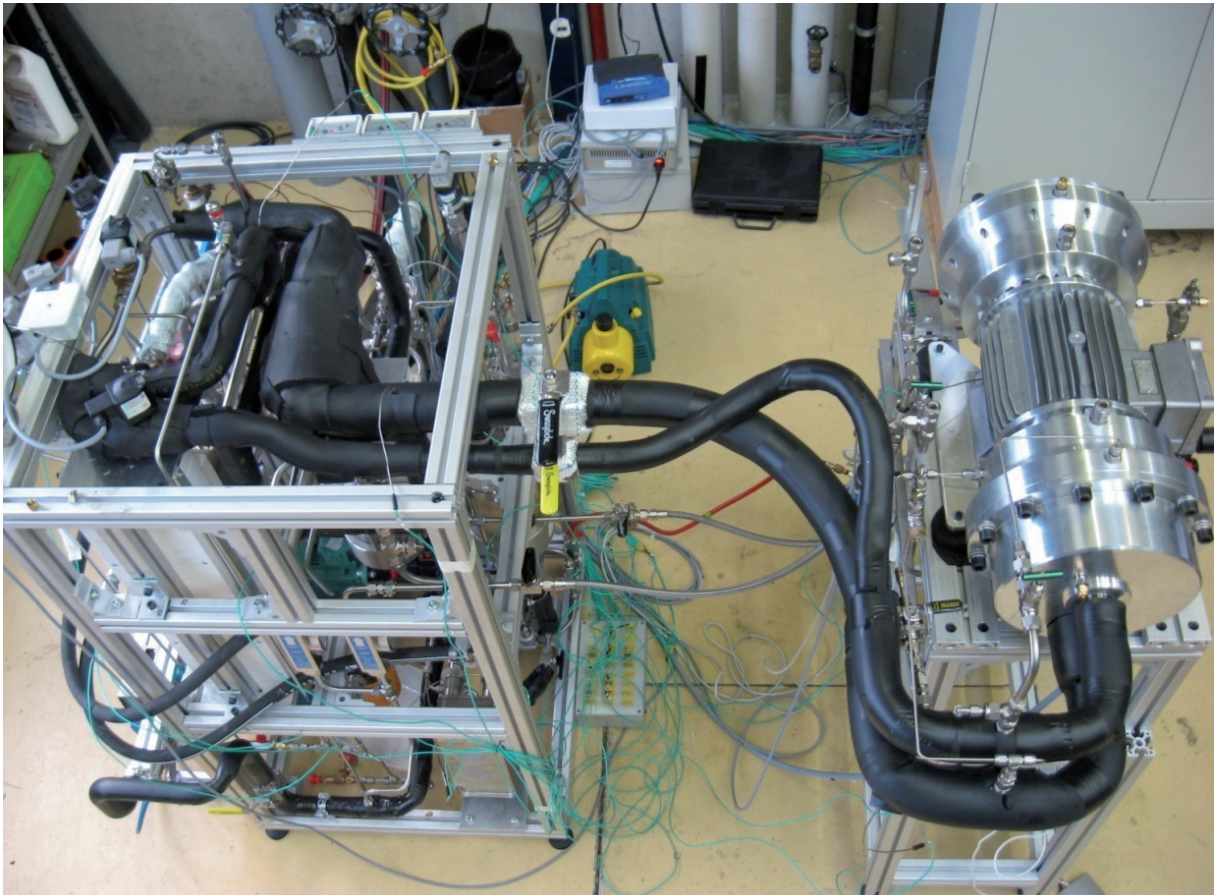


Rapport de synthèse 2008 du chef de programme OFEN Synthesebericht 2008 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Wärmepumpen, WKK, Kälte

Thomas Kopp

tkopp@hsr.ch



Prototyp einer WKK-Anlage mit zweistufiger Expansion auf dem Prüfstand

Die WKK-Anlage der Arbeitsgemeinschaft Eneftch SA und EPF Lausanne [1] soll aus Abfallwärme von 250 °C Elektrizität und Abwärme von 60 °C erzeugen. Mit der gewonnenen elektrischen Energie könnten wiederum Wärmepumpen angetrieben werden. (Foto aus [1])

Programmschwerpunkte

Das Forschungsprogramm Wärmepumpen, WKK, Kälte fördert die energieeffiziente Bereitstellung von Nutzwärme für Gebäudebeheizung und Wassererwärmung und von Kälte mittels Klima- und Kühlanlagen. Das Ziel ist die **Reduktion des Energieverbrauchs und des CO₂-Ausstosses durch Anwendung verbesserter Technologien und den Einsatz erneuerbarer Energie**. Heizsysteme, die fossile Energie direkt verbrennen, sollten sukzessive durch Wärmepumpen ersetzt werden. Die für deren Antrieb benötigte Energie stammt aus erneuerbarer Wasserkraft, aus WKK-Anlagen und aus dem Ersatz von Elektroheizungen.

Gemäss Gesamtenergiestatistik [25] haben der Gesamtenergieverbrauch der Schweiz 2007 um 2,6 %, der Verbrauch der fossilen Brennstoffe Heizöl extra-leicht um 12,3 % und von Gas um 1,8 % abgenommen, vor allem begründbar durch die Verminderung der Heizgradtage um 4,5 %. Der Heizenergieverbrauch beträgt aber immer noch etwa einen Drittel des Gesamtenergieverbrauchs. Die Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien [26] zeigt, dass der Anteil erneuerbarer Energie bei der Wärmeerzeugung erst 13,2 % beträgt. Davon stammt 18,3 % aus Umweltwärme. Es besteht also noch ein beträchtliches Substitutionspotenzial bei Heizanwendungen, obwohl 2007 in der Schweiz 17'011 Elektromotor-Wärmepum-

pen in Betrieb genommen wurden und gesamthaft 126'263 Anlagen in Betrieb waren. **Bis 2020 sollten gemäss BFE 400'000 Anlagen in Betrieb sein [27].**

Die energetischen Verbesserungen bei **Wärmepumpen** und **Kältemaschinen** liegen in **gesteigerter Effizienz**, ganzheitlicher **Systemoptimierung** und **Senkung der Kosten**. Die umweltrelevanten Verbesserungen liegen beim Einsatz von Arbeitsstoffen mit geringem Schadenspotenzial bezüglich Ozonschicht und Treibhauseffekt. CO₂ und Propan sowie Ammoniak in Grossanlagen werden heute oft eingesetzt, die **geeignetste Variante, die magnetische Wärmepumpe, würde allerdings gar kein fluides und damit potenziell flüchtiges Arbeitsmedium mehr benötigen**.

