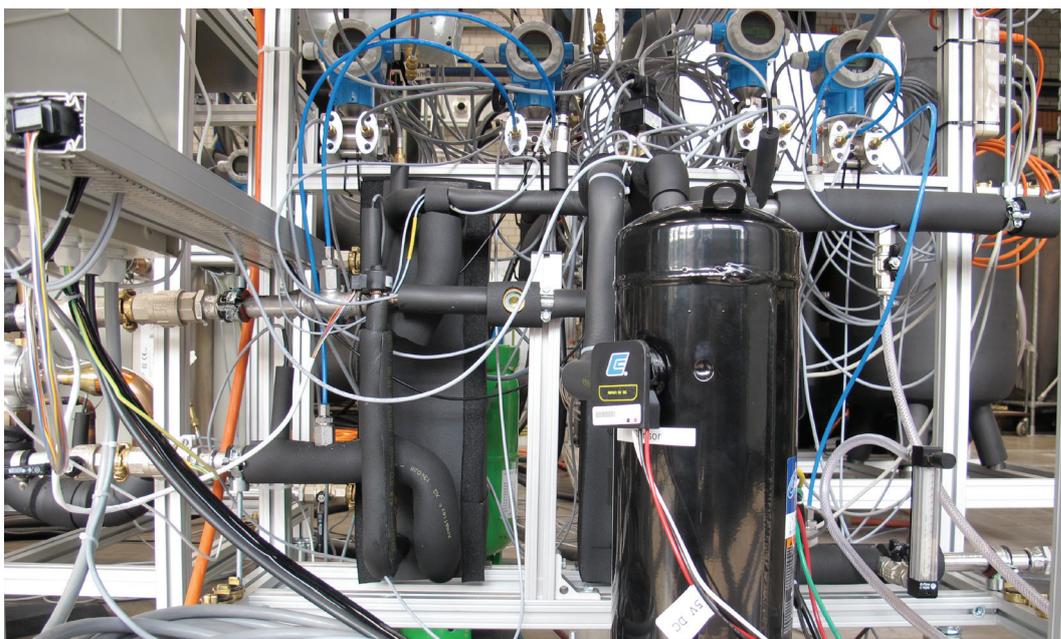


Klug konstruieren, klug kombinieren

Wärmepumpen gehören heute in Haushalt und Industrie zu den Standardlösungen. Trotz breiter Nutzung steckt in der Heizungstechnologie noch erhebliches Verbesserungspotenzial. Optimierungen sind bei der Konstruktion der Anlagen selber möglich, ebenso bei ihrer Steuerung im Verbund mit anderen Energieanlagen. Grosse Erwartungen ruhen auch auf der klugen Einbindung von Wärmepumpen ins Stromnetz. Ein Blick auf die aktuelle Schweizer Wärmepumpen-Forschung.



Im Wärmepumpen-Forschungslabor der Hochschule Luzern: Prototyp einer leistungsgeregelten Sole/Wasser-Wärmepumpe mit Inverter-Scroll-Kompressor (Emerson Copeland ZPV36).
Foto: Hochschule Luzern

Dr. Benedikt Vogel, im Auftrag des Bundesamts für Energie (BFE)

Die Bereitstellung von Heiz- und Warmwasser mittels Wärmepumpen gehört in der Schweiz heute zum Standard. Wärmepumpen nutzen die in der Umgebungsluft bzw. im Erdreich enthaltene Wärmeenergie und leisten damit einen wichtigen Beitrag zu einem effizienten Energieeinsatz. Die Zahl der jährlich verkauften Wärmepumpen hat sich in der Schweiz seit den frühen 1990er Jahren nahezu verzehnfacht auf aktuell 18 500 Stück (2014).

Knapp zwei Drittel entfallen auf Luft/Wasser-Wärmepumpen, gut ein Drittel auf Sole/Wasser-Wärmepumpen. Rund 70 bis 80 % der neu erbauten Einfamilienhäuser werden heute mit solchen Anlagen ausgestattet. „Ein Nachholbedarf besteht bei den Bestandsbauten; bei vielen von ihnen könnten Wärmepumpen aus energetischer Sicht sinnvoll eingebaut werden“, sagt Rita Kobler, Wärmepumpen-Expertin beim Bundesamt für Energie (BFE). „Ob im Einzelfall eine Wärmepumpen-Anlage sinnvoll ist, hängt massgeblich von den geforderten Vorlauftemperaturen

