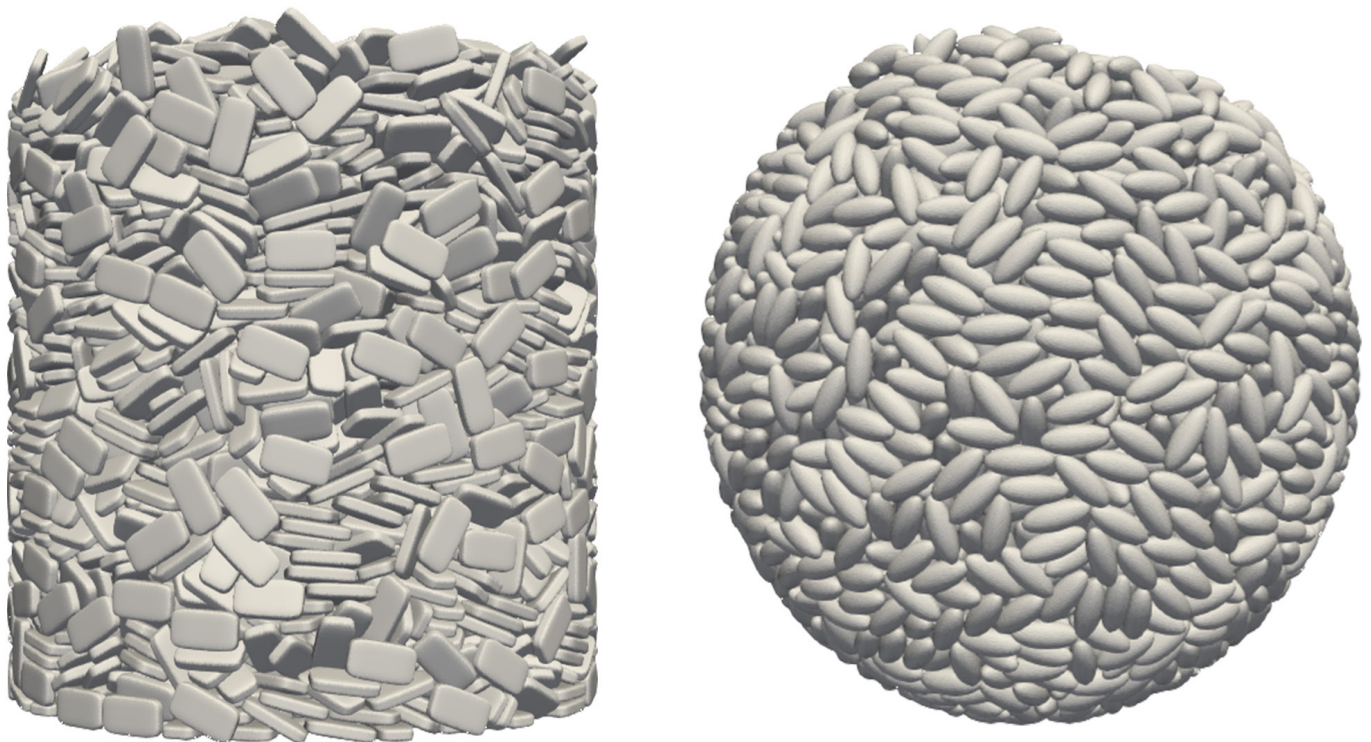


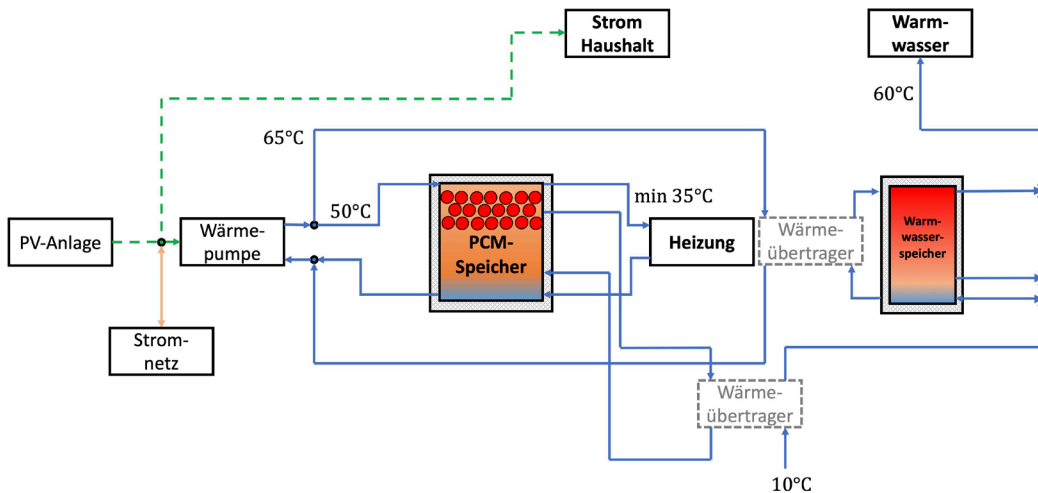
WÄRMESPEICHER PUFFERT STROM ÜBER WOCHEN

Wer eine Photovoltaik-Anlage betreibt, kann den Eigenverbrauch mithilfe eines Batteriespeichers um typischerweise 10 – 20 % steigern. Solarstrom könnte aber noch anders zur Deckung des eigenen Energiebedarfs eingesetzt werden: Indem der Strom mit einer Wärmepumpe in Wärme umgewandelt und dann zwischengespeichert wird, bis diese zum Heizen und für das Warmwasser benötigt wird. Ein Forscherteam der Hochschule Luzern arbeitet an einem Wärmespeicher auf der Basis von Phasenwechselmaterialien, der auf diese Anwendung zugeschnitten ist.



Die Visualisierung veranschaulicht zwei mögliche Speichergeometrien. Darin sind die aus dem Kunststoff Polyethylen gefertigten und mit Phasenwechselmaterialien gefüllten Kapseln zu erkennen. Illustration: Schlussbericht HyTES

Energieversorgung eines Mehrfamilienhauses mit PCM-Speicher



Schematische Darstellung des Energieversorgungssystems: Die Wärmepumpe nutzt PV-Strom zur Produktion von ca. 50°C -grädiger Wärme, die in den PCM-Speicher eingespeichert und dann für Heizzwecke verwendet wird. Das Warmwasser (60°C) wird nicht aus dem PCM-Speicher bezogen, sondern kommt direkt aus der Wärmepumpe und wird in einem Boiler gespeichert. Allerdings sind PCM- und Warmwasserspeicher gekoppelt: Das Wasser wird im PCM-Speicher vorgeheizt, bevor es in den Warmwasserspeicher gelangt. Illustration: Schlussbericht HyTES

