Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 107 (2016)
Heft: 6

Artikel: Aus warm mach kalt
Autor: Ruch, Patrick / Ammann, Jens / Meijer, Ingmar
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-857149

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Aus warm mach kalt

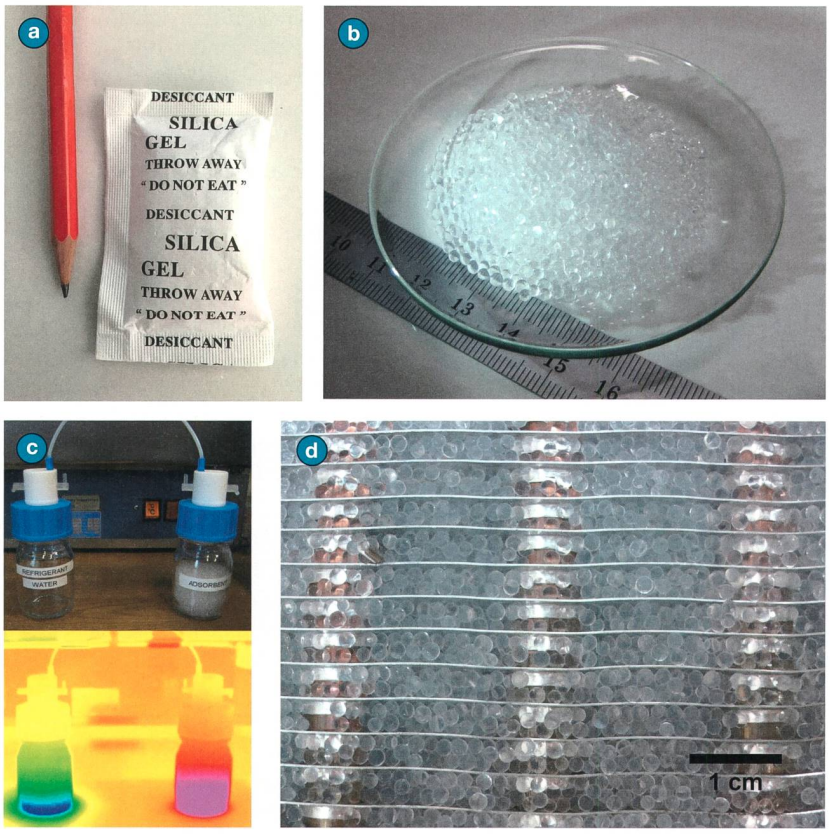
Effizienzsteigerung in Rechenzentren mit thermisch getriebenen Wärmepumpen

Thermisch getriebene Wärmepumpen nutzen ein Prinzip, das älter ist als die mechanische Verdichtung der heute verbreiteten Kompressionswärmepumpen. Mittels Wärme als Antriebsenergie kann Kälte erzeugt oder Umweltwärme zur Raumheizung eingesetzt werden – mit minimalem Stromverbrauch. Die Möglichkeiten zur Nutzung von Abwärme und erneuerbarer Energie sind vielfältig, was die Erschliessung neuer Anwendungen u.a. in Rechenzentren anspornt und interdisziplinäre Forschungsprojekte zur Verbesserung der Leistungsdichte von Adsorptionswärmepumpen ins Leben ruft.

Patrick Ruch, Jens Ammann, Ingmar Meijer, Bruno Michel

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik besagt, dass Wärme nicht von selbst von einem Körper niedriger Temperatur auf einen Körper höherer Temperatur übergehen kann. Um dies zu tun, beispielsweise um einen Raum zu beheizen oder das Innere eines Kühlschranks abzukühlen, muss Arbeit verrichtet werden. Während die thermodynamischen Grundlagen für die sogenannte Wärmepumpe im 19. Jahrhundert durch Carnot, Clausius, Kelvin und von Linde formuliert wurden, hat die Schweiz im 20. Jahrhundert wesentlich zur Entwicklung der Technologie der Wärmepumpenheizung beigetragen.[1] Aufgrund des Ersten Weltkriegs litt die Schweiz an einer grossen Knappheit an Brennstoffen wie Kohle. Zugleich war Strom aus Wasserkraft in grossem Masse verfügbar, was die Entwicklung von industriellen Wärmepumpen mit Elektromotoren als Kompressorantrieb um 1940 massgeblich begünstigt hat. Mittlerweile kommen in 80 % von Neubauten anstelle von öl- oder gasbefeuerten Heizkesseln elektrisch angetriebene Kompressionswärmepumpen zum Einsatz. Bei Kälteanwendungen decken Kompressionswärmepumpen nahezu 100 % des Kältebedarfs ab.