Wärme-Kraft-Kopplungs (WKK)-Anlagen setzen dezentral chemisch gespeicherte Energie (fossile oder erneuerbare) in nutzbare Wärme und mechanische Wellenenergie (ab Kurbelwelle oder Rotorwelle) um. Die mechanische Energie wird meistens durch einen Generator direkt in elektrische Energie umgewandelt. WKK-Anlagen erhöhen also die exergetische Ausbeute der chemischen Energieträger und können deshalb, insbesondere in Kombination mit Wärmepumpen, den **fossilen Heizenergieverbrauch um 30 bis 50 % reduzieren [27]**.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2008

Wärmepumpen

Steigerung der Effizienz

Der Wirkungsgrad oder COP (Coefficient of Performance) hängt bei Wärmepumpen von den Temperaturen der Wärmequelle und der Wärmesenke (abgegebene Wärme) ab. Alle realen Effekte wie Reibung oder notwendige Temperaturdifferenz für den Wärmestrom senken den theoretischen Wirkungsgrad. Ein Mass für die Auswirkung dieser realen Effekte ist der Gütegrad. Er vergleicht den effektiven Wirkungsgrad mit dem bei den herrschenden Temperaturen theoretisch möglichen Wirkungsgrad. Die Gütegrade bewegen sich zwischen 35 und 50 %, wobei sie bei kleinen Temperaturhuben eher kleiner sind als bei grossen Temperaturhuben. Dies ist aber logisch, da sich die treibenden Temperaturgefälle in den Wärmetauschern bei kleinen Temperaturhuben stärker auswirken als bei grossen Temperaturhuben.

In den vergangenen Jahren wurde an der Hochschule Luzern die Exergieanalyse im Bereich der Wärmepumpenanwendung eingesetzt, um die

verschiedenen Verluste zu identifizieren und zu quantifizieren. Das Projekt *WEXA: Exergie-Analyse zur Effizienzsteigerung von Luft/Wasser-Wärmepumpen* [2] zeigte klar, dass die grössten Exergieverluste im Kompressor anfallen. Eine Steigerung des exergetischen Wirkungsgrades gelingt durch Drehzahlvariation von Kompressor und Ventilator. Die Arbeit wurde in die englische Sprache übersetzt und wird auch im Newsletter des Heat Pump Centre des Heat Pump Programme der IEA [28] publiziert werden.

Es ist folglich logisch, dass nun in einem weiteren Projekt diese Erkenntnisse systematisch vertieft werden. Das neu gestartete Projekt *Effiziente Luft/Wasser-Wärmepumpen durch kontinuierliche Leistungsregelung* [3] hat das Ziel, eine Wärmepumpe mit drehzahlgeregeltem Kompressor und Ventilator zu entwickeln und auszumessen. Die erwartete Leistungssteigerung gegenüber einer Wärmepumpe mit Ein/Aus-Regelung liegt im Bereich einer Verdoppelung der Jahresarbeitszahl. Dabei ist es gelungen, den führenden Kompressorhersteller Emerson Climate Technologies und

den Ventilatorhersteller Ziehl-Abegg Schweiz AG in eine aktive Zusammenarbeit einzubinden. Die Konzeptionierung der neuen Wärmepumpe stützt sich auch auf die Resultate des Projektes *LO-REF: Luftkühler-Optimierung mit Reduktion von Eis- und Frostbildung* [4, 5], das die komplexen Wärme- und Stoffaustausch-Vorgänge bei der Verfestung und Vereisung von Luftkühlern als Wärmequelle für Wärmepumpen theoretisch und experimentell untersuchte.

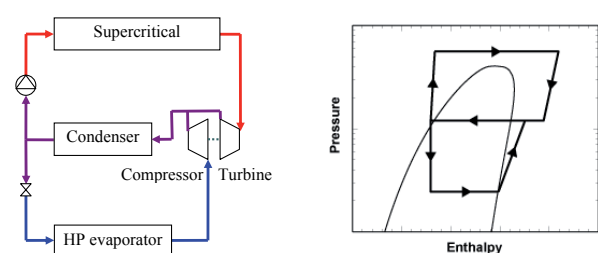
Durch die enorme Verbreitung der Wärmepumpen für Einfamilienhäuser und kleinere Gebäude, wo standardisierte und in Grossserien produzierte Wärmepumpen eingesetzt werden, zeigen diese Produkte eben auch die typischen Eigenschaften von Serienprodukten: Die Hersteller müssen ein marktfähiges Gleichgewicht zwischen technisch hoch stehenden Produkten und den damit einhergehenden Kosten anstreben. Nicht alle Hersteller haben sich für die Lösungen mit den heute erreichbaren Bestwerten entschieden und bieten technisch weniger hoch stehende Produkte zu tieferen Preisen an. Die im Projekt *Qualitätsprüfung von Kleinwärmepumpen mittels Norm- und Feldmessungen – Teilprojekt Effizienzsteigerung (Bestanlagen) und Langzeitverhalten* [6] gemessenen Wirkungsgrade der Standardprodukte zeigen eine beträchtliche Bandbreite. Im Gegensatz zu den Standardprodukten werden Grosswärmepumpen für jeden Einsatzfall speziell konzipiert und sind als Anlagebau-Produkte zu verstehen. Dadurch muss das Know-how von Projekt zu Projekt verbessert werden; eigentliche Testaufbauten sind aus Kostengründen nicht möglich. Gesamtenergetisch tragen aber die Grosswärmepumpen mit Leistungen von 200 kW bis 2,5 MW beträchtlich zur Gesamtenergiesituation bei. Deshalb verfolgt das Projekt *Feldmonitoring und Analysen an Grosswärmepumpen – Phase 2* [7a] die Leistungszahlen an 20 ausgewählten Grosswärmepumpen und versucht die ermittelten Unterschiede mit der vorhandenen, vom Anlageplaner gewählten Konzeption zu erklären. Hier muss man aber ebenfalls erwähnen, dass die Planer zum Teil durch andere Einflüsse, wie zum Beispiel das Architektur-Konzept, eingeschränkt werden und deshalb nicht immer die bestmögliche Lösung anwenden können. Eine andere Problematik ist das Bereitstellen und Verteilen von grösseren Wärmemengen auf mehrere Gebäude oder in Siedlungen. Je grösser die Wärmeströme sind, desto grösser müssen die Austauschflächen sein, oder das System reagiert mit nicht erwünschten grösseren treibenden Temperaturgefällen. Es gibt also eine optimale Grösse, insbesondere auf der Quellenseite. Der Wert des vernünftigen Maximums ist allerdings noch unklar und auf jeden Fall auch abhängig von der individuellen Situation.