Wer einen Öltank im Keller hat, verfügt über einen potenten Energiespeicher: Einmal im Jahr wird der Tank befüllt und liefert dann über Monate die Energie für Heizung und Warmwasser. Ölheizungen sind wegen der hohen Treibhausgasemissionen ein Auslaufmodell. Sie werden durch Heizsysteme ersetzt, die auf erneuerbaren Energien beruhen, darunter Sonnenenergie. Weil die Sonne nicht immer scheint, sind auch hier Speicherlösungen gefragt. Sie puffern überschüssige Solarenergie in sonnenreichen Zeiten, um sie Stunden oder Tage später nutzen zu können, wenn Bedarf besteht.

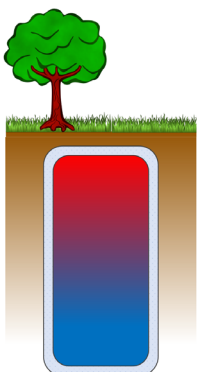
Wer mittels Photovoltaik (PV) Solarstrom erzeugt, nutzt als Speicher typischerweise eine Batterie. Wer mit Solarkollektoren Solarwärme gewinnt, kann das heiße Wasser in einem Boiler zwischenspeichern. Mit etwas grösser dimensionierten Boilern kann Wärme ohne weiteres während einer Schlechtwetterperiode von ein bis zwei Wochen gespeichert und genutzt werden. Im besten Fall lässt sich der Wärmebedarf erst-

klassig wärmegeprägter Gebäude allein mit Solarwärme vom eigenen Dach decken. «Solche saisonalen Wärmespeicher sind leistungsfähig, aber sie werden mitten im Gebäude platziert und kosten wertvollen Wohnraum», sagt Prof. Jörg Worlitschek, Experte für Energiespeicherung an der Hochschule Luzern – Technik und Architektur (HSLU).

