



Februar 2010

---

# **Forschungsprogramm**

## **Wärmepumpen, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte**

### Synthesebericht 2009 des BFE-Programmleiters

---

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE

CH-3003 Bern

[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Autor:**

Thomas Kopp, HSR Hochschule für Technik Rapperswil, [thomas.kopp@hsr.ch](mailto:thomas.kopp@hsr.ch)

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

## Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Das Forschungsprogramm Wärmepumpen, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte fördert gemäss dem *Energieforschungskonzept des Bundes* [21] und dem dazu gehörenden *Detailkonzept* [22] die Entwicklung von modernen Heiz- und Kühlsystemen. Eine kurzfristige Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstosses um 50 % im Bereich Gebäudeheizung ist möglich, indem der von Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen produzierte Strom in Wärmepumpen eingesetzt wird, die dann in den Gebäuden Niedertemperaturheizwärme erzeugen. Mittelfristig soll keine fossile Energie mehr für Heizzwecke eingesetzt werden. Heute wird im Sektor Haushalte gemäss der schweizerischen Gesamtenergiestatistik 2008 [23] immer noch 62 % fossile Energie eingesetzt, die vor allem für Heizzwecke dient. Erst 13 % des Energieverbrauches der Haushalte stammt aus erneuerbarer Energie. In der Kälteerzeugung und -anwendung sind heute schon Energieeinsparungen von 25 % möglich [24]. Diese Ziele können über eine **verbesserte Effizienz der Komponenten und eine optimierte Systemintegration** erreicht werden. Kostenreduktionen sind Voraussetzung um eine ra-

sche Marktpenetration zu erreichen. Diese können durch Standardisierung der Systeme erreicht werden.

Die Forschungsschwerpunkte 2008 – 2011 des Programmes sind:

- Verbesserung der Komponenten und der thermodynamischen Kreisprozesse bei Wärmepumpen und bei Kälteanlagen;
- Effizienzverbesserungen bei WKK-Anlagen und Reduktion der Schadstoffemissionen;
- Ganzheitliche Systemoptimierung von Wärmepumpen – WKK – Kälte – Speicherung;
- Hoch effiziente Systeme für die Warmwasseraufbereitung;
- Miniaturisierung und neue Wege für den Einbau von Heiz- und Kühlsystemen mit Wärmepumpen (plug and play);
- Umweltverträgliche Arbeitsmedien für Wärmepumpen und Kältemaschinen.

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2009

### Wärmepumpen

#### Verbesserung der Komponenten und der thermodynamischen Kreisprozesse bei Wärmepumpen und Kältemaschinen

Wärmepumpen werden stetig verbessert. Die vom Wärmepumpentestzentrum WPZ in Buchs gemessenen Werte zeigen heute COP-Werte (COP = Coefficient of Performance) von durchschnittlich 3,5 für Luft/Wasser-Wärmepumpen bei A2/W35 und von 4,5 für Sole/Wasser-Wärmepumpen bei B0/W35 [25]. Die COP-Werte sind aus physikalischen Gründen abhängig von den Temperaturen der Wärmequelle und der geforderten Heiztemperatur (Wärmesenke). Der bestmöglich erreichbare Wert für den COP kann theoretisch aus den beiden Temperaturen der Wärmezufuhr und der Wärmeabfuhr berechnet werden, er wird auch als COP<sub>Carnot</sub> bezeichnet.

$$COP_{Carnot} = \frac{T_{Wärmeabgabe} [^{\circ}K]}{T_{Wärmeabgabe} [^{\circ}K] - T_{Wärmequelle} [^{\circ}K]}$$

Dabei wird vorausgesetzt, dass zwischen den externen Stellen im Heizungssystem und der Wärmepumpe (Kondensator), und zwischen der Wärmequelle und der Wärmepumpe (Verdampfer) keine Temperaturdifferenzen bestehen. Theoretisch hätte also eine Wärmepumpe, die eine Raumtemperatur von 20 °C produziert und dafür Umgebungsluft von 0 °C verwendet, eine Leistungszahl von COP<sub>Carnot</sub> = 14,65. Vergleicht man nun aber die gemessenen COP von realen Wärmepumpen muss leider ein deutlich tieferer Wert konstatiert werden. Das Verhältnis von gemessenem COP<sub>real</sub> und theoretischem COP<sub>Carnot</sub> wird Gütegrad ζ genannt.

$$\zeta = \frac{COP_{real}}{COP_{Carnot}}$$

Heutige Wärmepumpen weisen Gütegrade im Bereich zwischen 0,45 und 0,6 auf; es ist also noch ein erhebliches Verbesserungspotenzial vorhanden. Hier muss aber betont werden, dass die Wärmepumpe immer in einem Gesamtsystem inte-

griert ist: Es ist das Gesamtsystem, das optimiert werden muss, und nicht nur die Wärmepumpe selbst.



Figur 1: Prüfstand und Wärmepumpen-Prototyp im Labor der HSLU T&A [1]

Zur Verbesserung der Leistungswerte der Wärmepumpe wurden vom BFE im Berichtsjahr drei Projekte unterstützt. Das Projekt *Effiziente Luft/Wasser-Wärmepumpen durch kontinuierliche Leistungsregelung* [1] setzt die Erkenntnisse der abgeschlossenen Projekte *Loref* [26, 27] und *Wexa* [28] nun in eine konkrete Wärmepumpe um. Dabei werden sowohl der Kompressor als auch der Ventilator für die Aussenluftzirkulation mit einer Drehzahl variierenden Frequenzregelung ausgeführt und in einem Prüfstand (Fig. 1) getestet. Damit kann die Wärmepumpe immer gerade soviel Heizleistung erzeugen, wie das Gebäude gemäss seiner Heizkurve benötigt. Die Wärmepumpe produziert also keine momentan zu grossen Wärmeströme, die in den Wärmetauschern die notwendige Temperaturdifferenz erhöhen und dadurch zu kleineren Leistungszahlen führen. Die erwartete Verbesserung der Leistungszahlen liegt bei einer Quelltemperatur von 0 °C im Bereich von 33 %, bei höheren Temperaturen sogar noch höher. Auch die Industrie arbeitet in der Richtung von leistungsvariierenden Systemen, es werden allerdings zum Teil auch nicht-optimale Systeme vorgeschlagen. Die geplanten Versuchsergebnisse sollen mit schon im Markt befindlichen Produkten verglichen werden und diesen ihr weiteres Verbes-

serungspotenzial aufzeigen. Im Projektumfang sollen auch die bisher erarbeiteten Kenntnisse zur Abtauregelung in der Versuchsanlage umgesetzt und ausgemessen werden.

Im Projekt *Dynamischer Wärmepumpentest, Phase 3 und 4* [2] soll die Leistungsminderung von taktenden Wärmepumpen im EIN/AUS-Betrieb gegenüber stetig betriebenen Wärmepumpen erhöht werden. Damit können auch die Prüfstandmessungen im Vollbetrieb und die Ergebnisse aus Feldtests besser verglichen werden. Bisherige Vergleiche berichten von Leistungseinbussen bis 30 % beim taktenden Betrieb. Das Projektteam erarbeitet ein Wärmepumpen-Simulationsprogramm, das aus den vier Teilgebieten Kompressor, Kondensator, Verdampfer und Expansionsventil besteht und alle wesentlichen dynamischen Einflüsse integriert. Das Modell wird an den beiden Typen Luft/Wasser-Wärmepumpe und Sole/Wasser-Wärmepumpe angewendet und kann später auch zur Optimierung von Einzelteilen der Wärmepumpe verwendet werden.