Grosswärmepumpen werden auch häufig von Contracting-Firmen und öffentlichen Grundeigentümern betrieben. Natürlich interessieren sich die künftigen Betreiber sehr für die Beurteilung von Projekten in der Planungsphase. Die Erfahrungen aus den Untersuchungen an Grosswärmepumpen werden im auch von verschiedenen Städte-Organisationen unterstützten Projekt *Beurteilungstool für Grosswärmepumpen – Phase 2* [7b] eingearbeitet. Nachdem das Excel-Tool in Phase 1 ohne Unterstützung des BFE in Zusammenarbeit mit dem EWZ (Elektrizitätswerk der Stadt Zürich) entwickelt wurde, wird das Tool nun in Phase 2 mit Unterstützung des BFE an konkreten Anlagen validiert.

Die meisten Wärmepumpen in der Schweiz weisen elektrisch angetriebene Verdichter auf. Es gibt jedoch auch thermisch angetriebene Wärmepumpen nach dem Absorptionsprinzip oder Wärmepumpen mit einem Verbrennungsmotor als Antrieb. Im Projekt *Pompe à chaleur thermique à double cycle de rankine* [8] soll eine gasbetriebene Wärmepumpe entwickelt werden, die aber nicht auf dem Absorptionsprinzip beruht. Die zugeführte Antriebswärme wird hier mittels eines ORC-Prozesses (Organic Rankine Cycle) in mechanische Wellenenergie und nutzbare Abwärme umgewandelt. Die mechanische Wellenenergie treibt dann den Verdichter der Wärmepumpe an. Die Expansion und die Kompression werden mit hoch drehenden Turbomaschinen ausgeführt. Das Know-how zur Auslegung und Fertigung dieser Maschinen wurde in früheren Projekten mit Unterstützung des BFE erarbeitet [29]. Der erwartete Wirkungsgrad liegt über 1,6 und ist deutlich besser als bei einer Absorptions-Wärmepumpe.

Umweltfreundliche Kältemittel

Wärmepumpen funktionieren mittels eines thermodynamischen Kreisprozesses, in welchem ein Arbeitsmedium mit geeigneten Eigenschaften eingesetzt werden muss. Viele verschiedene Stoffarten erfüllen die verlangten Anforderungen, jedoch besitzen sie zusätzlich auch noch negative Eigenschaften, die mit dem technischen



Figur 1: Der Antrieb des Wärmepumpenkompressors erfolgt mit der Turbine aus dem ORC-Prozess [8].

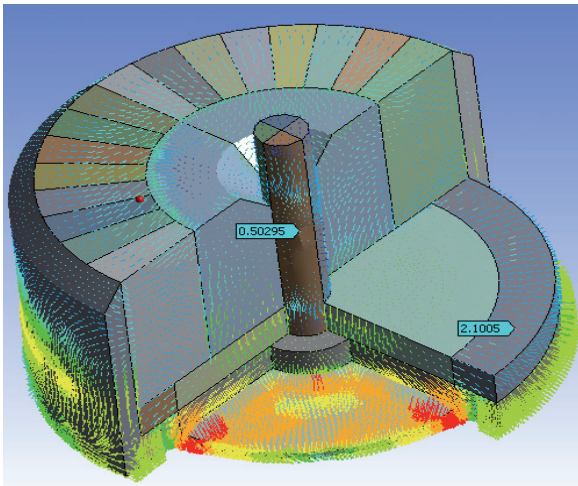
Verwendungszweck keinen Zusammenhang aufweisen. Die sogenannten «Sicherheitskältemittel», die Chlor- und Fluor-Verbindungen enthalten, schädigen die Ozonschicht (ODP = Ozon Depletion Potential) und tragen zum Treibhauseffekt bei (GWP = Global Warming Potential). Diese Arbeitsmedien sind heute in der Schweiz in Neuanlagen verboten. Auch die heute noch verbreitet eingesetzten H-FKW weisen wegen dem Fluor immer noch ein GWP auf. Natürliche Kältemittel, mit denen die Entwicklung der Kältetechnik vor Jahrzehnten begonnen hat, wie Propan, Kohlendioxyd und Ammoniak haben keine negativen Auswirkungen auf die Umwelt, jedoch haben sie alle einen bestimmten Nachteil wie zum Beispiel hohes Druckniveau bei Kohlendioxyd, Brennbarkeit bei Propan und Giftigkeit bei hohen Konzentrationen von Ammoniak. Es zeigt sich aber, dass die Entwicklung (zurück) zu den natürlichen Arbeitsmedien unaufhaltsam fortschreitet. Auch das BFE unterstützt diese Tendenz mit der Förderung verschiedener Projekte.

Das Projekt *CO₂-Erdwärmesonde – Phase 2* [9] vereint zwei Ziele. Das natürliche Arbeitsmedium CO₂ soll in einer Erdwärmesonde eingesetzt werden, die aufgrund der wärmetechnischen Randbedingungen in freier Konvektion, also ohne Förderpumpe funktioniert. Schon alleine durch den Wegfall der Umlauf-Förderpumpe kann der Anlagenwirkungsgrad um 5–8 % gesteigert werden. Als zusätzlicher Nutzen kann in einer weiteren Phase auch die Wärmepumpe selbst mit dem Arbeitsmedium CO₂ betrieben werden. Die Sonde und die Wärmepumpe könnten sogar direkt gekoppelt werden, allerdings nur, falls ein ölfreier Verdichter eingesetzt würde. Das BFE plant deshalb, 2009 ein neues Projekt für einen ölfreien Verdichter zu lancieren. Die Modellierung der Vorgänge in einer pumpenlosen Sonde – auch als Thermo-Syphon-Prinzip bekannt – mit Länge von 100 bis 300 m sind kompliziert, es müssen 2-Phasen-Phänomene modelliert werden. Der Sonden-durchmesser und die Sondenlänge bestimmen die notwendige Füllmenge. Bei zu grosser Füllmenge staut sich der Rieselfilm auf. Modellierungen mit Matlab zeigen aber, dass sich ein zuverlässiger Betrieb einstellt, wenn die Füllmenge stimmt. Als weitere Schritte müssen nun die physikalischen Modellergebnisse und die fertigungstechnischen Aspekte optimiert werden.