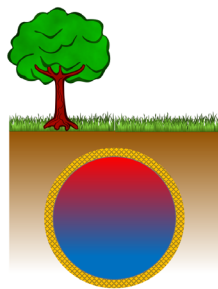
Ein Stahltank voll Wasser und PCM-Kapseln

Vor diesem Hintergrund arbeiten HSLU-Forscherinnen und -Forscher um Jörg Worlitschek an einem neuen Speicherkonzept: Dabei produziert eine mit PV-Strom betriebene Wärmepumpe Warmwasser, das dann in einem Wärmespeicher gepuffert wird. Damit der Speicher bei möglichst kleinem Volumen eine möglichst grosse Kapazität hat, enthält er nicht nur Wasser, sondern zusätzlich Kapseln mit Phasenwechselmaterialien (engl. phase changing materials/PCM). PCM sind in der Lage, grosse Wärmemengen aufzunehmen und später wieder abzugeben.

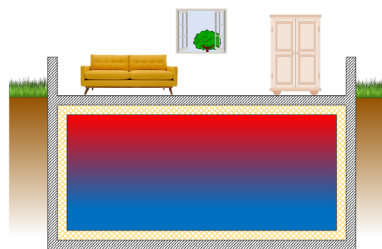
Zylindrischer Speicher Vakuumisolation



Kugelförmiger Speicher Plastikwand glasfaser-verstärkt und schaumisoliert



Ungenutzter Kellerraum Innenwand wärmeisolierend beschichtet



Diese drei Speicher-geometrien wurden im Projekt untersucht. Illustrationen: Schlussbericht HyTES

Ein PCM-Speicher ist in der praktischen Umsetzung ein mehrere Kubikmeter grosser, unterirdischer Stahltank, gefüllt mit Wasser und PCM-Kapseln. Dank Einsatz von PCM-Kapseln nutzt der Speicher nicht nur sensible, sondern auch latente Wärme (Textbox S. 4). Deshalb ist er in der Lage, innerhalb eines definierten Temperaturbereichs mehr Wärme pro Volumen zu speichern als ein klassischer Warmwasserspeicher. Die Funktionsweise des PCM-Speichers ist jenem eines herkömmlichen Warmwasserspeichers aber sehr ähnlich (vgl. Textbox unten).

Berechnungen am Modell und im Labor

«Wir haben untersucht, wie ein solcher Speicher sinnvoll betrieben werden kann und was er kostet», sagt William Delgado-Diaz, der das von BFE unterstützte Forschungsprojekt geleitet hat. Er und seine Forscherkollegen erstellten zu diesem Zweck das Modell eines Heizsystems mit PV-Anlage, Wärmepumpe und PCM-Speicher. Ausgangspunkt für das Modell war ein Mehrfamilienhaus mit acht Wohnungen und 20 Bewohnern (800 m² Energiebezugsfläche, 264 m² verfügbare Dachfläche). Wird dieses Haus mit einer PV-Anlage mit ca. 36 kWp Leistung und einer Wärmepumpe mit 16 kW Leistung ausgestattet, lässt sich über das Jahr gesehen (Jahresbilanzierung) der gesamte Wärmebedarf des Gebäudes



Prototyp im Labor der Hochschule Luzern, mit dem die Berechnungen zu PCM-Speichern validiert wurden. Der Tank (links im Bild) enthält den PCM-Speicher mit einem Volumen von 300 l und einer Speicherkapazität von 13.1 kWh, der rechts schematisch aufgezeichnet ist (inkl. Höhenangaben für die vier Temperaturfühler). Zur Testeinrichtung gehören die Wärmepumpe (rechts auf dem Foto) und die Mischbatterie für die Bodenheizung (ganz links auf dem Foto). Das in diesem Speicher eingesetzte Phasenwechselmaterial des HSLU-Spin-offs Cowa hat eine Schmelztemperatur von 48 °C. Illustration: Schlussbericht HyTES

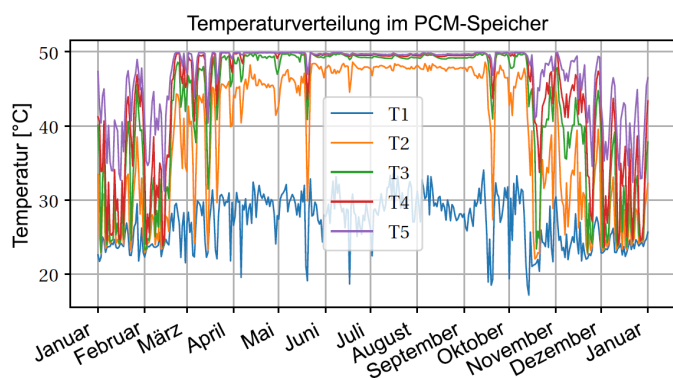
decken, wie die Forscherinnen und Forscher berechneten. Auf dieser Grundlage untersuchten sie mit Simulationsrechnungen die optimale Auslegung und die Kosten des neuartigen Speicherkonzepts.