Der Einsatz einer Wärmepumpe zum Heizen ist energetisch sinnvoll, da der Grossteil der Nutzwärme durch Umweltwärme gestellt wird **(Kasten Funktionsprinzip)**. Die Leistungszahl (englisch: coefficient of performance, COP) beschreibt das Verhältnis von Nutzenergie zu aufgenommener elektrischer Energie, und betrug in der Schweiz für Sole/Wasser-Wärmepumpen 2015 im Mittel 4,5 für Wärmepumpenheizungen und 3,4 für Brauchwarmwasserwärmepumpen. Also beträgt die Energieeinsparung gegenüber einem Heizkessel durchschnittlich zwischen 70 und 80 %. Die elektrische Energie wird für den Kompressor benötigt, um ein Kältemittel zu verdichten und somit den Temperaturhub zu realisieren. Die Energieeinsparung gegenüber einem Heizkessel und die Möglichkeit, erneuerbare Energien für die Bereitstellung der Elektrizität einzusetzen, stellen die Hauptvorteile der Wärmepumpe dar. Als Nachteil ist der Gebrauch von Kältemitteln zu erwähnen, der in der Schweiz der Chemikalien-Risikoreduktionsverordnung unterliegt. Längerfristig ist auch der Stromverbrauch von Kompressionswärmepumpen in der Schweiz in Anbetracht



IBM Research Zurich

Bild 1 a) Herkömmlicher Trockenbeutel mit Silikagel, b) Schüttung von Silikagel-Kugeln, c) Verbindung zweier Gefässe mit Wasser und Silikagel (oben) führt zur Abkühlung des Gefässes mit Wasser und zur Erwärmung des Gefässes mit Silikagel, was in der Infrarotaufnahme (unten) ersichtlich ist, d) Silikagel-Kugeln innerhalb eines Lamellenwärmetauschers.