Wärmepumpen können durch mechanische oder elektrische Energie angetrieben werden. Beide Formen sind hochwertig. Eine andere Antriebsstrategie besteht darin, thermische Energie als Antrieb zu nutzen, um mit einer kleineren Menge von Wärme von hoher Temperatur einen grösseren Betrag an Nutzwärme zu erzeugen. Dieses Prinzip wird in den Absorptions-Wärmepumpen oder den Diffusions-Absorptions-Wärmepumpen (DAWP) angewendet. Im Projekt *Pompe à chaleur thermique à double cycle de rankine* [3] wird Antriebswärme in einem mittleren Temperaturbereich eingesetzt, die aus erneuerbaren Energiequellen oder aus Abwärme stammen könnte. Diese Antriebswärme wird in einem ORC-Kreislauf (Organic Rankine Cycle) mithilfe einer Turbine (Fig. 2) in Antriebsenergie umgesetzt, die ihrerseits in einem zweiten ORC-Kreislauf mit einem Turbokompressor die Quellenwärme auf das nutzbare Temperaturniveau anhebt. Erste Berechnungen zeigen, dass mit diesem zweistufigen Rankine-Zyklus ein Gesamtwirkungsgrad von grösser als 1,6 möglich wird. Die Berechnungen werden mit Messungen an einem Teststand mit etwa 20 kW Heizleistung verglichen, wo mit dem Arbeitsmedium R-134a eine gasgelagerte Turbinen-Verdichterwelle mit Drehzahlen bis zu 250'000 rpm gefahren wird. Die Auslegung aller

Komponenten wurde mit speziellen Software-Paketen unterstützt.



Figur 2: Bestandteile der Kompressor-Turbinen-Einheit mit maximaler Drehzahl von 250'000 rpm, EPFL-LENI [3]

### Ganzheitliche Systemoptimierung von Wärmepumpen-WKK-Kälte-Speicherung

Dieser Abschnitt beleuchtet Projekte, die nicht nur den Aspekt Wärmepumpe, sondern ein grösseres System umfassen. Beim Betrieb von Wärmepumpen oder Kältemaschinen müssen immer auch die Wärmequelle und die Wärmesenke mitbetrachtet werden. Im Gebäudesektor muss im Winter Wärme zugeführt, im Sommer jedoch mit dem Kühlbedarf Wärme abgeführt werden. Damit könnte natürlich der Einsatz von Energiespeichern diskutiert werden. Die Saisonspeicher würden im Sommer Wärme einspeichern und im Winter aus dem Speicher den Heizbedarf decken, auch das Umgekehrte wäre für die Sommerkühlung möglich. Damit wäre das Energieproblem im Sektor Gebäude gelöst. Leider werden die Speicher insbesondere für bestehende, noch nicht maximal gedämmte Gebäude gross und teuer. Es sei daran erinnert, dass dieser Ansatz schon 1989 von J. Jenni im Jenni-Sonnenhaus in Oberburg bei Burgdorf in die Realität umgesetzt wurde [29].

Momentan ist im Markt eine verstärkte Nachfrage nach Kühlung festzustellen. Dieser zusätzliche En-

ergiebedarf soll ebenfalls optimiert werden. Das Projekt *SEK – Standardlösungen zum energie-effizienten Heizen und Kühlen mit Wärmepumpen* [4] untersucht Optionen zum Kühlen, wenn im Gebäude schon eine Wärmepumpe mit Erdwärmesonde integriert ist. Das Ziel ist die Definition von Standardsystemen für unterschiedliche Gebäudetypen inklusive Minergie- und Minergie-P-Gebäuden und die Ableitung von entsprechenden Auslegungsrichtlinien. Dazu wird nach Systemanalysen und verschiedenen Optimierungsberechnungen auch eine Feldmessung an einem Minergie-Einfamilienhaus durchgeführt. Die gewünschte sommerliche Behaglichkeit kann bei geschickter Systemwahl mit einem geringen Aufwand realisiert werden. Der Energieerzeugungsgrad der passiven Kühlung lag im Zeitraum Mai bis September 2009 bei 7,2. Es hat sich gezeigt, dass auch die Umschaltung vom sommerlichen Kühlbetrieb zum Heizbetrieb sorgfältig abgestimmt werden muss, damit sich die Systeme nicht gegenseitig konkurrieren. Die Projektergebnisse sollen in einem Leitfaden dokumentiert werden. Das Projekt liefert auch den nationalen Beitrag der Schweiz zum Annex 32 *Economical Heating and Cooling for Low Energy Houses* des Implementing Agreements *Heat Pumping Technologies* der Internationalen Energieagentur (IEA).

Im Berichtsjahr konnte das Projekt *Feldmonitoring und Analysen an Grosswärmepumpen, Phase 2* [5] abgeschlossen werden. In diesem sehr interessanten Projekt wurden 14 Grosswärmepumpen mit Wärmeleistungen zwischen 125 kW und 1,7 MW während einer längeren Betriebsperiode untersucht. Die über das Jahr ermittelten Leistungswerte JAZ (Jahresarbeitszahl) lagen zwischen 1,88 und 4,33 für das Bilanzgebiet der ganzen Anlagen und zwischen 2,33 und 4,83 für das Bilanzgebiet nur um die Wärmepumpe. Es gibt also enorme Unterschiede, und leider auch nicht-optimale Lösungen! Letztere können mit dem gewählten Konzept und der planerischen Qualität erklärt werden. Die Hauptproblematik liegt im Engineering der Wärmezuführung aus verschiedenen Wärmequellen und der Wärmeverteilung inklusive der Warmwasser-Bereitung. Zu erwähnen sind allgemeine Wärmeverluste, Auskühlverluste, Konstant-Pumpenbetrieb bei variabler Wärmeabgabeleistung, zentrale und dezentrale Warmwasser-Versorgung und Pumpenleistungen bei offenen Wärmequellen-Kreisläufen. Die Autoren planen, die Erkenntnisse

neben Fachartikeln auch in Seminarien zu verbreiten. Im Bereich Grosswärmepumpen sind effiziente Lösungen möglich, aber sie benötigen ein entsprechendes Know-how, und Planungsfehler führen zu erheblichen Einbussen.

Das Projekt *Beurteilungstool für Grosswärmepumpen – Phase 2* [6] erstellt ein einfach bedienbares Computerprogramm, das die energetische und wirtschaftliche Betriebsweise einer neuen Grosswärmepumpenanlage aufzeigen soll. Das Projekt wird co-finanziert vom Stromsparfonds des ewz, dem Awel (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft) des Kantons Zürich und dem Amt für Energie und Umwelt des Kantons Basel-Stadt. Wegen etwas zögerlicher Lieferung von Daten ist dieses Projekt zeitlich im Rückstand und wird 2010 abgeschlossen. Es wird dann der Öffentlichkeit und den interessierten Organisationen, zum Beispiel dem Städteverband, zur Verfügung stehen.