Das Hochbauamt der Stadt Zürich konnte 2006 eine einzigartige Wärmepumpe für das Schulhaus Limmat in Zürich in Betrieb nehmen. Die Propan-Wärmepumpe erzeugt 90 % des Heiz- und Warmwasserbedarfs und bezieht die Quellenwärme aus einem Hauptkanal der städtischen Kanalisation, der eine konstante Temperatur von ca. 14 °C aufweist. Die Vorlauftemperaturen des

Altbaus, dessen Hydraulikschaltung nicht verändert wurde, müssen bis 65 °C erreichen. In diversen Artikeln wurde die Anlage schon vorgestellt [30, 31] und auch die ermittelten COP-Werte wurden als sehr positiv dargestellt. Aus der aufgeschalteten Webseite www.schulhauslimmat.ch können die Messwerte online verfolgt werden. Verschiedenen Fachleuten erschienen die Werte allerdings etwas zu euphorisch, sodass zur Erlangung der Gewissheit das Projekt *Exergieanalyse der Wärmepumpe im Schulhaus Limmat* [10] als Gemeinschaftsprojekt des BFE und mehrerer interessierter Ämter und Firmen gestartet wurde. Es soll neben den korrekten COP-Werten auch Eignung und Wirkung des Propans als Arbeitsmedium untersucht werden, und das noch bestehende Verbesserungspotenzial soll eruiert werden. Nach einer akribischen Überprüfung der Messgeräte und der Auswertungsroutine konnte schliesslich der Fehler gefunden und behoben werden. Allerdings sind die realen Werte um einen Faktor 1,6 tiefer und mit einem absoluten COP von 2,7 bei Quelltemperatur 14 °C, Vorlauftemperatur 64 °C und Rücklauftemperatur 56 °C leider nicht mehr besonders bemerkenswert. Der Gütegrad beträgt nur 37 %. Im weiteren Projektverlauf wird das Anlagenkonzept durchleuchtet und Verbesserungsmöglichkeiten werden aufgezeigt. Auch soll im Schlussbericht klar unterschieden werden bezüglich der vorliegenden anlagespezifischen Aspekte und dem Aspekt des Einsatzes von Propan als Arbeitsmedium.

Die Problematik der umweltkritischen Arbeitsmedien kann durch das im Moment in einer interessanten Entwicklungsphase stehende Prinzip der magnetischen Wärmepumpe umgangen werden. Es wäre äusserst interessant, wenn das physikalische Grundphänomen des magneto-kalorischen Effektes in einer kompetitiven Variante als Wärmepumpe eingesetzt werden könnte. Nachdem das theoretische BFE-Projekt *Machbarkeitsstudie für magnetische Wärmepumpen: Anwendungen in der Schweiz* [32] gezeigt hat, dass das Prinzip der magnetischen Wärmepumpe für den Einsatz mit Erdwärmesonde und Fussbodenheizung eine reelle Umsetzungschance hat, unterstützt das BFE nun die Entwicklung eines Prototyps im Projekt *Magnetische Wärmepumpe mit Erdwärmequelle – Optimierter Prototyp* [11]. Der Prototyp soll eine Leistung von 8 kW aufweisen und zwischen 5 und 35 °C arbeiten. Bisher wurden zwei Varianten der Anordnung der Magnete konzipiert und es wird im Moment die optimale Variante ermittelt. Hier ist das Ziel, möglichst hohe magnetische Effekte zu erzielen mit möglichst wenig Magnetmasse. Neben der Bewältigung der klassischen physikalischen Probleme in den Bereichen Magnetismus, Thermo- und Fluidodynamik



Figur 2: 3D-Simulation der magnetischen Feldlinien in einer magnetischen Wärmepumpe [11].

sind auch konstruktive Probleme zu lösen. Es hat sich auch gezeigt, dass die gewünschten magnetischen Materialien weltweit nicht so leicht erhältlich sind. Die Weiterbearbeitung des Gebietes der magnetischen Heiz- und Kühltechnik wird auch vom Kanton Waadt massgeblich unterstützt.

Systemintegration

Der Wirkungsgrad COP der Wärmepumpe ist direkt abhängig von der Temperatur der zugeführten Wärme und der Temperatur der abgeführten Nutzwärme. Die Gebäude sollten auf eine Innentemperatur von 20 bis 22 °C beheizt werden. Nimmt man eine Temperatur von 20 °C an und eine Anlage mit einer Erdsonde und einer Erdtemperatur von 5 °C, ergibt sich ein theoretischer Wirkungsgrad COP von 19,5. Dies bedeutet, dass bei Zufuhr von 1 Energieeinheit hochwertiger Antriebsenergie in Form von mechanischer Wellenenergie die Wärmepumpe 19,5 Energieeinheiten Wärme von 20 °C abgeben kann. Nun muss aber die Energie zuerst vom Quellmedium an die Wärmepumpe und dann auch von der Wärmepumpe in das zu beheizende Gebäude strömen. Dazu werden «treibende Gefälle», hier treibende Temperaturgefälle, benötigt. In heutigen Gebäuden ist die Heizung in Nebenräumen, meist im Keller angeordnet und die produzierte Heizwärme muss zuerst an die zu beheizenden Orte transportiert werden. Frühere Gebäude platzierten die Heizelemente im Zentrum des Gebäudes, z.B. offene Feuer oder Kachelöfen. Nimmt man in der Erdsonde ein Temperaturgefälle von 5 °C, im Verdampfer der Wärmepumpe von 5 °C, im Kondensator der Wärmepumpe von 5 °C und in der Wärmeverteilung von 15 °C an, reduziert sich der zu erwartende Wirkungsgrad schon auf 7,0, obwohl noch keine internen Verluste in Kompressor, Expansionsventil, Hilfsantrieben und Steuerung berücksichtigt wurden. Es ist also ex-

trem wichtig, dass die Temperaturdifferenzen zwischen Wärmequelle und Wärmepumpe und zwischen Wärmepumpe und zu beheizendem Raum möglichst gering sind. Das kann nur erreicht werden, wenn die Wärmepumpe sowohl im Wärmeverteilsystem als auch architektonisch besser in das Gesamtsystem integriert wird. Heute ist die Praxis betreffend dieser Systemintegration noch sehr weit vom Optimum entfernt.