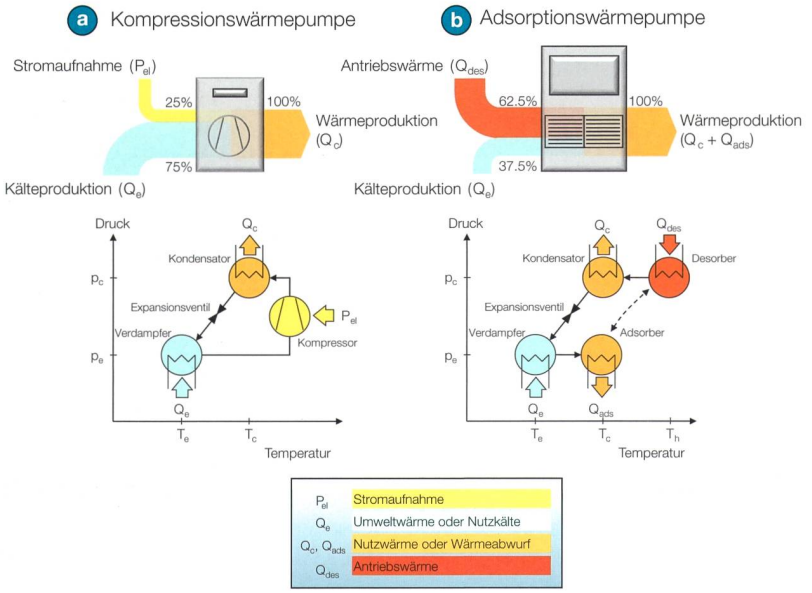
Funktionsprinzip

Vergleich zwischen Kompressions- und Adsorptionswärmepumpe

Bei der Kompressionswärmepumpe (a) wird ein Kältemittel mit einem mechanischen Kompressor verdichtet. Beim niedrigeren Druckniveau p_e wird das Kältemittel im Verdampfer unter Zufuhr der Wärmemenge Q_e bei der Temperatur T_e verdampft, während beim höheren Druckniveau p_c das Kältemittel im Kondensator kondensiert und dabei die Wärmemenge Q_c abgibt. Das flüssige Kondensat wird über ein Expansionsventil wieder zurück in den Verdampfer überführt. Die abgegebene Wärme Q_c kann als Nutzwärme eingesetzt werden. Bei der Wärmepumpenheizung wird das Verhältnis von Nutzwärme zur aufgenommenen elektrischen Energie P_{el} des Kompressors als COP (coefficient of performance) bezeichnet und beträgt in diesem Beispiel 100 % / 25 % = 4.

Bei der Adsorptionswärmepumpe (b) ist das Funktionsprinzip des Kältemittelkreislaufs grundsätzlich identisch, jedoch findet statt der mechanischen Verdichtung eine thermische Verdichtung statt. Der Verdampfer wird mit einem Adsorptionswärmetauscher verbunden, der das Kältemittel über einen Adsorptionsprozess an sich bindet und dadurch verdichtet. Es wird dabei die Adsorptionswärme Q_{ads} freigesetzt. Im nächsten Schritt wird der Adsorptionswärmetauscher mit dem Kondensator verbunden und durch die Antriebswärme Q_{des} auf das Temperaturniveau T_h aufgeheizt. Durch den Temperaturanstieg wird das Kältemittel aus dem Adsorptionswärmetauscher ausgetrieben (desorbiert) und danach im Kondensator kondensiert.

Durch den Betrieb zweier Adsorptionswärmetauscher, die versetzt arbeiten und zwischen Adsorption und Desorption wechseln gemäss der gestrichelten Linie in (b), wird eine quasikontinuierliche Heiz- oder Kühlleistung erbracht. Im Gegensatz zur Kompressionswärmepumpe benötigt die thermische Verdichtung keine elektrische Energie. Es wird ein thermischer COP definiert, der das Verhältnis von Nutzenergie zu thermischer Antriebsenergie definiert. Für die Bereitstellung von Nutzwärme beträgt in diesem Beispiel der thermische COP für das Heizen 100 % / 62,5 % = 1,6. Der thermische COP für Kühlung beträgt hingegen 37,5 % / 62,5 % = 0,6.



IBM Research Zurich

des geplanten Ausstiegs aus der Kernenergie kritisch zu bewerten. Immerhin entfallen knapp 40 % des Stromverbrauchs in der Schweiz auf die Bereitstellung von Wärme und Kälte. Da der Energiebedarf für Raumklimatisierung starken saisonalen und täglichen Schwankungen unterliegt, würde ein grossflächiger Einsatz von Kompressionswärmepumpen in Kombination mit einem höheren Anteil von erneuerbaren Quellen in der Stromproduktion das Schweizer Stromnetz vor besondere Herausforderungen stellen.

Absorption statt Kompression

Die Verdichtung eines Kältemittels muss jedoch nicht zwingend über eine mechanische Kompression erfolgen. In den 1960er-Jahren beruhten in Europa rund die Hälfte der Haushaltkühlschränke auf dem Absorptionsprozess. Hierbei wird ein Kältemittel wie Ammoniak (NH_3) in einem Lösungsmittel wie Wasser (H_2O) gelöst. Durch Erhitzen der flüssigen Mischung entweicht ein Teil des Ammoniaks und es entsteht ein hoher Druck – ein sogenanntes thermisches Verdichtungsprinzip. Die Antriebswärme wird durch Verbrennung von Gas oder Petroleum bereitgestellt. Diese Art von Kühlschrank ist heute weiterhin in Wohnwagen beliebt, denn sie ist unabhängig von elektrischer Versorgung.

