bürogebäude sind Eis-Solar-Speicher-Systeme aufgrund der erforderlichen Speichergrößen nicht geeignet.

➤ Den **Schlussbericht** zum Forschungsprojekt 'BigIce – Assessment of solar-ice systems for multi-family buildings' finden Sie unter:

<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=41467>

➤ **Auskünfte** zum Projekt erteilen Dr. Daniel Carbonell ([dani.carbonell@lost.ch](mailto:dani.carbonell@lost.ch)), Wissenschaftler am Institut für Solartechnik der Ostschweizer Fachhochschule, und Stephan A. Mathez ([stephan.a.mathez@solarcampus.ch](mailto:stephan.a.mathez@solarcampus.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).



Darstellung der Stunden pro Jahr mit einer Raumtemperatur über  $26\text{ °C}$  bei Anwendung verschiedener Kühlstrategien. Passiv Kühlen (auch: ‚Free-Cooling‘) bedeutet: Die Solarkollektoren regenerieren ab dem Frühjahr den Eisspeicher nicht mehr, damit dieser möglichst viel ‚Kälte‘ in die Sommermonate ‚retten‘ kann. Passiv Kühlen+ bedeutet: Passiv Kühlen, aber die Wände des Eisspeichers sind zusätzlich isoliert. Dadurch ergibt sich der Vorteil, dass die Umgebungswärme des Erdreichs den Eisspeicher nicht abschmelzen lässt, allerdings sinkt zugleich die Systemeffizienz (JAZ) leicht. Wärmepumpen-Kühlen bedeutet: Das Warmwasser wird im Sommer nicht über die Kollektoren bezogen, sondern aus dem Eisspeicher, wodurch dem Eisspeicher Wärme entzogen wird. Mit diesem Vorgehen erhöht man das Kühlpotenzial des Eisspeichers, muss aber eine Verschlechterung der Systemeffizienz (JAZ) hinnehmen. Grafik: Schlussbericht Big-Ice