Im Projekt *Utilisation de géothermie profonde pour le chauffage de grands bâtiments avec pompes à chaleur à très hautes performances* [7] werden die Technologien und die Kosten beziehungsweise die Rentabilität von Erdsonden von 300 bis 800 m Tiefe für grössere Leistungen über 100 kW untersucht. Vor allem wird verglichen, wo die Vorteile liegen im Vergleich zu konventionellen Erdsondenfeldern mit Sondentiefen von 100 bis 200 m. Man rechnet damit, dass bei den tieferen Sonden nur noch Wasser als Wärmetransportmedium verwendet werden muss, und keine viskosere Glykol-Lösung mehr, da die Temperaturen 20 bis 30 °C erreichen werden. Damit wird dann natürlich auch die Leistungsziffer der Wärmepumpe massiv erhöht. Dieses Projekt wird zusammen mit dem BFE-Forschungsprogramm *Geothermie* durchgeführt.

### **Hocheffiziente Systeme für die Warmwasseraufbereitung**

Das Projekt *Warmwasseraufbereitung mit Wärmepumpe und sekundärseitiger Laderegelung – Messungen an einer Anlage in Uttwil* [8] untersuchte, wie energieeffizient und störungsfrei Warmwasser mit Wärmepumpen in Ein- und Mehrfamilienhäusern, Schulhäusern, Schwimmbädern oder Hotels erzeugt werden kann. In einem Vorprojekt *Warmwasseraufbereitung mit Wärmepumpen* [30] wurden mit einem aussen liegenden Wärmetauscher und Stufenladung Warmwassertemperaturen zwischen 54 und 57 °C erreicht, und damit ohne elektrische

Zusatzheizung Arbeitszahlen von 3,15 bis 3,33 realisiert. Im neuen Projekt stand eine Wärmepumpe mit Scroll-Verdichter und Dampf-Zwischeneinspritzung zur Verfügung, die eine maximale Verflüssiger-Austrittstemperatur von 65 °C ermöglichte. Es wurde nun eine Antilegionellenschaltung mit sekundärseitiger Laderegelung messtechnisch untersucht. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass mit einer Wärmepumpe mit sekundärseitiger Laderegelung alle drei Antilegionellenempfehlungen des Bundesamts für Gesundheit BAG erfüllt werden können. Die sicherste Lösung ist ein Antilegionellenbetrieb in Kombination mit einer Schichtladung im Normalbetrieb auf über 60 °C. Für Warmwasseraufbereitung im grösseren Leistungsbereich wurde ein neues Projekt gestartet, das im Abschnitt «Umweltfreundliche Arbeitsmedien für Wärmepumpen» beschrieben wird.

### **Miniaturisierung und neue Wege für den Einbau von Heiz- und Kühlsystemen mit Wärmepumpen (plug and play)**

Im Berichtsjahr konnten in diesem Segment keine neuen Projekte gestartet werden, obwohl in der Branche Aktivitäten zur Entwicklung von Heizkörper-Wärmepumpen immer wieder diskutiert werden. Die zentrale ungelöste Frage ist hier, inwiefern es sich energetisch und ökonomisch lohnt, viele Einzelraumgeräte gegenüber einer zentralen Heizungs- und Klimatisierungseinheit mit entsprechender Energieverteilung zu den Räumen einzusetzen. Es ist aber zu erwarten, dass 2010 Forschungsprojekte in diesem Sektor gestartet werden können.

### **Umweltverträgliche Arbeitsmedien für Wärmepumpen und Kältemaschinen**

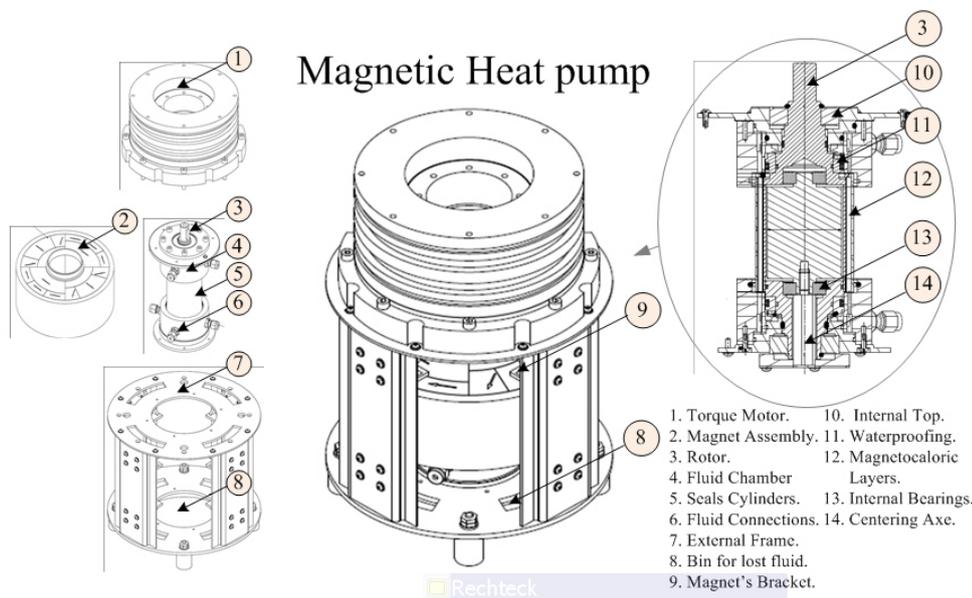
Die Frage der Arbeitsmedien oder Kältemittel ist nach wie vor aktuell. Die technische Situation hat sich aber nicht stark verändert. Bei grösseren Anlagen, bei welchen ein spezielles Engineering notwendig ist, kann ein vermehrter Trend zu Ammoniak und CO<sub>2</sub> beobachtet werden. Bei kleineren Wärmepumpen können die Propan-Wärmepumpen stetig Marktanteile gewinnen. Die Auflagen der Behörden sind allerdings sehr inhomogen und stark kantonal verschieden. In unserem Programm konnte das Forschungsprojekt *CO<sub>2</sub>-Erdwärmesonde, Phase 2* [9] abgeschlossen werden. Durch Modellierung der mehrphasigen Vorgänge im Fall-

film und beim Wärmeaustauschprozess an die Sondenwand konnte bewiesen werden, dass auch Sondenlängen von 300 m möglich sind. Innerhalb eines Toleranzbereiches bezüglich der Füllmenge an CO<sub>2</sub> verhalten sich die Sonden selbst stabilisierend und können auch im Zustand, wenn keine Wärme abgenommen wird, das vertikale Temperaturprofil im Erdreich ausgleichen und sich damit schneller regenerieren. Die ursprünglich verfolgte Idee der mehrfachen CO<sub>2</sub>-Flüssig-Einspritzung stellte sich als zu kompliziert und zu wenig effektiv heraus. Durch den Einsatz dieser pumpenlosen Erdwärmesonden, die zudem weniger treibendes Temperaturgefälle beim Wärmeaustausch an den Verdampfer erfordern, kann eine COP-Erhöhung an der Wärmepumpe von 15 % erwartet werden. Ein weiterer Vorteil der pumpenlosen Erdwärmesonde tritt auf, wenn das CO<sub>2</sub> auch das Arbeitsmedium der Wärmepumpe ist. Dann entfällt der Wärmetauscher am Sondenkopf und das gasförmige CO<sub>2</sub> wird direkt vom Kompressor angesaugt. Aus Gewässerschutzgründen muss dann aber das System ölfrei arbeiten. Die pumpenlose Erdwärmesonde hat gegenüber der Sole-Erdwärmesonde aber den Nachteil, dass sie für Kühlung aus physikalischen Gründen nicht funktionieren kann.