Im Projekt *Verbesserung der Jahresarbeitszahl durch witterungsgeführten Ladekreis* [7c] konnte eine Verbesserung der Jahresarbeitszahl von 11 % erreicht werden. Das Konzept besteht darin, dass der Wasserstrom, der im Kondensator die Nutzwärme abnimmt, entsprechend der Heizkurve und damit entsprechend der Aussentemperatur variiert wird. Dadurch kann die Temperaturdifferenz zwischen Kondensation und Wassertemperatur verringert werden, was sich positiv auf den Wirkungsgrad der Wärmepumpe auswirkt. Die Realisierung dieses Konzeptes in bestehenden Anlagen bedarf aber gewisser Voraussetzungen. Der Speicher muss einwandfrei schichten und das Regulierventil muss schnell sein bzw. es muss eine modulierende Umwälzpumpe vorhanden sein. Der wasserseitige Druckverlust des Kondensators darf auch bei grossen Massenströmen nicht zu gross werden. Im Projekt wurden zwei Anlagen umgebaut und ausgemessen. Das Konzept weist grössere Verbesserungspotenziale bei Luft/Wasser-Wärmepumpen auf als bei Sole/Wasser-Wärmepumpen.

Wärmepumpen können auch für die Bereitstellung von Warmwasser eingesetzt werden. Kleinere Wärmepumpen sind für den kombinierten Betrieb konzipiert, sie heizen und bereiten das Warmwasser meistens zeitlich separiert. Es sind aber auch kleinere Wärmepumpenboiler auf dem Markt, die nur Warmwasser erzeugen. Häufig beziehen sie die Quellwärme direkt aus den Kellerräumen, sind also Luft/Wasser-Wärmepumpen. Der Kondensator der Wärmepumpe ist gleichzeitig der Heizwärmetauscher im Boiler. Grössere Gebäude weisen separate Warmwasser-Wärmepumpen auf, die grössere Warmwasserspeicher versorgen. Hier stellt sich die Frage der optimalen Konzeption der Wärmetauscher und des Regelungskonzeptes. Das Projekt *Warmwasserbereitung mit Wärmepumpe und sekundärseitiger Laderegelung – Messungen an einer Wärmepumpenanlage in Uttwil TG* [12], das die Fortsetzung einer früheren Phase [33] darstellt, hat das Ziel, die sekundärseitige Laderegelung zu untersuchen, die vor allem für den Anti-Legionellen-Ladebetrieb benötigt wird. Dazu werden die optimale Kombination von Stufen- und Schichtladung mit den jeweiligen Arbeitszahlen und das Regelkonzept variiert und unter-

sucht. Das Projekt wird auch zu Empfehlungen für die Praxis führen, die den Planern erklären, wie man in Einfamilien-, Mehrfamilien- und Schulhäusern einwandfreie Ladevorgänge mit handelsüblichen Wärmepumpen für Stufen- und Anti-Legionellen-Betrieb konzipiert, ohne dabei elektrische Zusatzheizungen einsetzen zu müssen.

Die Klimaveränderung und architektonische Trends führen dazu, dass der Heizbedarf in modernen, gut gedämmten Gebäuden eher sinkt und der Kühlbedarf, vor allem im Sommer, steigt. Kälte bzw. tiefere Temperaturen lassen sich mit Kältemaschinen herstellen, die apparativ gleich aufgebaut sind wie Wärmepumpen. Es bietet sich also an, die in vielen Gebäuden schon vorhandenen Wärmepumpen auch zum Kühlen einzusetzen oder bei neuen Gebäuden von Planungsbeginn an Heizen und Kühlen vorzusehen. Obwohl Kühlen im Sommer eher ein verzichtbarer Luxus ist, zeigt sich, dass die Eigentümer nicht mehr auf diesen Komfort verzichten wollen. Das BFE versucht deshalb, die Umsetzung dieses Bedürfnisses durch die Bereitstellung von Empfehlungen auf eine energieeffiziente Weise zu ermöglichen. Das Projekt *SEK – Standardlösungen zum energieeffizienten Heizen und Kühlen mit Wärmepumpen* [13] sucht praxisgerechte Standardlösungen zum Heizen und Kühlen mit Wärmepumpen für unterschiedliche Anwendungsfälle wie Minergie- und Minergie-P-Gebäude. Die Arbeiten sollen schliesslich Auslegungsrichtlinien für die Praxis generieren. Nach Markt- und Literaturrecherchen wurde das schon früher für Simulationen entwickelte Gebäudemodell an eine neu zu untersuchende Feldanlage angepasst. Die Feldanlage wird instrumentiert und nun während zwei Jahren ausgemessen. Die im früheren BFE-Projekt «Rechenmethode für den Jahresnutzungsgrad von Wärmepumpen-Kompaktgeräten und Validierung» [34] entwickelte Rechenmethode, die von der europäischen Normenorganisation CEN übernommen und publiziert wurde (EN 15316-4-2) soll zusätzlich für den Kühlbetrieb ergänzt werden. Dieses Projekt ist auch der Schweizer Beitrag zum Annex 32 des Implementing Agreements *Heat Pumping Technologies* der IEA mit dem Titel *Economical Heating and Cooling Systems for Low Energy Houses* [14]. Dieser Annex wird von der Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie geleitet.

Im Projekt *IWB-Kundenzentrum Neubau Steinen – Erfolgskontrolle der erdgekoppelten Diffusions-Absorptions-Wärmepumpe zum Heizen und Kühlen* [15], das auch vom FOGA (Forschungsfonds der schweizerischen Gasindustrie) und von den IWB (Industrielle Werke Basel) unterstützt wird, wird das Zusammenspiel von Grundwassersonde, gasbetriebener Diffusions-Absorptions-Wärme-

pumpe (DAWP) und Energieverteilsystem in einem grossen, 5-stöckigen Minergie-P-Gebäude messtechnisch untersucht. Für ein angenehmes Betriebsklima sorgen TABS (thermoaktive Bauteilsysteme) und Komfortlüftung. Aus den Resultaten sollen dann Verbesserungen abgeleitet werden. Auch kann das Verhalten der gasbetriebenen DAWP mit einer Leistung von 3,6 kW aus dem Gaswärmepumpen-Effekt und einer maximalen Leistung von 19 kW aus dem integrierten Gas-Brennwertkessel untersucht werden. Das BFE hat in früheren Jahren die Entwicklung des DAWP-Prinzips ebenfalls unterstützt.