2 Klug konstruieren, klug kombinieren

der (Radiator-) Heizung ab“, erläutert Kobler. „Hausbesitzer, die ihre Heizung erneuern wollen, kennen die eingestellten Parameter meist nicht. Weitere Abklärungen oder eine Energieberatung helfen, jeweils die beste Lösung zu finden.“

Wirkungsgrad weiter erhöhen

So gut Wärmepumpen heute schon arbeiten, so gross ist doch auch ihr Verbesserungspotential. „Wärmepumpen erreichen heute die theoretisch möglichen Wirkungsgrade erst zu etwa 50 %“, sagt dipl. Ing. ETH Stephan Renz, Leiter des BFE-Forschungsprogramms Wärmepumpen und Kälte, „langfristig sind Gütegrade von 65 % bis zu 70 % anzustreben“. Um das brach liegende Potenzial auszuschöpfen, sind intensive Anstrengungen in Forschung und Entwicklung nötig, in der Schweiz und auf einer internationalen Ebene.

Die Europäische Union hat vor diesem Hintergrund das Forschungsprojekt 'Next Heat Pump Generation' initiiert. Die beteiligten Wissenschaftler klopfen alle Komponenten der Wärmepumpen auf Optimierungsmöglichkeiten ab. Aus der Schweiz ist die ETH Lausanne (Prof. John R. Thome) an dem EU-Vorhaben beteiligt. Im Zentrum ihrer Arbeiten steht die Verbesserung der Wärmetauscher.

Die Optimierung der Konstruktion von Wärmepumpen ist nach wie vor ein zentrales Ziel der Wärmepumpen-Forschung. Das führte auch die Wärmepumpen-Tagung vom 17. Juni 2015 in Burgdorf vor Augen. Dort präsentierte Lukas Gasser von der Hochschule Luzern seine Erkenntnisse zur Leistungsregelung von Sole/Wasser-Wärmepumpen. In Luzern arbeiten Forscher seit zehn Jahren darauf hin, die erzeugte Heizleistung von Sole/Wasser- und Luft/Wasser-Wärmepumpen auf den effektiven Bedarf des jeweiligen Gebäudes abzustimmen und damit deutliche Effizienzgewinne zu erzielen. Die dafür erforderliche Regelung der Leistung erfolgt im Wesentlichen über den Kompressor und ergänzend über die eventuell erforderlichen Zusatzaggregate, wie z.B. Ventilatoren oder Sole-Umwälzpumpen. Die Leistungen von Kompressor sowie eventueller Zusatzaggregate sind stufenlos regulierbar; sie werden so eingestellt, dass eine bedarfsgerechte Heizleistung bei maximaler Effizienz resultiert.

Effizienzgewinn auch bei Sole/Wasser-Wärmepumpen

Bei Luft/Wasser-Wärmepumpen konnten die Luzerner Forscher in den letzten Jahren dank Leistungsregelung Effizienzgewinne von 20 bis 70 % erzielen (verglichen mit Ein/Aus-

Bohrlochtemperatur / Sondentiefe	Minergie-Standard VL/RL 30/25°C bei -10°C		Sanierter Altbau VL/RL 46/38°C bei -10°C	
	Jahresarbeitszahl JAZ	Jahresarbeitszahl JAZ	Jahresarbeitszahl JAZ	Jahresarbeitszahl JAZ
	Ein/Aus-Regelung	Leistungsregelung	Ein/Aus-Regelung	Leistungsregelung
6°C / ~100 m	4.54	4.88	3.64	3.83
9.5°C / ~180 m	5.39	6.02	4.21	4.58
13°C / ~320 m	6.21	6.90	4.62	5.09

Jahresarbeitszahlen von leistungsgeregelten Sole/Wasser-Wärmepumpen liegen um 5 bis 12 % über jenen mit Ein/Aus-Regelung, zeigt das Forschungsprojekt von Lukas Gasser an der Hochschule Luzern. Untersucht wurden Anwendungen bei Minergie-Gebäuden (links), die tiefere Vor- und Rücklauftemperaturen benötigen, und bei sanierten Altbauten (rechts). Für die Berechnung der Jahresarbeitszahlen wurde eine Design-Aussentemperatur von -10 °C zugrunde gelegt. Tabelle: Gasser

geregelten Wärmepumpen im Feld). Bei den Sole/Wasser-Wärmepumpen, die Lukas Gasser nun an der Hochschule Luzern entwickelt und untersucht hat, fiel der Effizienzgewinn erwartungsgemäss geringer aus. „Die Sole/Wasser-Wärmepumpe mit Leistungsregelung erreicht gegenüber dem Ein/Aus-geregelten Prototypen abhängig von der Heizkurve und der Länge der verwendeten Erdwärmesonde um bis zu 12 % höhere Jahresarbeitszahlen“, fasst Gasser das Hauptergebnis seiner Studie zusammen (vgl. Tabelle S. 2).