200 kW eingesetzt werden soll. Alleine in der Schweiz müssen jährlich in Hotels, Schulhäusern und Spitälern 700 Grossanlagen zur Warmwassererzeugung ersetzt werden, sodass sich weltweit ein riesiges Potenzial ergibt. Wiederum ist zu bemerken, dass die Ölfreiheit im Wärmepumpenkreislauf noch weitere energetische und apparative Vorteile bietet. Mitte 2010 soll ein erstes Funktionsmuster des neuen Kompressors in Betrieb genommen werden.

Seit Oktober 2007 läuft das Projekt *Magnetische Wärmepumpe mit Erdwärme-Quelle – Optimierter Prototyp* [11]. Ein energetischer und kommerzieller Erfolg der magneto-kalorischen Wärmepumpe würde natürlich die ganze Kältemitteldiskussion erübrigen und deshalb wird weltweit an diesem Prinzip intensiv geforscht. Das Projektteam versucht in dieser Projektphase, einen effizienten Prototypen (Fig. 3) mit einer Wärmeleistung von 8 kW zu bauen und auszumessen, der zwischen 5 und 35 °C arbeitet. Es waren mannigfaltige Probleme im Bereich Wärmeaustausch, Strömungsführung und Konstruktion zu lösen, wobei aufgrund des limitierten Temperaturhubes der magnetischen Materialien ein mehrstufiges Konzept gewählt werden musste. Da die Materialentwicklung auf Seite

der magnetischen Eigenschaften stetig fortschreitet, ist die definitive Wahl der Magnetmaterialien nicht einfach. Es zeigte sich auch, dass der Wirkungsgrad stark von der konstruktiven Genauigkeit abhängt, sodass das Projekt auch im Berichtsjahr verzögert wurde und die Betriebsresultate im Herbst 2010 erwartet werden.



Figur 3: Übersichtsbild der 8-kW-Wärmepumpe nach dem magneto-kalorischen Prinzip [11]

Im neu gestarteten Projekt *Ölfreier CO<sub>2</sub>-Kompressor für Grosswärmepumpen zur Warmwassererzeugung* [10a] wird ein Turbokompressor für CO<sub>2</sub> entwickelt, der vor allem für Warmwassererzeugung im Leistungsbereich zwischen 40 und

## Wärme-Kraft-Kopplung

Im Bereich Wärme-Kraft-Kopplung konnte im Berichtsjahr ein verstärktes Interesse an Umwandlung von Abwärme in hochwertige mechanische

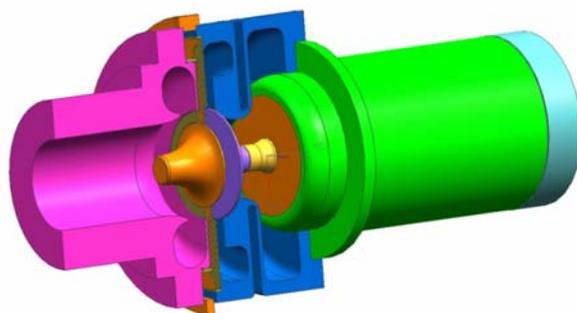
und elektrische Energie festgestellt werden. Es gibt kleinere KMU als Anbieter aber auch Grosskonzerne kündigten neue Produkte an [32]. Als Wärme-Kraft-Kopplung wird aber immer noch die gleichzeitige Umwandlung von chemischer Energie in Brennstoffen in mechanische Wellenenergie und nutzbare Abwärme verstanden. Für die Verminderung des CO<sub>2</sub>-Ausstosses und der Erhöhung der Effizienz soll weiterhin die Kombination von Wärme-Kraft-Kopplung und Wärmepumpen gestärkt werden. Damit lässt sich der CO<sub>2</sub>-Ausstoss um 50 % und mehr reduzieren. Die Schwierigkeit der verbreiteten Einführung dieses Konzeptes liegt in der Umsetzung, indem die Motoren aus ökonomischen Gründen eine Grösse von über 100 kW haben sollten und deshalb nicht jedes kleinere Gebäude mit einer eigenen Wärme-Kraft-Kopplungseinheit ausgerüstet werden kann. Absprachen unter verschiedenen Gebäudebesitzern scheinen aber schwierig zu sein.

### Systemoptimierung von WKK-Anlagen

Das Projekt *HTScroll – Nouveau système de cogénération à turbine spirale haute température* [12] konnte abgeschlossen werden. Es wurde auch durch den Axpo Naturstromfonds unterstützt. Der für Wasserdampf, natürliche oder klassische Kältemittel konzipierte Prototyp wurde nach grösseren konstruktiven und fertigungstechnischen Problemen schliesslich mit Luft mit einer Temperatur bis 190 °C bei Drehzahlen bis 6000 rpm getestet. Die Hochdruckturbine in Scroll-Design erreichte im monovalenten Betrieb einen Wirkungsgrad von 60 % bei elektrischen Leistungen zwischen 0,5 und 2,5 kW. Tests mit zweistufiger Expansion ergaben einen Wirkungsgrad von 30 % bei einem Eintrittsdruck von 15 bar. Der erreichte Wirkungsgrad ist stark abhängig von der Drehzahl, vom Druckverhältnis und von der Schmierölkonzentration. Um Marktfähigkeit zu erreichen, müssen der Versuchsstand messtechnisch erweitert und die Versuche in weiteren Entwicklungsschritten mit Wasserdampf und mit Kältemitteln weitergeführt werden.

Das Projekt *MEU – Instruments innovants de planification et de management de systèmes énergétiques en zones urbaines* [13] untersucht die Planung von Energieversorgungssystemen in urbanen Zonen. Das Projekt geht über die reine Wärme-Kraft-Kopplung hinaus. Es wird versucht, ein com-

puterbasiertes Tool zu entwickeln, mit welchem die energetische Planung von Quartieren und Stadtteilen optimiert werden kann. Dabei wird das elektrische Netz, die Gasversorgung, die Fernwärme und die Fernkälte einbezogen. Ausgehend vom Gebäudezustand sollen die optimalen Massnahmen dargestellt werden. Im bisherigen Projektverlauf wurden internationale Referenzprojekte beurteilt und in jeder Partnerstadt ein Teilprojekt lanciert. Als nächster Schritt wird das Tool entwickelt. Das Projekt wird auch vom Forschungsfonds der Gaswirtschaft (Foga) unterstützt und erhält auch von den Partnerstädten finanzielle und personelle Unterstützung.