Umgebungswärme aus Luft, Erdreich und Wasser wird in der Schweiz als erneuerbare Energie betrachtet. Sie kann aber wegen der zu tiefen Temperaturen nicht direkt genutzt werden. Wärmepumpen benötigen hochwertige Antriebsenergie, die nur dann als erneuerbar betrachtet werden kann, wenn sie ohne Verbrauch von fossilen Energieträgern produziert wird. Die gegenwärtig im Netz angebotene elektrische Energie ist auch in der Schweiz mit einem hohen Wasserkraftanteil der Elektrizitätsproduktion teilweise als erneuerbar zu betrachten. Wasserkraft, Wind und Solarenergie sind erneuerbar, wie auch biogene Energieträger. Es muss deshalb untersucht werden, wie der Anteil erneuerbarer Energie beim Betrieb von Wärmepumpen erhöht werden kann. Ein diesbezüglicher Aspekt ist die Kombination von Wärmepumpenbetrieb und Solarenergie.

Das Projekt *SOL-PAC – Analyse des performances du couplage d'une pompe à chaleur avec une installation solaire thermique pour la rénovation* [16] untersuchte die energetische Verbesserung des Wirkungsgrades und die ökonomischen Konsequenzen bei einer Systemintegration von thermischen Sonnenkollektoren in verschiedenen Varianten und für je ein Einfamilienhaus und ein kleineres Verwaltungsgebäude. Die mit TRNSYS durchgeführten Simulationen zeigten, dass heute aus ökonomischer Sicht der Betrieb ohne Solarunterstützung am günstigsten ist, jedoch eine energetische Verbesserung in Abhängigkeit des Klimas zwischen 15 und 36 % möglich wäre. Die Simulationen wurden jedoch ohne Berücksichtigung der Vereisungs- und Verfrosterseffekte durchgeführt. Die Verbesserungen sind am höchsten, wenn im Primärkreislauf der Sonnenkollektoren ein Zwischenspeicher vorgesehen wird. Das Projektergebnis zeigt ferner, dass die saisonale Wärmespeicherung das richtige Vorgehen wäre, was aber heute aus Kostengründen leider noch nicht marktkonform ist. Weitere Untersuchungen müssen in dieser Richtung unternommen werden.

Planer verwenden schon seit längerer Zeit Simulations-Tools für die Auslegung von Anlagen, dies in

vermehrtem Mass auch für kleinere Objekte. Das Simulationsprogramm Polysun wurde speziell für die Auslegung von solarthermischen Anlagen konzipiert und dann in mehreren Schritten zu einem kostengünstigen aber sehr flexiblen Simulationswerkzeug erweitert. In diesem Tool können heizungstechnische Anlagen aus vorkonfigurierten Bausteinen von im Handel befindlichen Komponenten frei zusammengesetzt werden, was eine hohe Flexibilität und Individualität erlaubt. Im Projekt *Simulation von Wärmepumpensystemen in Polysun 4* [17] wurden Module von Luft/Wasser- und Sole/Wasser-Wärmepumpen entwickelt und integriert. Handelsübliche Wärmepumpen wurden ebenfalls in die Bauteilebibliothek eingebaut. Damit wurde eine weitere Grundlage zur Verbreitung von Wärmepumpen geschaffen. Bei dieser Integration wurden aber auch grundsätzliche Fragestellungen bearbeitet, denn es sollte das richtige Verhalten der Wärmepumpen im Betrieb simuliert werden, wobei für die Charakterisierung der Leistungen der einzelnen Wärmepumpen nur 3 bis 4 Einzelmessresultate aus den offiziellen Prüfergebnissen verwendet wurden. Zwischenwerte mussten dann vom Programm physikalisch richtig interpoliert werden.

Standardisierung und Testverfahren

Wärmepumpen arbeiten heute noch meistens im Ein/Aus-Betrieb, um die verlangte Leistung regulieren zu können. Dabei treten Ineffizienzen durch das Anfahren und Abstellen auf. Früher hatte man die Absicht, diese Verluste, die 5 bis 30 % betragen können, durch Messungen auf dem Prüfstand zu eruieren. Durch die vermehrte Prüftätigkeit sind heute jedoch die Prüfstände zu stark ausgelastet, um diese aufwendigen Messungen auch noch durchführen zu können. Das Projekt *Dynamischer Wärmepumpentest Phase 3 und 4* [18] hat das Ziel, die im Betrieb zu erwartenden Verluste aus stationären Messungen berechnen zu können und die Leistungsfähigkeit im ON/OFF-Betrieb durch optimierte Bedingungen (Steuerung, Komponenten, etc.) zu verbessern. Phase 3 konzentriert sich auf Luft/Wasser-Wärmepumpen und Phase 4 auf Sole/Wasser-Wärmepumpen.

Auch die Leistungsfähigkeit von Wärmepumpen muss durch offizielle Prüfungen gesichert werden. Kunden sollten bei der Produkt-Auswahl neben dem Preis auch vermehrt die Leistungsdaten berücksichtigen. Das Projekt *QS-WP/QP: Qualitätsprüfung von Kleinwärmepumpen mittels Norm und Feldmessungen – Teilprojekt Langzeitverhalten 2007–2008* [19] ist eine Fortsetzung des FAWA-Projektes [35] und konzentrierte sich auf das Langzeitverhalten der Arbeitszahl (Alterung) und die Wartungs- und Reparaturkosten in Abhän-

gigkeit des Alters der Wärmepumpe. Es konnte in den bisher 13 Beobachtungsjahren kein Abfallen der Leistungszahl festgestellt werden. In mehr als 1,6 Mill. Betriebsstunden war die Ausfallquote nur 0,25 %. Aus einem Sample von 61 Anlagen konnten mittlere Wartungskosten von 18,5 CHF/Jahr und mittlere Reparaturkosten von 74,5 CHF/Jahr ermittelt werden.