Die Sonne kann ebenfalls als Wärmequelle dienen, was erstmals von Mouchot an der Weltausstellung 1878 in Paris anhand einer NH_3–H_2O Absorptionskältemaschine demonstriert wurde, welche das einfallende Sonnenlicht mit einem Parabolkonzentrator konzentrierte und aus flüssigem Wasser Eis produzierte. Allerdings wurden Kompressionswärmepumpen durch verbesserte Kompressoren und synthetische Kältemittel in den 1970ern und 1980ern günstiger, effizienter und sicherer und verdrängten somit die Absorptionswärmepumpen für stationäre Anwendungen weitgehend vom Markt.

Nutzung tieferer Temperaturen

Heute ist das Interesse an thermisch angetriebenen Wärmepumpen erneut gestiegen, weil mit ihnen erneuerbare Wärmequellen wie Solarthermie oder industrielle Abwärme genutzt werden können. Auf dem Markt sind Produkte von diversen Anbietern in unterschiedlichen Leistungssegmenten erhältlich. Neben der zuvor beschriebenen Absorptionstechnologie werden auch Geräte angeboten, welche auf dem Prinzip der Adsorption basieren. Im Gegensatz zur Absorption, bei der die Stoffe in das Innere eines Festkörpers oder einer Flüssigkeit eindringen, werden bei der Adsorption Stoffe aus Gasen oder Flüssigkeiten an der Oberfläche eines Festkörpers bzw. an der Grenzfläche zwischen zwei Phasen angereichert.

Adsorptionswärmepumpen nutzen Adsorption von Kältemitteldampf in einem porösen Feststoff, weitgehend bekannt durch die Aufnahme von Feuchtigkeit durch Trockenmittelbeutel mit Silikagel **(Bild 1a, b)**.

In einem geschlossenen System wird flüssiges Wasser verdampft und abgekühlt **(Bild 1c)**, im Extremfall bis hin zur Eisbildung. Das thermische Verdichtungsprinzip ähnelt demjenigen der Ab-

Anwendung

Adsorptionskühlung in Rechenzentren

Die Entwicklung der Warmwasserkühlung bei IBM Research hat es ermöglicht, die Abwärme von Computerservern bei kommerziellen Systemen bis zu 55 °C und bei Prototypen bis zu 70 °C zurückzugewinnen und damit Adsorptionskältemaschinen anzutreiben. Mit dem generierten Kaltwasser kann die Luft in einem Rechenzentrum klimatisiert werden. Somit kann die Wärme aus Servern genutzt werden, um andere IT-Komponenten, wie zum Beispiel Speichersysteme, zu kühlen.

Ein Beispiel für eine solche Konfiguration ist Coolmuc-2, ein Rechencluster am Leibniz-Rechenzentrum (LRZ) in Garching, Deutschland, dessen Abwärme genutzt wird, um sechs Adsorptionskältemaschinen anzutreiben. Die produzierte Kälte kühlt zurzeit einen Teil der Plattenspeichersysteme des LRZ. Der Stromverbrauch der eingesetzten Adsorptionskältemaschinen ist im Vergleich mit üblichen Kompressionskältemaschinen nur noch halb so hoch.

Leibniz-Rechenzentrum

Der Coolmuc-2-Rechencluster (links) liefert die Antriebswärme für sechs Adsorptionskältemaschinen im Leibniz-Rechenzentrum.

Résumé

Quand la chaleur permet de produire du froid

Amélioration de l'efficacité énergétique dans les centres de calcul par le biais de pompes à chaleur thermiques