Figur 4: Rotoreinheit der inversen Gasturbine am Ökozentrum Langenbruck [14, Graphik Fischer AG]

### Effizienzverbesserung von WKK-Anlagen und Reduktion von Schadstoffemissionen

Wie eingangs erwähnt, ist eine intensive Tätigkeit auf dem Gebiet der Abwärme-Verstromung zu beobachten. Im nun abgeschlossenen Projekt *Aactor !GT – Entwicklung einer inversen Gasturbine «Aactor» zur Nutzung erneuerbarer Energie und industrieller Abwärme, Phase 2* [14] wurde die Entwicklung einer Mikrogasturbine mit atmosphärischer Brennkammer für Schwachgas und Solarenergie bis zum Design des Funktionsmusters mit einer elektrischen Leistung von 2,4 kW weitergeführt. Dazu musste eine bestehende Hochgeschwindigkeitsspindel angepasst und eine thermische und eine FEM-Analyse der Turbinen/Generator-Einheit durchgeführt werden (Fig. 4). Der Rekupektor wurde evaluiert, gebaut und in die Versuchsanlage integriert. Der Testbetrieb über 50 Stunden zeigte eine gute Übereinstimmung mit Berechnungen der ZHAW Winterthur. In der nächsten Projektphase soll eine Schwachgas-Mikroturbine mit 9 kW elektrischer Leistung entstehen. Die Turbine soll gemäss der Projektplanung später auch mit Holzpellets oder mit konzentrierter Solarstrahlung

lung gefahren werden können. Dieses Projekt wird von der Zürcher Fachhochschule und den beteiligten Firmen namhaft unterstützt.

## Kälte

In der Schweiz benötigen die Erzeugung und Anwendungen von Kälte etwa 12 – 15 % der elektrischen Energie [33]. Kälte ist für unsere heutige Lebenssituation vor allem in der Lebensmittelkette unabdingbar. Aber auch die Gebäude benötigen mehr und mehr Kälte für die Klimatisierung im Sommer. Die Erzeugung und Verteilung von Kälte soll ebenfalls energetisch optimal erfolgen.

### Systemoptimierung von Kälteanlagen

Im jetzt abgeschlossenen Projekt *Abwärmenutzung in der gewerblichen Kälte – Energetische Analyse von zwei Verkaufsstellen* [15] wurde an zwei konkreten Verkaufsstellen von Migros und Coop bewiesen, dass sich Abwärmenutzung in beiden Fällen lohnt. Der ETV (elektrothermische Verstärkungsfaktor) gibt an, welche nutzbare Wärmemenge pro wie viel Strommehrverbrauch erzeugt werden kann. In einer Verkaufsstelle ergab sich für die Gesamtanlage (Minus- und Pluskälte) ein ETV von 24 und in der anderen Verkaufsstelle ein ETV von 8 für die Pluskälte. Auch in diesem Projekt hat sich gezeigt, dass schon bei der Planung der ETV beeinflusst werden kann: das Wärmeabgabesystem soll auf die tiefstmögliche Temperatur ausgelegt werden, die Wärme der Kälteanlage soll vollständig genutzt werden und zu häufiges Umschalten von Abwärmenutzungsbetrieb zu Rückkühlbetrieb soll vermieden werden.

Wie schon im Abschnitt Wärmepumpen erwähnt, ist die Frage der eingesetzten Arbeitsmedien immer noch aktuell. Auch in der Kälteerzeugung wäre das magnetokalorische Prinzip eine Option. Dieses Prinzip wird im Projekt *Réfrigération magnétique – Force magnétique* [16] intensiv untersucht. Das Projekt soll ermöglichen, die instationären mechanischen Kräfte zu berechnen, die an magnetischen Materialien (para- und ferro-magnetisch) angreifen, wenn sie in ein Magnetfeld ein- bzw. ausgedrückt werden. Diese transienten Vorgänge treten beim magneto-kalorischen Prinzip zwingend auf und müssen für die (Voraus-)Berechnung des Wirkungsgrades berechenbar sein. Die Schwierigkeit liegt darin, dass bei den instationären Vorgängen die Änderungen im Magnetfeld und die da-

durch induzierten Änderungen analytisch zu trennen sind. Es wurde ein Versuchsstand aufgebaut, der die Vorgänge an einer linearen Einheit untersucht. Später sollen die Resultate auch auf Drehbewegungen für rotierende magneto-kalorische Konzepte abgeleitet werden.



Figur 5: Einzelteile der Expansions-Kompressions-Einheit für eine CO<sub>2</sub>-Kälteanlage, TU Dresden [17]

### Verbesserung der thermodynamischen Kreisprozesse bei Kälteanlagen

Kälteprozesse sind wie Wärmepumpen-Prozesse so genannte links-laufende Kreisprozesse, die zwingend zwischen zwei Druckniveaus arbeiten müssen. Im Kompressor wird das Arbeitsmedium vom Verdampfendruck auf den höheren Kondensatordruck komprimiert, im Expansionsventil wird diese Druckdifferenz wieder abgebaut. In klassischen Kälteanlagen läuft diese Expansion ohne mechanische Energie-Rückgewinnung in Drosseln ab, da die mechanische Energie-Rückgewinnung bisher zu kompliziert und kostspielig war. Im Fall von CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen könnte aber bei Nutzung der Expansionsenergie der Wirkungsgrad theoretisch um 66 % verbessert werden [33]. Im Projekt *Effiziente Kälteerzeugung – Integration einer Expansionsmaschine in ein CO<sub>2</sub>-Kältesystem* [17] wird jetzt erstmals eine Expansionseinheit in einer kommerziellen Plus-Kälteanlage integriert. In diesem Projekt wird eine von der TU Dresden entwickelte Kompressions-Expansions-Einheit (Fig. 5) in Form von oszillierenden Hubkolben in die 80-kW-Anlage eingebaut. Die messtechnische Untersuchung erfordert zusätzliche Sicherheits-, Absperr- und Regelkomponenten, Messgeräte sowie erweiterte Regelalgorithmen. Die Anlage wird 2010 in Betrieb genommen. Es wird eine reale Wirkungsgrad-Verbesserung von mindestens 10 % erwartet.

## Nationale Zusammenarbeit

Durch die Mitarbeit von privaten Firmen in den meist sehr anwendungsnahen Projekten beteiligt sich die Privatwirtschaft intensiv an der Forschungstätigkeit. Das Engagement reicht dabei von einer Mitarbeit in einer Begleitgruppe bis zur Beisteuerung erheblicher finanzieller Beiträge. Da die Projektleiter häufig in einer Hochschule- beziehungsweise in einer Fachhochschule tätig sind, besteht zu diesen Institutionen eine besonders intensive Beziehung. Die Projektthemen wirken sich dabei auch auf den Unterricht aus, denn innerhalb den Projekten können auch kostengünstige Studienarbeiten integriert werden. Viele Institute an den Fachhochschulen bilden eigentliche Kompetenzzentren, auch wenn sie im Sinne der offiziellen Bezeichnung für Kompetenzzentren zu klein sind. Dafür wird an diesen Instituten ohne grossen Overhead sehr effizient gearbeitet.