SO FUNKTIONIERT DER PCM-SPEICHER

Um die Funktionsweise eines PCM-Speichers zu verstehen, kann man beispielhaft ein saniertes Mehrfamilienhaus betrachten, dessen Heizung eine Vorlauftemperatur von 35 °C hat. An sonnigen Tagen wird PV-Strom vom eigenen Dach genutzt, um mit der Wärmepumpe ca. 50-gradiges Wasser zu erzeugen, das in den PCM-Speicher geleitet wird. An kalten Tagen kann man das für die Heizung benötigte Warmwasser direkt aus dem Speicher beziehen. Durch Zumischung aus dem Rücklauf im Heizkreis erhält man die gewünschte Vorlauftemperatur von 35 °C.

Durch Wärmeentzug kühlt der Speicher ab, und dabei zeigt sich nun der grosse Nutzen der PCM-Kapseln: Sind 40 Grad erreicht, «gefriert» das eingekapselte Phasenwechselmaterial unter Abgabe von latenter Wärme. Im Phasenübergang von flüssig zu fest stecken grosse Wärmemengen, die zu Heizzwecken genutzt werden können. Sind alle PCM-Kapseln «gefroren», kann dem Speicher weiter sensible Wärme entzogen werden, bis 35 °C Wassertemperatur erreicht sind. Scheint später die Sonne, wird der nun anfallende PV-Strom über die Wärmepumpe zur Wärmeerzeugung genutzt. Damit kann der PCM-Speicher neu mit Wärme beladen werden. In der praktischen Anwendung wird der PCM-Speicher mal etwas geladen und dann wieder etwas entladen, abhängig von Wärmebedarf und Sonnenschein.

Das Phasenwechselmaterial wird so gewählt, dass seine Schmelztemperatur etwas oberhalb der Vorlauftemperatur der Heizung liegt. Bei einem z.B. 20-jährigen Bestandsbau mit Fussbodenheizung liegt der Schmelzpunkt des eingesetzten PCM somit typischerweise im Bereich 40 bis 42 °C, bei einem Neubau mit Bodenheizung bei 30 bis 35 °C. Da das Warmwasser für Bad und Küche höhere Temperaturen benötigt, wird es in der Regel nicht aus dem PCM-Speicher bezogen, sondern durch die Wärmepumpe extra bereitgestellt und in einem klassischen Warmwasserboiler gepuffert.



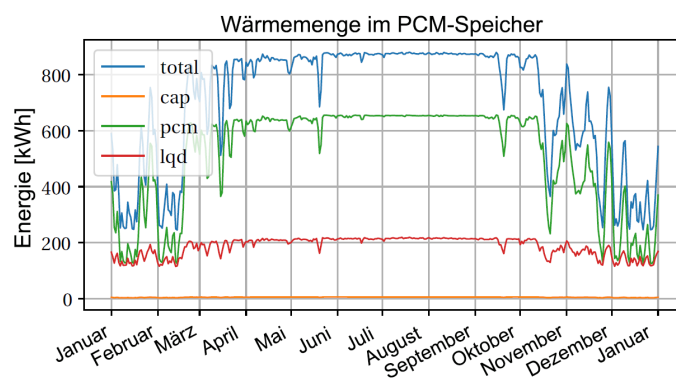
Temperaturverteilung im PCM-Speicher (Kellerraum mit wärmeisolierter Innenwand) über ein Jahr (berechnet in Zehn-Minuten-Auflösung und gemittelt auf Tagesdurchschnitte). T1 steht für die Temperatur ganz unten im Speicher, T 5 für die die Temperatur ganz oben: In den Sommermonaten herrschen oben im Speicher praktisch durchgehend 50 °C, und selbst am Boden werden Temperaturen bis zu 40 °C erreicht (in der Grafik sind die Temperaturspitzen wegen der Mittelung auf Tagesdurchschnittswerte in der blauen Kurve nicht sichtbar). Im Winter hingegen, wenn dem Speicher viel Wärme entzogen wird, herrschen tiefere Temperaturen. Die Temperatur oben im Speicher sinkt dann auf 35 °C und weniger ab. Grafik: Schlussbericht HyTES