Les pompes à chaleur thermiques fonctionnent selon un principe plus ancien que la compression mécanique utilisée par les pompes à chaleur à compression répandues à l'heure actuelle. La chaleur tient lieu ici d'énergie pour générer du froid ou pour employer la chaleur environnante pour le chauffage de locaux, et ce, avec une consommation d'électricité minimale. Les possibilités d'utilisation des rejets de chaleur industrielle et des énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire thermique, sont multiples. Cette flexibilité d'utilisation permet par exemple de considérer de nouvelles applications, notamment dans les centres de calcul, et donne également naissance à des projets de recherche interdisciplinaires dont l'objectif consiste à améliorer la densité de puissance des pompes à chaleur thermiques à adsorption. Plusieurs produits offerts par divers fournisseurs sont disponibles dans différents segments de puissance sur le marché. Outre la technologie d'absorption, ce dernier propose également des appareils qui reposent sur le principe de l'adsorption. Ces pompes à chaleur utilisent l'adsorption de la vapeur d'agents frigorigènes dans un matériau poreux, tel que le gel de silice. Le principe de compression thermique s'apparente à celui de la pompe à chaleur à absorption, bien qu'il soit en principe possible d'utiliser des températures de fonctionnement plus basses pour les systèmes à adsorption au vu de l'interaction plus faible entre l'agent frigorigène et le matériau poreux qu'au sein du mélange agent frigorigène/solvant. De plus, la consommation d'électricité diminue car il ne faut pas faire circuler de solvant à l'intérieur de l'appareil. Par conséquent, il est possible d'obtenir des coefficients de performance (COP) électriques nettement supérieurs à ceux des machines réfrigérantes à compression. No

sorptionswärmepumpe. Allerdings sind in Adsorptionsanlagen aufgrund der schwächeren Wechselwirkung zwischen Kältemittel und Feststoff im Vergleich zum Kältemittel-Lösungsmittel-Gemisch tendenziell tiefere Antriebstemperaturen möglich. Ausserdem ist der Stromverbrauch niedriger, da im Gerät kein Lösungsmittel umgewälzt werden muss. Gegenüber Kompressionskältemaschinen können deshalb deutlich höhere elektrische COPs erreicht werden. Vergleicht man den Stromverbrauch der thermisch getriebenen Wärmepumpen mit denjenigen der Kompressionkältemaschinen, erhält man elektrische COPs von bis zu 1000. Diese Zahl ist jedoch nicht sehr aussagekräftig. Berücksichtigt man zusätzlich korrekterweise den Stromverbrauch der Umwälzpumpen für die externen Flüssigkeitskreisläufe und den Stromverbrauch des Rückkühlwerks, erhält man in Feldmessungen je nach Systemauslegung immerhin noch elektrische COPs von 10 oder mehr.

Durch das thermische Verdichtungsprinzip und die tiefe Antriebstemperatur von weniger als 80 °C eignen sich Adsorptionswärmepumpen hervorragend für die Nutzung von Antriebswärme, um Kälte unterhalb von 18 °C zu generieren oder Wärme auf einem mittleren Temperaturniveau von 30–35 °C bereitzustellen.

Anwendungsgebiete

Als Anwendungsbeispiele für den Heimgebrauch sind gasbefeuerte Adsorptionswärmepumpen von Viessmann und Vaillant zu nennen, mit denen im Vergleich zu herkömmlicher Gas-Brennwerttechnik durch die Nutzung von Umweltwärme 25–33 % Primärenergie und die damit verbundenen Kosten eingespart werden können. Im industriellen Umfeld werden Adsorptionskältemaschinen eingesetzt, um mit Abwärme aus thermischen Prozessen, Blockheizkraftwerken (BHKWs) oder Rechenzentren (Kasten Anwendung) Raum- oder Prozesskälte zu generieren, wodurch der Stromverbrauch im Vergleich zu herkömmlichen Kompressionskältemaschinen um einen Faktor 2 oder mehr reduziert werden kann.

Wegen der geringen Stromaufnahme und der Verwendung von Wasser als Kältemittel können Adsorptionswärmepumpen einen wichtigen und umweltfreundlichen Beitrag zur Entlastung des Stromnetzes beitragen. Bei Heizanwendungen wird durch die Nutzung von Umweltwärme zusätzlich zur Primärenergie der Brennstoffaufwand deutlich gesenkt.

Potenzial der Wärmepumpentechnologie

Das Nationale Forschungsprogramm «Energiewende» (NFP 70) des Schweizerischen Nationalfonds (SNF) unterstützt das Projekt «Thrive»[1], das vom IBM-Forschungszentrum in Rüschlikon gemeinsam mit der Hochschule für Technik Rapperswil geleitet wird. Zusammen mit der Empa, der ETH Zürich, der HEIG-VD und dem PSI sowie mit Industriepartnern wollen die Forscher das Potenzial der Wärmepumpentechnologie in der Schweiz ausarbeiten und bis 2017 einen Adsorptionswärmepumpen-Demonstrator für die Abwärmenutzung in der Schweiz entwickeln und testen. Dies stellt einen wichtigen Schritt dar in Richtung Heizen und Kühlen durch Abwärme und mit minimalem Stromverbrauch.