Bei der Auflistung der Projekte wurde schon erwähnt, dass die vom BFE im Bereich *Wärmepumpen, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte* geförderten Projekte häufig auch von anderen Organisationen unterstützt werden. So engagieren sich neben vielen Firmen auch der Foga ([www.ergas.ch](http://www.ergas.ch)), der Axpo Naturstromfonds ([www.axpo.ch](http://www.axpo.ch)), der Kanton Waadt, das Awel des Kantons Zürich, das Hochbauamt der Stadt Zürich und das Amt für Umwelt und Energie des Kantons Basel-Stadt in verschiedenen Forschungsprojekten.

## Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit erfolgt vor allem durch eine aktive Mitarbeit im internationalen Normenwesen und im *Heat Pump Programme HPP* ([www.heatpumpcentre.org](http://www.heatpumpcentre.org)) der IEA. Im Gemeinschaftsprojekt des *IEA-HPP-Annex 32: Economical Heating and Cooling for Low Energy Houses* [18] stellt die Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) den Operating Agent. In diesem Projekt bearbeiten Forscherteams aus 10 Ländern die Entwicklung von multifunktionalen Wärmepumpen mit einer Leistung zwischen 3 und 5 kW, den dazu gehörenden Feldtests und der Ableitung von Empfehlungen für die Praxis. Die Aktivitäten können auf der Webseite [www.annex32.net](http://www.annex32.net) verfolgt

Mit den Branchenverbänden besteht ein institutionalisierter Informationsfluss, denn alle wesentlichen Verbände haben ein Mitglied in der Begleitgruppe unseres Forschungsprogramms. Vertreten sind die FWS (Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz), der WKK-Fachverband, der SVK (Schweizerischer Verein für Kältetechnik) und der SWKI (Schweizerischer Verein der Gebäudetechnik-Ingenieure).

Zu den anderen BFE-Forschungsprogrammen besteht ein intensiver Kontakt. Ein Forschungsprojekt wird gemeinsam mit dem Forschungsprogramm *Geothermie* unterstützt. Mit dem Programm *Solarwärme und Wärmespeicherung* besteht eine enge Zusammenarbeit im Bereich des gemeinsamen Annex *Wärmepumpe und Solar* innerhalb der IEA. Dadurch, dass die Programme *Energie in Gebäuden, Wärmepumpen, WKK, Kälte* und *Solarwärme und Wärmespeicherung* vom gleichen Bereichsleiter des BFE (Andreas Eckmanns) betreut werden, besteht eine besonders intensive Zusammenarbeit. Bei Projekten im Bereich WKK existiert ein regelmässiger Informationsaustausch mit dem Programm *Biomasse (ohne Holz)* und *Holzenergie* und im Bereich der magneto-kalorischen Kälteerzeugung und der elektrothermischen Energiewandlung mit dem Programm *Elektrizitätstechnologien und -anwendungen*.

werden. Der Annex soll Mitte 2010 abgeschlossen werden.

Das IEA *Heat Pump Programme* organisiert verschiedene internationale gemeinsame Aktivitäten im Rahmen von Annexen. Im Moment sind Aktivitäten im Bereich *Field Measurements* und *Calculation of Seasonal Performance Factors* kurz vor dem Projektstart. Die Schweiz konnte aber bisher aus Budgetgründen noch keine aktive Teilnahme zusichern, obwohl aus der Schweiz in diesen Bereichen viel Know-how eingebracht werden könnte, und wo die Schweiz ebenfalls an einer Weiterentwicklung interessiert wäre. Die Projekte können hoffentlich Anfang 2010 mit einer aktiven Beteiligung der Schweiz gestartet werden. Gemeinsam

mit dem IEA Implementing Agreement *Solar Heating and Cooling (SHC)* soll ein Annex *Heat pump and Solar* gestartet werden, an dem sich die Schweiz aktiv beteiligen wird. Der Operating Agent

wird vom Programmleiter des Forschungsprogramms *Solarwärmenutzung*, Jean-Christoph Hadorn, besetzt. Die Schweiz wird mehrere nationale Projekte beisteuern.

## Pilot- und Demonstrationsprojekte

Im Moment sind keine Projekte unter dem Status P&D in diesem Forschungsprogramm in Arbeit. Das Projekt *IWB – Kundenzentrum Steinen, Erfolgskontrolle* [19] kann aber als P&D-Projekt betrachtet werden. Hier wird eine Diffusions-Absorptions-Wärmepumpe (DAWP) kombiniert mit einem Gaskessel zur Heizung und Warmwassererzeugung des Kundenzentrums der Industriellen Werke Basel IWB eingesetzt. Die Energiezentrale kann auch kühlen. Die Wärmequelle und die passive Kühlung sollten ursprünglich durch den Grundwasserstrom realisiert werden. Der Grundwasserstrom ist allerdings nach dem Bau des Gebäudes versiegt und deshalb wurden nachträglich zwei Erdwärmesonden erstellt. Die Kühlung ist im Sommer erschwert, da die Austrittstemperatur der Erdwärmesonden im Sommer zwischen 18 und 20 °C beträgt. Die Kühlleistung erreicht nur 25 % des geplanten Wertes. Der Betrieb des DAWP-Prototyps ist noch nicht befriedigend, sodass in der bisherigen Berichtsperiode noch keine schlüssigen Energiekennzahlen eruiert werden konnten und die Laufzeit des Projektes verlängert werden muss.

Auch das Projekt *Exergieanalyse der Wärmepumpe im Schulhaus Limmat* [10b] hat Pilotcharakter. Seit 2006 ist im Schulhaus Limmat in Zürich eine Propanwärmepumpe in Betrieb, welche das Gebäude aus dem Jahre 1909 im Verbund mit einem Gaskessel beheizt und mit Warmwasser versorgt. Die Wärmepumpe bezieht Wärme aus einem Abwasserkanal mit einer im Winter typischen Temperatur von 14 °C. Damit wäre eine ideale Voraussetzung für eine Anlage mit einem hohen Wirkungsgrad gegeben. Die Anlage wurde im Projekt

ausgemessen und exergetisch beurteilt. Es ergab sich eine Jahresarbeitszahl von 2,7. Dieser Wert ist bedingt durch eine nicht-optimale Schaltung der Wärmeverteilung, die wegen einer kleineren Energiemenge in der Abwartwohnung auf einer zu hohen Vorlauftemperatur läuft. Leider wurden von dieser Anlage im Zeitraum vor dem 4. Dezember 2008 zu hohe Leistungswerte publiziert. Es wurde dann aber in diesem Messprojekt festgestellt, dass bei der Auswertung der Messwerte die elektrische Leistung der Kompressoren und der Gesamtwärmepumpe um Faktor 1,6 zu gering dargestellt wurden, sodass die COP-Werte um diesen Faktor zu hoch berechnet wurden. Die Hauptursache dieser ursprünglich hohen COP-Werte, die bei Experten auch von Anfang an zu Zweifeln Anlass gaben, war ein falsch eingegebener Faktor in der Messdatenerfassung. Das Wärmeverteil-Konzept wurde bei der Umstellung von Öffeuerung zur Wärmepumpe unverändert übernommen. Auch die Propanwärmepumpe lief nicht optimal, es wurden Oszillationen im Betrieb festgestellt. Die vorgeschlagenen Verbesserungsmaßnahmen führen rechnerisch zu einer Jahresarbeitszahl von 4,4. Noch vor Abschluss des Projektes wurde begonnen, die Massnahmen umzusetzen und einige positive Resultate konnten schon festgestellt werden. Die Oszillationen an der Wärmepumpe treten heute nicht mehr auf. Das Verhalten dieser Wärmepumpe kann online über die Webseite [www.schulhauslimmat.ch](http://www.schulhauslimmat.ch) verfolgt werden. Das Projekt wurde vom Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, Fachstelle Energie + Gebäudetechnik, finanziell und personell unterstützt.