Die Typenprüfungen von Wärmepumpen müssen nach international festgelegten Norm-Verfahren durchgeführt werden. Diese müssen durch die sich verändernden Anforderungen und durch neue Produkte periodisch überprüft und angepasst werden. Das Wärmepumpen-Testzentrum in Buchs SG hat den Vorsitz der Arbeitsgruppe CEN TC 113/WG10 übernommen, die die Prüfung von Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern zur Erwärmung von Brauchwasser bearbeitet. Das BFE unterstützt diese Arbeiten im Projekt *Vertretung BFE im CEN und Vorsitz WG10* [20]. Der definitive Normenentwurf wurde 2008 fertiggestellt und der TC 113 zur Freigabe zum CEN Enquiry vorgelegt, der Mitte September 2008 gestartet wurde.

Wärme-Kraft-Kopplungen (WKK)-Anlagen

Wie schon in der Einführung und beim Projekt *Pompe à chaleur à double cycle rankine* [8] ausgeführt, bringt die Kombination von WKK und Wärmepumpen ein CO₂-Reduktionspotenzial von 30 bis 50 %. Beide Prozessschritte sollen dabei natürlich höchste Wirkungsgrade erreichen. In jüngster Zeit wird zudem vermehrt versucht, Abwärme mittlerer Temperatur oder Wärme aus der Verbrennung von minderwertigen oder biogenen Brennstoffen auszunutzen, und elektrische Energie zu produzieren.

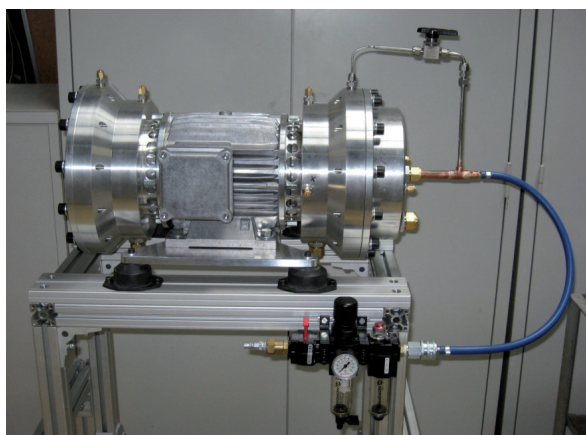
Steigerung der Effizienz

Im Projekt *Energetische Optimierung von Biogas-BHKW's* [21] wurden verschiedene Möglichkeiten gesucht, den Wirkungsgrad von mit unaufbereitetem Biogas betriebenen WKK-Anlagen zu erhöhen und die Verbesserungen zu quantifizieren. Durch die Einspeisevergütung können apparative Zusatzkosten von bis zu 20'000 CHF/kW zusätzlich gewonnener elektrischer Leistung wirtschaftlich getragen werden. Die Untersuchungen konzentrierten sich auf die Steigerung des verbrennungsmotorischen Wirkungsgrades und die Umwandlung der ungenutzten Abwärme in elektrische Energie durch zusätzliche technische Systeme wie ORC, Stirlingmotoren und thermo-elektrische Wandler. Obwohl grosse Forschungsaktivitäten bei der Erforschung von neuartigen, ungiftigen und Hochtemperatur-unempfindlichen Materialien zu beobachten sind, dürfte die Nutzung der

thermoelektrischen Wandlung im WKK-Leistungsbereich noch einige Jahre an Forschungsaufwand bedingen.

Das Projekt *Projet HT Scroll – Nouveau système de cogénération à turbine spirale haute température* [1], das auch vom Axpo Naturstromfonds und verschiedenen Firmen unterstützt wird, möchte eine marktfähige Lösung im kleineren Leistungsbereich von etwa 5 kW_{el} anbieten zur Umwandlung von Abfallwärme mit einer Temperatur von um oder unter 250 °C in elektrische Energie und nutzbarer Abwärme von etwa 60 °C. Eine solche Apparatur könnte auch aus Biomasse-Verbrennung, Solarthermik oder Geothermie einfach elektrische Energie gewinnen. Das Grundkonzept sieht vor, dass ein ORC-Arbeitsmedium durch eine zweistufige Scroll-Turbine entspannt wird. Scroll-Turbinen wurden als einfach käufliche Elemente vorausgesetzt, weil diese Apparate in Grossserien als Verdichter in Wärmepumpen angeboten werden. Die im Vergleich zum Wärmepumpen-Betrieb höheren Betriebstemperaturen und die gegenseitige Beeinflussung von Arbeits- und Schmiermedien verursachten aber verschiedene technische Probleme, die auch dazu führten, dass die Scroll-Turbinen ganz neu ausgelegt und gebaut werden mussten. Im vorliegenden Projekt soll die Expansionsmaschine gegenüber der Umgebung hermetisch sein und keine Wellendurchführung nach aussen enthalten. Deshalb muss das Drehmoment zwischen Rotor und Stator magnetisch durch ein Trennrohr nach aussen übertragen werden. Obwohl inzwischen ein instrumentierter Teststand aufgebaut werden konnte (vgl. Titelbild) und verschiedene zielgerichtete Vorversuche mit Ersatzmedien durchgeführt wurden, ist das Projekt zeitlich im Rückstand und kann erst 2009 abgeschlossen werden.

Das BFE unterstützt das Projekt *Aactor !GT – Entwicklung einer inversen Gasturbine Aactor zur Nutzung erneuerbarer Energie und industrieller*



Figur 3: Zweistufige Scroll-Turbine auf dem Prüfstand mit dem Prüfmedium Luft [1]

Abwärme, Phase 2 [22], nachdem die Vorphase 1 ohne öffentliche Unterstützung beendet wurde. Es soll eine Mikro-Gasturbine mit 2,4 kW elektrischer Leistung ausgelegt werden, die mit Schwachgas aus Deponien und später auch durch Pellets befeuert werden soll. Die Spezialität gegenüber den konventionellen Gasturbinen liegt darin, dass die Brennkammer bei Atmosphärendruck betrieben wird. Dies vereinfacht die Konstruktion erheblich. Im gewählten Konzept können beliebige Brennstoffe eingesetzt werden, also auch feste Brennstoffe biogenen Ursprungs oder Abfälle. Bei Brennstoffen mit stark verschmutzendem Rauchgas muss die Wärme über einen Wärmetauscher an das Kreislaufmedium übertragen werden, was wegen der limitierten Wandtemperaturen potenziell zu einer Wirkungsgradeinbusse führt im Vergleich zu heutigen grosstechnischen Gasturbinen. Die schnell laufenden Räder für Turbine und Verdichter sollen möglichst aus im Markt angebotenen kostengünstigen Turboladern gewählt werden.