Für Prof. Dr. Beat Wellig, Leiter des Kompetenzzentrums Thermische Energiesysteme & Verfahrenstechnik an der Hochschule Luzern, kommt dieses Ergebnis nicht überraschend. Bei Luft/Wasser-Wärmepumpen seien mit Leistungsregelung relativ gesehen grössere Effizienzsteigerungen möglich als bei Sole/Wasser-Wärmepumpen, da die Lufttemperatur eine grössere Bandbreite aufweist als die Bodentemperatur. „Die Ergebnisse machen deutlich, dass es für die leistungsgeregelten Sole/Wasser-Wärmepumpen schwieriger werden dürfte, sich am Markt durchzusetzen als die Luft/Wasser-Wärmepumpen“, sagt Beat Wellig. Denn je geringer der Effizienzgewinn ausfällt, desto länger dauert es, bis die Mehrkosten leistungsgeregelter Anlagen amortisiert sind.

Gesucht: die richtige Kombination

Ein optimierter Wirkungsgrad ist die Grundvoraussetzung, damit Wärmepumpen einen wesentlichen Beitrag zur Energieversorgung leisten können. Von grosser Bedeutung ist aber auch, wie gut die einzelne Wärmepumpe mit anderen Energiesystemen verknüpft ist. Denn was am Ende zählt, ist die Energiebilanz des Gesamtsystems. Hier besteht noch reichlich Spielraum für Verbesserungen, ist BFE-Forschungsprogrammleiter Stephan Renz überzeugt: „Bei der Kombination von Wärmepumpen mit additiven Energiesystemen besteht ein erheblicher Forschungsbedarf.“ Mit additiven Systemen meint Renz Solarthermie- und Photovoltaik-Anlagen, aber auch gemischte Systeme Solarthermie/

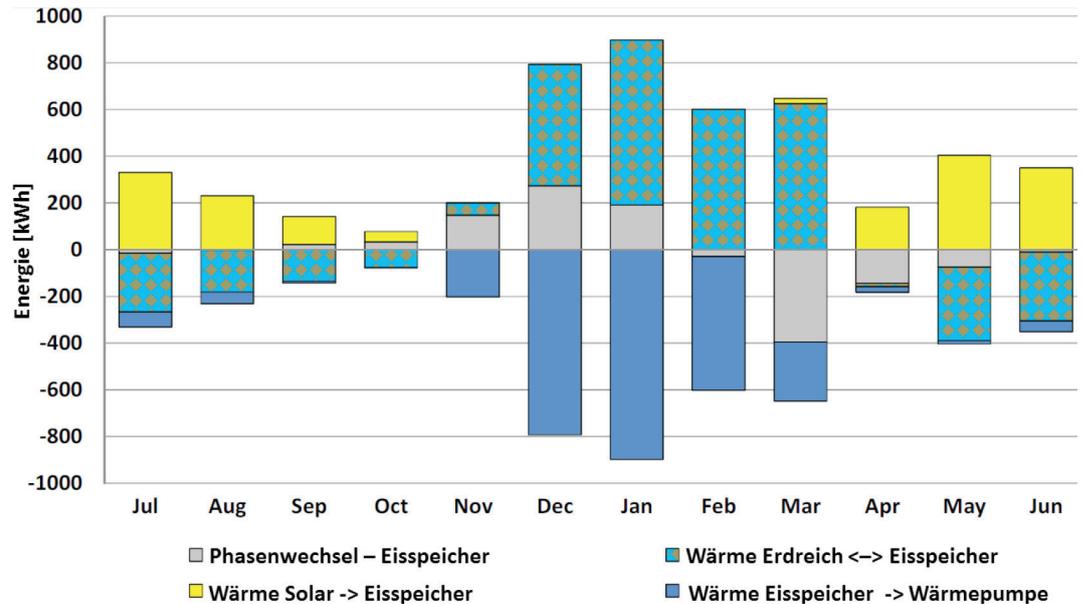
Photovoltaik einschliesslich von Hybridmodulen (PVT), die Solarenergie zugleich in Strom und Wärme verwandeln. Hinzu kommen kombinierte Systeme unter Einbezug von Eisspeichern oder Erdwärmesonden, die die in Solarthermie-Anlagen erzeugte Wärme über Stunden, Tage oder sogar Monate hinweg puffern.