## Bewertung 2009 und Ausblick 2010

Die 2009 bearbeiteten Projekte fördern die Erreichung der vom *Konzept der Energieforschung des Bundes* definierten Ziele. Es konnten auch einige Projekte abgeschlossen werden, die durch beson-

dere Umstände im Projektplan verzögert wurden. Das Projekt Analyse von Grosswärmepumpen zeigte eindrücklich, dass Wärmepumpen nur bei guter planerischer Integration ihr volles Leistungs-

vermögen ausweisen können. Bei schlechter Integration der Wärmepumpe in das Gesamtsystem ergeben sich grosse Wirkungsgradverluste. Besonders gespannt darf man auf den Abschluss des Projektes der magnetischen Wärmepumpe sein. Die begonnene Entwicklung eines Turbokompessors für CO<sub>2</sub>-Wärmepumpen ist ein sehr anspruchsvolles Projekt. Einen grossen Erfolg stellt der Start des Projektes der Integration der Ausnutzung der Expansionsenergie in den links-laufenden Kreisprozessen in praktischen Anwendungen dar. Mit diesem bisher nicht gewagten Schritt lässt sich der Wirkungsgrad in Abhängigkeit des Arbeitsmediums theoretisch zwischen 9 % für Ammoniak im Fall Wärmepumpe und 66 % im Fall von CO<sub>2</sub> für die Kälteerzeugung erhöhen.

## Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2009 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch) und [www.bfe.admin.ch/forschungwkk](http://www.bfe.admin.ch/forschungwkk) unter der angegebenen Projektnummer).

Unter den angegebenen Internet-Adressen und auf [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch) sind die Berichte sowie weitere Informationen verfügbar.

- [1] L. Gasser, M. Albert, I. Wyssen, M. Häusermann, B. Wellig ([beat.wellig@hslu.ch](mailto:beat.wellig@hslu.ch)), Hochschule Luzern – Technik und Architektur, CC Thermische Energiesysteme und Verfahrenstechnik, Horw: **Effiziente Luft/Wasser-Wärmepumpen durch kontinuierliche Leistungsregelung** (Jahresbericht Projekt 102'713)
- [2] M. Uhlmann, St. S. Bertsch ([stefan.bertsch@ntb.ch](mailto:stefan.bertsch@ntb.ch)), Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs NTB, Buchs: **Dynamischer Wärmepumpentest, Phase 3 und 4** (Jahresbericht Projekt 102'073)
- [3] J. Demierre, D. Favrat ([jonathan.demierre@epfl.ch](mailto:jonathan.demierre@epfl.ch)), EPFL, LENI, Lausanne: **Pompe à chaleur thermique à double cycle de Rankine** (Rapport annuel projet 102'846)
- [4] R. Dott, N. Lederle, Th. Afjei ([thomas.afjei@fhnw.ch](mailto:thomas.afjei@fhnw.ch)), Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut am Bau, Muttenz: **SEK – Standardlösungen zum energieeffizienten Heizen und Kühlen mit Wärmepumpen** (Jahresbericht Projekt 101'579)
- [5] P. Hubacher, M. Ehrbar ([he-ko@bluewin.ch](mailto:he-ko@bluewin.ch)), Hubacher Engineering, Engelburg und Enertec AG, Sargans: **Feldmonitoring und Analysen an Grosswärmepumpen, Phase 2** (Schlussbericht Projekt 100'917)
- [6] P. Hubacher ([he-ko@bluewin.ch](mailto:he-ko@bluewin.ch)), Hubacher Engineering, Engelburg: **Beurteilungstool für Grosswärmepumpen, Phase 2** (Jahresbericht Projekt 102'366)
- [7] F. Rognon, S. Perret ([stephanie.perret@planair.ch](mailto:stephanie.perret@planair.ch)), Planair SA, La Sagne: **Utilisation de géothermie profonde pour le chauffage de grands bâtiments avec des pompes à chaleur à très hautes performances** (Rapport annuel projet 103'436)

Nach dem grossen Erfolg der 15. Wärmepumpentagung vom 24. Juni 2009 in Burgdorf wird auch 2010 am 9. Juni die 16. Wärmepumpentagung stattfinden.

Auf internationaler Ebene wird 2010 im Zeichen der Vorbereitung der 10<sup>th</sup> *International Heat Pump Conference* vom 16. – 19. Mai 2011 in Tokio unter dem Konferenztitel *Heat pumps – The Solution for a Low Carbon World* stehen. Abstracts werden Mitte 2010 auch von Forschern aus der Schweiz erwartet. Danach gestaltet das International Organizing Committee, in dem der Programmleiter das Amt des Chairman bekleidet, das Konferenzprogramm. Weitere Informationen zur Konferenz sind auf der Webseite [www.hpc2011.org](http://www.hpc2011.org) zu finden.

- [8] H. Mayer, H. R. Gabathuler, Th. Baumgartner ([mayer.gmbh@bluewin.ch](mailto:mayer.gmbh@bluewin.ch)), Mayer Ingenieur GmbH Diessenhofen, Gabathuler Beratung GmbH Diessenhofen, Baumgartner & Partner AG Dübendorf: **Warmwasserbereitung mit Wärmepumpe und sekundärseitiger Laderegulierung – Messungen an einer Anlage in Uttwil** (Schlussbericht Projekt 101'494)
- [9] A. Grüniger, B. Wellig ([beat.wellig@hslu.ch](mailto:beat.wellig@hslu.ch)), Fachhochschule Luzern – Technik und Architektur, CC Thermische Energiesysteme & Verfahrenstechnik, Horw: **CO<sub>2</sub>-Erdwärmesonde, Phase 2** (Schlussbericht Projekt 102'247)
- [10] M. Friedl ([Markus.Friedl@awtec.ch](mailto:Markus.Friedl@awtec.ch)), awtec AG für Technologie und Innovation, Zürich: a) **Ölfreier CO<sub>2</sub>-Kompressor für Grosswärmepumpen zur Warmwassererzeugung** (Jahresbericht Projekt 103'073) b) **Exergieanalyse der Wärmepumpe im Schulhaus Limmat** (Schlussbericht Projekt 102'624)
- [11] P.W. Egolf, A. Kitanovski, C. Gonin, A. Nguenpang Noume, M. Liu, B. Yu, P. Repetti, A. Orita, J.L. Beney ([Peter.egolf@heig-vd.ch](mailto:Peter.egolf@heig-vd.ch)), Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Yverdon-les-bains, Universität von Turin, Italien, Jiao Tong University Xi'an, China: **Magnetische Wärmepumpe mit Erdwärme-Quelle – Optimierter Prototyp** (Annual report project 100'873)
- [12] M. Kane, D. Cretegnay, D. Favrat, J. Maquet ([malick.kane@eneftech.com](mailto:malick.kane@eneftech.com)), Enefttech Innovation SA Lausanne, EPFL-LENI Lausanne: **Projet HTScroll – Nouveau système de cogénération à turbine spirale haute température** (Rapport final projet 101'609)
- [13] G. Cherix, M. Capezzali ([massimiliano.capezzali@epfl.ch](mailto:massimiliano.capezzali@epfl.ch)), EPFL Energy Center Lausanne, HES-SO Valais, CREM Martigny: **MEU – Instruments innovants de planification et de management de système énergétiques en zones urbaines** (Rapport annuel projet 102'775)
- [14] M. Schmid ([martin.schmid@oekozentrum.ch](mailto:martin.schmid@oekozentrum.ch)), Ökozentrum Langenbruck, Langenbruck: **Aactor IGT – Entwicklung einer inversen Gasturbine «Aactor» zur Nutzung erneuerbarer Energie und industrieller Abwärme** (Schlussbericht Projekt 102'820)
- [15] M. Erb, St. Gutzwiller ([markus.erb@eicher-pauli.ch](mailto:markus.erb@eicher-pauli.ch)), Dr. Eicher+Pauli AG, Liestal: **Abwärmenutzung in der gewerblichen Kälte – Energetische Analyse von zwei Verkaufsstellen** (Schlussbericht Projekt 101'544)