Ausserdem bauten die Wissenschaftinnen und Wissenschaftler im Labor den Prototyp eines PCM-Speichers. Damit wurde seine Funktionsfähigkeit überprüft und sein Speicherpotenzial in Verbindung mit einer Wärmepumpe unter verschiedenen Bedingungen getestet. Das Phasenwechselmaterial für den Prototyp bezogen die Forscherinnen und Forscher von der Firma Cowa Thermal Solutions AG (Root), einem 2019 gegründeten Spin-Off der Hochschule Luzern, das 2023 ein erstes PCM-Produkt auf den Markt gebracht hat.

Optimum bei 85 % Eigenversorgung

Ideal wäre ein Wärmespeicher, der den Wärmebedarf des Gebäudes vollständig mit eigenem PV-Strom deckt, und dies auch noch möglichst günstig. Ein Speicher, der den Eigenverbrauch zu 100 % deckt, müsste allerdings sehr gross ausgelegt werden und wäre nicht wirtschaftlich. Die HSLU-Forscherinnen und -Forscher haben für das betrachtete Mehrfamilienhaus (acht Wohnungen) nach dem PCM-Speicher mit optimalem Kosten-Nutzen-Verhältnis gesucht. Demnach würde mit einem PCM-Speicher von acht Kubikmetern Volumen ein Eigenversorgungsgrad von 85 % erreicht. Die Wärmekosten liegen mit rund 35 Rp./kWh zwar deutlich über jenen einer Gasheizung (bei heutigen Gaspreisen), bewegen sich aber noch in einem «vernünftigen» Rahmen, wie die Autoren im Projektschlussbericht schreiben.

Die Forscherinnen und Forscher konnten auch zeigen, dass



Die Grafik zeigt für einen PCM-Speicher (Kellerraum mit wärmeisolierter Innenwand), wie viel Wärmeenergie der PCM-Speicher speichert (blau), berechnet in Zehn-Minuten-Auflösung und gemittelt auf Tagesdurchschnitte. Diese Energie setzt sich jeweils zusammen aus der sensiblen Wärme des Wassers (rot) und der latenten Wärme des Phasenwechselmaterials (grün). Man erkennt, dass das Phasenwechselmaterial deutlich mehr Energie speichert als das Wasser. Der PCM-Speicher speichert 1.7-mal mehr Energie als ein gleich grosser Wasserspeicher, der kein Phasenwechselmaterial enthält. Die orange Linie steht für die Plastikkapsel, die das PCM-Material enthält. Illustration: Schlussbericht HyTES

ein Heizsystem mit PV-Anlage, Wärmepumpe und PCM-Speicher erwartungsgemäss sehr viel klimafreundlicher ist als eine Ölheizung. Bei einem Ölkessel betragen die Treibhausgasemissionen gemäss Literaturangaben 319 gCO_{2eq}/kWh, der grösste Teil verursacht durch Emissionen aus der Verbrennung des fossilen Energieträgers Öl. Bei dem Heizsystem mit

SENSIBLE UND LATENTE WÄRME

Die Wärme, die dem Wasser beim Abkühlen z.B. von 10 auf 0 °C entzogen werden kann, wird als «sensible» (oder «fühlbare») Wärme bezeichnet. Wird dem Wasser weiter Wärme entzogen, gefriert das Wasser. Beim Phasenübergang von 0-gradigem Wasser zu 0-gradigem Eis wird «latente» Wärme frei. Wird das 0-gradige Eis weiter abgekühlt, z.B. auf – 10 °C, entsteht abermals sensible Wärme. Auf der latenten Wärme, die beim Phasenübergang von Wasser zu Eis frei wird, beruhen die sogenannten Eisspeicher.

Wasser vollzieht den Übergang vom flüssigen in den festen Zustand bei 0° C. Andere Stoffe haben andere Schmelzpunkte. Für den PCM-Speicher sind Phasenwechselmaterialien interessant, die ihren Schmelzpunkt im Bereich von 30 bis gut 40 °C haben. Das macht es möglich, grosse Mengen an latenter Wärme in einem Temperaturbereich zu puffern, der für Heizzwecke genutzt wird.