An dem Punkt setzt die Forschung von Prof. Dr. Thomas Afjei an, Forscher und Dozent an der Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik in Muttenz (BL). An der Wärmepumpentagung in Burgdorf stellte Afjei die aktuellen Resultate aus einer Studie vor, in der er vier Energiesysteme für (Einfamilien-) Häuser simuliert und partiell auch in einem Parallelprojekt an einem Haus in Oberwil (BL) ausgemessen hat. Von besonderem Interesse sind dabei jene zwei der vier untersuchten Energiesysteme, die einen Eisspeicher verwenden. Als Eisspeicher dient ein Behälter, ähnlich einer Wasserzisterne, mit einem Volumen von 10 m³, der Wasser um 0 °C enthält. Wird dem Eisspeicher Wärme entzogen, vereist das Wasser – die entzogene Wärme kann später über eine Wärmepumpe für Heizzwecke und Warmwasser bereitgestellt werden. Um den Eisspeicher wieder aufzutauen, muss Wärme zugeführt werden – wozu sich insbesondere solarthermische Kollektoren eignen. Auf diesem Weg kann Wärme im Umfang von 832 kWh im Eisspeicher zwischengelagert werden. Das entspricht etwa 150 Badewannen-Füllungen mit 40grädigem Warmwasser.

Niedertemperatur-Absorber speisen Eisspeicher

Der Muttenzer Forscher und sein Team haben die Eisspeicher in zwei Systemvarianten untersucht: In der ersten Variante liefern unverglaste Solarabsorber (UC) Niedertemperaturwärme (20 - 40 °C), die zum Auftauen des Eisspeichers genutzt wird; zusätzlich liefern Photovoltaikmodule Strom zum Betrieb der Wärmepumpe. In der zweiten Variante stammen Wärme und Strom aus einem Hybridmodul (PVT). „Solareisspeicher in Kombination mit einem unverglasten Absorber sind

4 Klug konstruieren, klug kombinieren



Prof. Thomas Afjei und seine Forschungsgruppe haben für die Warmwasser-Erzeugung eines Einfamilienhauses eine Wärmepumpe mit einem Eisspeicher kombiniert und eine Simulation erstellt: Die Grafik zeigt die monatliche Wärmebilanz des Eisspeichers für ein Gebäude mit einem Heizwärmebedarf von 45 kWh/m²/a. Wärmegewinne im Eisspeicher sind auf der y-Achse positiv aufgetragen (gelb: Wärme vom Solarabsorber, grau: Latentwärme beim Einfrieren von Wasser, kariert: Erdreich-Wärmegewinne), Wärmeverluste negativ (blau: Wärmebezug der Wärmepumpe, grau: Tauen des Eises, kariert: Verluste ans Erdreich). Grafik: Dott

energetisch gesehen eine gute Lösung“, sagt Thomas Afjei, „die Wärmepumpen erreichen Jahresarbeitszahlen von bis zu 4, etwa gleich viel, wie dies bei herkömmlichen Wärmepumpenanlagen mit Erdwärmesonden der Fall ist. Dies zeigte sich auch in einer Feldmessung bei dem Haus in Oberwil (BL).“ Ob diese Aussage auch für Eisspeicher mit PVT gilt, muss Afjei zur Zeit offen lassen. Diese Systemvariante sei zwar simuliert, aber noch nicht durch Messungen im Feld überprüft worden.

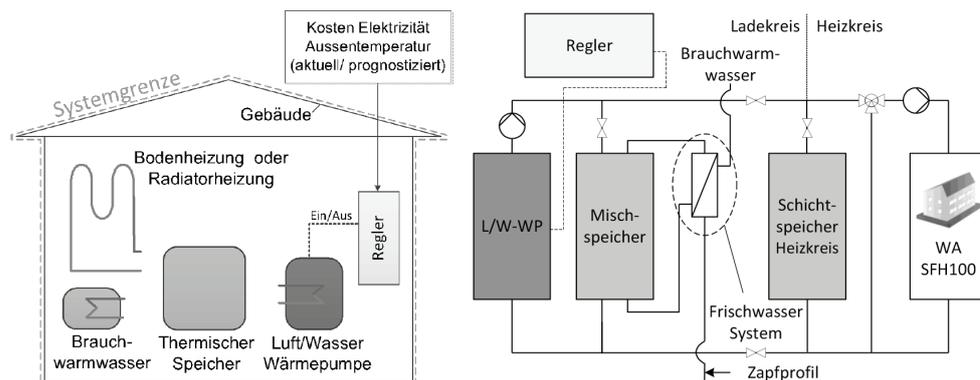
Sollen Wärmepumpen optimal in Energiesysteme integriert werden, braucht es neben den richtigen Systemkomponenten auch geeignete Regelstrategien. Diese Regelstrategien beziehen sich auch auf die Stromversorgung der Wärmepumpen aus dezentralen Produktionseinheiten (z.B. Photovoltaikanlagen) bzw. dem Stromnetz. Wärmepumpen zählen in Gebäuden zu den wichtigsten Stromverbrauchern. Regelungssysteme erlangen z.B. durch konsequenten Einbezug von Wetterdaten nicht nur eine bessere Qualität,