Literatur

- Patrick Ruch et al., «Heat-Driven Adsorption Chiller Systems for Sustainable Cooling Applications», Proceedings of the 11th International Energy Agency Heat Pump Conference, Montreal, Kanada (2014).

Links

- www.nfp70.ch
- ibm.biz/sorptionheatpump
- youtu.be/6kuFYcbnTeg

Referenzen

[1] Martin Zogg, Geschichte der Wärmepumpe – Schweizer Beiträge und internationale Meilensteine, BFE, Bern, 2008, Download unter www.zogg-engineering.ch/publi/GeschichteWP.pdf

[2] Michael Eschmann, Qualitätsüberwachung von Kleinwärmepumpen und statistische Auswertung 2015, BFE, Bern, 2015, Download unter www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de_910392047.pdf

[3] Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000–2014 nach Verwendungszwecken, 2015, BFE, Bern, Download unter www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de_993701044.pdf

[4] Thermally driven heat pumps for heating and cooling, 2013, Ed. A. Kühn, Universitätsverlag der TU Berlin, Download unter www.nachhaltigwirtschaften.at/iea_pdf/iea_hpp_annex34_handbuch_thermally_driven_heatpumps.pdf

Electrosuisse / ITG-Kommentar

Energieeffiziente Rechenzentren helfen Kosten sparen

Rechenzentren sind ausgesprochen stromhungrig: Rund 3 % des gesamtschweizerischen Stromverbrauchs entfällt auf sie. Und die Tendenz ist – im Zuge der Digitalisierung und des Ausbaus von Cloud-Angeboten – weiter steigend.

Dabei wird nur rund die Hälfte des von einem Rechenzentrum verbrauchten Stroms für den Betrieb der IT-Komponenten genutzt; der Rest grösstenteils für Kühlung und Klima. Es ist dieses Verhältnis von Gesamtenergieverbrauch eines RZ zum Energieverbrauch der IT, das als «Energieeffizienz» bezeichnet wird.

Energieeffizienz – und somit auch «Green IT» – sind keine leeren Marketingbegriffe, sondern drängende Themen für RZ-Betreiber unter steigendem Kostendruck. Die Betreiber versuchen daher, durch optimale Auslastung der IT-Komponenten (Virtualisierung) Energiekosten zu sparen und energieeffiziente Hardware zu beschaffen. Gleichzeitig gilt es aber auch, die Klimakosten zu senken und Standorte mit guter Versorgungsqualität zu wählen. Deshalb betreiben IT-Grössen wie Google Rechenzentren im hohen Norden.

Für kleinere und mittelständische RZ-Betreiber ist dies aber keine Option. So helfen gerade aus ihrer Sicht Forschungsarbeiten wie die von IBM, Betriebskosten zu senken und die IT grüner und CO_2-effizienter zu machen.

Dr. **Thomas Wettstein,** ITG-Präsident und CEO der Avectris.

Autoren

Dr. **Patrick Ruch**, Forscher und Projektleiter.
IBM Research GmbH, 8803 Rüschlikon
ruc@zurich.ibm.com

Jens Ammann, Materialwissenschaftler und Doktorand.
jam@zurich.ibm.com

Dr. **Ingmar Meijer**, Senior Technical Staff Member.
inm@zurich.ibm.com

Dr. **Bruno Michel**, Gruppenleiter Advanced Micro Integration.
bmi@zurich.ibm.com

[1] «Thrive» steht für Thermally Driven Heat Pumps for Substitution of Electricity and Fossil Fuels. Link zur Projektseite des NFP 70: www.nfp70.ch/de/projekte/gebaeude-und-siedlungen/waermenutzung-durch-sorptionstechnologie

Anzeige