- [16] M. Balli, O. Sari, C. M'Ahmed, Ch. Besson, M. Jaccard, Ph. Bonhote, D. David, J. Forchelet, P. Egolf, ([osmann-sari@heig-vd.ch](mailto:osmann-sari@heig-vd.ch)), HEIG-VD, IGT-TiS, Yverdon-les-Bains: **Réfrigération magnétique – Force magnétique** (Rapport annuel projet 103'069)
- [17] R. Gerber ([r.gerber@frigoconsulting.ch](mailto:r.gerber@frigoconsulting.ch)), Frigo-Consulting AG, Gümligen: **Effiziente Kälteerzeugung – Integration einer Expansionsmaschine in ein CO<sub>2</sub>-Kältesystem** (Jahresbericht Projekt 103'308)
- [18] C. Wemhöner, Th. Afjei ([carsten.wemhoener@fhnw.ch](mailto:carsten.wemhoener@fhnw.ch)), Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut für Energie am Bau, Muttenz: **IEA-HPP-Annex 32: Economical Heating and Cooling for Low Energy Houses** (Annual report project 101'579)
- [19] D. Mollet, R. Dott, Th. Afjei ([daniel.mollet@fhnw.ch](mailto:daniel.mollet@fhnw.ch)), Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut am Bau, Muttenz: **IWB – Kundenzentrum Steinen, Erfolgskontrolle** (Jahresbericht Projekt 101'527)
- [20] Th. Kopp, A. Eckmanns, R. Phillips ([thomas.kopp@hsr.ch](mailto:thomas.kopp@hsr.ch)), BFE Bern: **Tagungsband der 15. Tagung des Forschungsprogramms Wärmepumpen, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte des BFE: News aus der Wärmepumpen-Forschung: Heizen und Kühlen mit Wärmepumpen – Kombination Wärmepumpe und Solar**, Bundesamt für Energie BFE, 2009, Bern.

## Referenzen

- [21] Eidgenössische Energieforschungskommission CORE: *Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 bis 2011*, Bundesamt für Energie, April 2007.
- [22] Th. Kopp, A. Eckmanns: *Energieforschungsprogramm Wärmepumpen, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte für die Jahre 2008 bis 2011 (Detailkonzept)*, Bundesamt für Energie, Juli 2009.
- [23] Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2008: Bundesamt für Energie, 2008.
- [24] Th. Lang ([thomas.lang@ebp.ch](mailto:thomas.lang@ebp.ch)), Ernst Basler & Partner, Zürich: **Workshop Lücken zwischen den Gewerken**, Kälte-Forum 2008, Zürich, 27.11.2008.
- [25] M. Eschmann ([michael.eschmann@ntb.ch](mailto:michael.eschmann@ntb.ch)), Wärmepumpen-Testzentrum, Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs NTB, Buchs: **Monitoring von Kleinwärmepumpen mittels Normprüfungen 2008** (Schlussbericht Projekt 102'062).
- [26] L. Berlinger, L. Gasser, M. Albert, B. Wellig, K. Hilfiker ([beat.wellig@hslu.ch](mailto:beat.wellig@hslu.ch)), Hochschule Luzern – Technik und Architektur, CC Thermische Energiesysteme und Verfahrenstechnik, Horw: **LOREF – Lamellenluftkühler-Optimierung mit Reduktion von Eis- und Frostbildung: Optimierung des Lamellenluftkühlers/Verdampfers von Luft/Wasser-Wärmepumpen – Teil 1: Theoretische und experimentelle Untersuchungen** (Schlussbericht Projekt 100'059).
- [27] R. Sahinagic, L. Gasser, B. Wellig, K. Hilfiker ([beat.wellig@hslu.ch](mailto:beat.wellig@hslu.ch)), Hochschule Luzern – Technik und Architektur, CC Thermische Energiesysteme und Verfahrenstechnik, Horw: **LOREF – Lamellenluftkühler-Optimierung mit Reduktion von Eis- und Frostbildung: Optimierung des Lamellenluftkühlers/Verdampfers von Luft/Wasser-Wärmepumpen – Teil 2: Mathematisch-physikalische Simulation des Lamellenluftkühlers mit Kondensat- und Frostbildung** (Schlussbericht Projekt 100'059).
- [28] L. Gasser, B. Wellig, K. Hilfiker ([beat.wellig@hslu.ch](mailto:beat.wellig@hslu.ch)), Hochschule Luzern – Technik und Architektur, CC Thermische Energiesysteme und Verfahrenstechnik, Horw: **WEXA – Exergie-Analyse zur Effizienzsteigerung von Luft/Wasser-Wärmepumpen** (Schlussbericht Projekt 101'543).
- [29] K. Marti: **Energiemessungen an der Solarwerkstatt Jenni**, Bundesamt für Energie (Schlussbericht Projekt 2354, 1994).
- [30] H. Mayer, H.R. Gabathuler, Th. Baumgartner ([gabathuler-ag@bluewin.ch](mailto:gabathuler-ag@bluewin.ch)), Gabathuler AG Diessenhofen und Baumgartner & Partner AG Dübendorf: **Warmwasserbereitung mit Wärmepumpe** (Schlussbericht Projekt 101'494, Juli 2007)
- [31] Th. Boernert ([thomas.boernert@ch.abb.com](mailto:thomas.boernert@ch.abb.com)) ABB Baden-Dättwil: **Aus Abwärme wird Strom**, ABB Connect, 3, 2009
- [32] M. Kaufmann: **Energiepolitik, Energieeffizienz und Kälte**, Vortrag am Kälte-Forum08, 27. November 2008, Zürich
- [33] R. Heidelck, Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen FKW GmbH, Hannover: **Expansionsmaschinen für CO<sub>2</sub> auf der Basis von modifizierten Hubkolbenmaschinen**, DKV-Tagung 2000, Bremen