sondern auch grössere Komplexität. „Bei modernen Automotoren sind mehrere Zehntausend Steuerungskurven hinterlegt, die dazu dienen, den Motor in jeder Situation optimal zu betreiben“, zieht Stephan Renz einen Vergleich zur Autoindustrie, „das führt uns vor Augen, welchen Weg wir bei der Wärmepumpen-Technik gehen müssen.“

Flexibler Einsatz in Smart grids

Exemplarisch für Forschungsarbeiten in diese Richtung steht die Untersuchung, die Prof. Dr. Jörg Worlitschek zur Zeit an der Hochschule Luzern durchführt. Ziel ist die Entwicklung einer Einheit aus Wärmepumpe und zugehörigem thermischem Energiespeicher, die sich optimal in ein intelligent gesteuertes Stromnetz (Smart Grid) einbinden lässt. Als Ausgangspunkt entwickelten Worlitschek und sein Forscherteam ein neues Modell, welches das Verhalten des gesamten Systems durch die Kombination von validierten Modellen der Wärmepumpe, Speicher und Haus über lange Zeit simulieren kann. Um den Flexibi-

5 Klug konstruieren, klug kombinieren



Links: Übersicht über die betrachteten Komponenten im Gesamtmodell, das Prof. Dr. Jörg Worlitschek an der Hochschule Luzern untersucht. Dieses Modell zeichnet sich durch drei Eigenschaften aus: Der Einfluss des Gebäudes wird explizit mitmodelliert, das Modell betrachtet dynamische Elektrizitätsmarktpreise und ermöglicht damit eine vorausschauende Regelung (u.a. Model Predictive Control). Rechts: Darstellung des modellierten Systems zur Veranschaulichung der analysierbaren Systemvarianten. Illustration: Worlitschek

lange Zeit simulieren kann. Um den Flexibilitätsgewinn des Systems für den Einsatz im Zusammenspiel mit regenerativen Energiequellen zu quantifizieren, wurden die Preise an den Elektrizitätsbörsen Epexspot herangezogen.

„Wir konnten in ersten grossen Parameterstudien (mit über 800 Simulationen) zeigen, dass eine Optimierung von Regelung und Speicher beträchtlichen Flexibilitätsgewinn bei minimalen Effizienzeinbussen des Wärmepumpenbetriebes ermöglicht“, sagt Worlitschek. Ein Beispiel zeigt exemplarisch die Optimierung für einen renovierten Altbau mit Radiatorheizsystem mit einem Heizwärmebedarf von 100 kWh/m²/a: Durch den Einsatz eines 2000 l Schichtspeichers und prädiktiver Regelung können gezielte Ausschaltzeiten der Wärmepumpe von 16 Stunden pro Tag erreicht werden. Die Taktung der Wärmepumpe reduziert sich dabei um 75 %. Das Projekt von Jörg Worlitschek ist in ein internationales Forschungsvorhaben der Interna-

tionalen Energie Agentur (IEA) eingebunden, an dem neun Länder aus Asien, Europa und Nordamerika beteiligt sind.

- » Auskünfte zu der Forschung rund um Wärmepumpen erteilt Stephan Renz, Leiter des BFE-Forschungsprogramms Wärmepumpen/Kälte: [info\[at\]renzconsulting.ch](mailto:info[at]renzconsulting.ch).
- » Weitere Fachbeiträge über Forschungs-, Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte im Bereich Wärmepumpen unter: www.bfe.admin.ch/CT/WP-Kaelte.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH- 3063 Ittigen, Postadresse: CH-3003 Bern
Telefon +41 (0)58 462 56 11, Fax +41 (0)58 463 25 00
cleantech@bfe.admin.ch, www.bfe.admin.ch