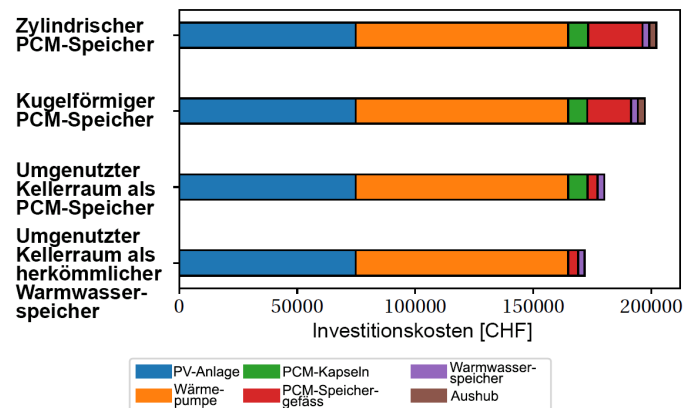
Die Firma Cowa Thermal Solutions hat 2023 einen ersten Warmwasserspeicher auf der Basis von Phasenwechselmaterial mit einem Schmelzpunkt von 48 °C auf den Markt gebracht (im Bild: drei Speicher in Kaskade geschaltet). Das Phasenwechselmaterial basiert auf Natriumacetat Trihydrat, einem schwach nach Essig riechenden Salz. Bei dem PCM-Speicher, der an der HSLU untersucht wurde, wird das Phasenwechselmaterial in einen umgebauten Kellerraum oder in einen unterirdischen Wassertank eingebracht. Foto: Cowa

PCM-Speicher hingegen liegen sie – wird das System auf einen Selbstversorgungsgrad von 85 % ausgelegt – bei 11 bis 83 gCO_{2eq}/kWh. Hier haben die grauen Treibhausgasemissionen, die im Strom zum Antrieb der Wärmepumpe «stecken», einen grossen Anteil.

Begrenzte Speicherkosten

Die Investitionskosten für den PCM-Speicher des betrachteten Mehrfamilienhauses beziffern die HSLU-Forscherinnen und -Forscher inkl. Aushub mit 8'000 bis 31'000 Fr. (bei sinnvoll gewählter Speichergrösse, abhängig vom Speichertyp). Die Gesamtkosten des ganzen Energiesystems belaufen sich auf 179'000 bis 207'000 Fr. Der PCM-Speicher hat an den Gesamtkosten also einen relativ kleinen Anteil. «Die wichtigsten Kostentreiber sind die PV-Anlage und die Wärmepumpe», sagt Delgado-Diaz. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass sich geeignete Phasenwechselmaterialien noch in Entwicklung befinden und die definitiven Kosten des Speichersystems nur grob geschätzt werden können.

Aktuell lohnt es sich also nicht, ein Mehrfamilienhaus mit PV-Anlage und Wärmepumpe zusätzlich mit einem PCM-Speicher auszustatten. Das könnte sich in Zukunft allerdings ändern, wie Jörg Worlitschek von der Hochschule Luzern ausführt: «In der heutigen Energieversorgung mag sich die Investition in den PCM-Speicher nicht lohnen. In einem künftigen Energiesystem mit dynamischen Strompreisen



Bei den Investitionskosten eines Energiesystems mit PV-Anlage, Wärmepumpe und PCM-Speicher fällt letzterer finanziell am wenigsten stark ins Gewicht. Die Kosten des PCM-Speichers bestehen aus den Kosten des unterirdischen Speichergefässes (rot), den Kosten der PCM-Kapseln (grün) und den Kosten für den Aushub (braun). Dazu kommen noch die Kosten des Warmwasser-Boilers (violett). Grafik: Schlussbericht HyTES

profitieren Systeme, die den eigenen Solarstrom in hohem Masse nutzen können, finanziell sehr viel mehr als heute. Dann wird die Flexibilität, die man mit dem PCM-Speicher erzielt, mehr wert sein als heute. Je weniger Netzstrom man braucht, desto weniger ist man den Preisschwankungen des Netzstroms ausgeliefert. Auf lange Sicht werden sich solche Wärmespeicher daher auch finanziell auszahlen.»

➤ Der **Schlussbericht** zum Projekt «HyTES – Optimization of hybrid seasonal heat storage systems using phase change materials» (dt: «Optimierung hybrider saisonaler Wärmespeichersysteme mithilfe von Phasenwechselmaterialien») ist in englischer Sprache abrufbar unter: <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=48006>

➤ **Auskünfte** zum Projekt erteilt Stephan A. Mathez (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.