Systemintegration

Das Projekt *MEU – Instruments innovants de planification et de management de systèmes énergétiques en zones urbaines* [23] untersucht die Systemintegration und -optimierung von Energiesystemen in grösseren Massstäben von Quartieren, Stadtteilen und Städten. Das Ziel ist, den Städteplanern ein Hilfsmittel für die Urbanisierung zur Verfügung zu stellen, das energetische, ökonomische und ökologische Kriterien einschliesst. Das Tool soll auch das Verhalten der verschiedenen Markt-Teilnehmer wie Verbraucher, Energieversorger und Verteiler modellieren und so auch Auswirkung von Lenkungeingriffen abschätzen können. Das Ende 2008 gestartete Projekt wird vom Foga mitfinanziert und konnte sich die substantielle Unterstützung der Städte La Chaux-de-Fonds, Lausanne, Martigny und Neuchâtel sichern. Es wird interessant sein, zu verfolgen, ob sich ein generalisiertes Konzept in grösseren urbanen Systemen effektiv durchsetzen lässt und wie das Konzept und dessen Auswirkungen mathematisch beschreibbar sind.

Kälte

Unser Lebensstandard verlangt neben Nutzwärme auch Nutzkälte. Insbesondere unsere heutige Lebensmittelversorgung wäre ohne Kälteanwendung nicht funktionsfähig. Kältemaschinen weisen die gleichen apparativen Komponenten auf wie Wärmepumpen. Neben den Kleingeräten wie Kühlschränken und Tiefkühltruhen, die in Grossserien hergestellt werden, werden die meisten Kälteanlagen jeweils speziell auf die vorliegenden Bedürfnisse abgestimmt und individuell

geplant und gebaut. In der Kälteversorgung wird die Zuverlässigkeit der Anlagen meistens höher gewichtet als die Energieeffizienz. Deshalb setzen sich energetische Vorteile nur sehr langsam durch, insbesondere dann, wenn dadurch die Anlagen komplizierter werden oder Einschränkungen für die Benutzer mit den Einsparungen verknüpft sind. Eine Frage, die seit langem kontrovers diskutiert wird, wird im Projekt *Wärmerückgewinnung*

(WRG) in der gewerblichen Kälte [24] untersucht. An zwei konkreten Kälteanlagen mit Normal- und Tiefkühlung (Plus- und Minus-Kälte) wird ein Betrieb mit WRG dem Betrieb ohne WRG in einer längeren Messperiode gegenüber gestellt. Die Inbetriebnahme der Messgeräte verlief nicht ohne Probleme, sodass endgültige Aussagen noch nicht gemacht werden können.

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 an einer Hochschule- oder Fachhochschule tätig sind, besteht zu diesen Institutionen eine besonders intensive Beziehung. Die Projektthemen wirken sich dabei auch auf den Unterricht aus, denn innerhalb der Projekte 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.

Interessierte Fachkreise werden durch Publikationen der Projektleiter und der laufenden Publikation der Ergebnisse auf den Internetseiten

- www.waermepumpe.ch und
 - www.energieforschung.ch
- orientiert.

Bei der Auflistung der Projekte wurde schon erwähnt, dass die vom BFE im Bereich Wärmepumpen, WKK und Kälte geförderten Projekte häufig auch von anderen Organisationen unterstützt werden. So engagiert sich der Foga (Energieforschungsfonds der schweizerischen Gasindustrie, www.erdgas.ch), der Axpo Naturstromfonds (www.axpo.ch), der Kanton Waadt, das Awel (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft) des Kantons Zürich, das Hochbauamt der Stadt Zürich und das Amt für Umwelt und Energie des Kantons Basel-Stadt an verschiedenen Forschungsprojekten.

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

Internationale Zusammenarbeit

Die Internationale Zusammenarbeit erfolgt vor allem durch eine aktive Mitarbeit im internationalen Normenwesen und im *Heat Pump Programme* der Internationalen Energieagentur (IEA). In einem Gemeinschaftsprojekt (IEA-HPP Annex 32) mit 10 Ländern stellt die Fachhochschule Nordwest-Schweiz (FHNW) den Operating Agent [14]. Vom 20.–22. Mai 2008 fand in Zürich die 9th *International IEA Heat Pump Conference* [36] erstmals in der Schweiz statt, die logistisch vom NOC (National Organizing Committee, Chair Dr.Th.Kopp (HSR/BFE), St.Peterhans (FWS) und F.Rognon (BFE)) organisiert wurde und die mit 450 Teilnehmern aus 32 Ländern ein grosser Erfolg war. Neben der Konferenz mit 9 Sessions mit 72 Vorträgen und 106 Posters wurden noch 7

Workshops zu aktuellen Themen der Wärmepumpenforschung angeboten. Die wissenschaftliche Programmgestaltung lag in den Händen des IOC (International Organizing Committee) mit seinem Chair, Dr. Rune Aarli aus Norwegen und den Regional Coordinators Dr. Monica Axell (Schweden), Gerry Groff (USA) und Makoto Tono (Japan). Die Schweiz konnte ihre Aktivitäten im Bereich Wärmepumpen prominent dem internationalen Publikum vorstellen: 10 Vorträge und 19 Posters stammten von Autoren aus der Schweiz. Die schweizerische Energiepolitik und der Stellenwert der Wärmepumpe wurden vom Direktor des BFE, Herrn Dr. W. Steinmann in der Eröffnungssession präsentiert. Der frühere Programmleiter unseres Programms, Herr Dr. M. Zogg stellte die Entwick-

lungsgeschichte der Wärmepumpe [37] vor. Die Industrie beteiligte sich namhaft in der Ausstellung und bei den technischen Exkursionen zu verschiedenen interessanten Anlagen im Grossraum Zürich und engagierte sich auch im Sponsoring. Die EHPA (European Heat Pump Association), die IIR (International Institut of Refrigeration)

und die ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) agierten als Co-Sponsors. Die meisten Länder des *IEA Heat Pump Programme* beteiligten sich als Country-Sponsors. Die nächste, 10. Konferenz wird im Jahr 2011 in Japan stattfinden.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Im Berichtsjahr wurden keine reinen P&D-Projekte in diesem Bereich unterstützt, da die Programmschwerpunkte nicht im Fokusbereich der P+D-Förderung des BFE lagen. Einige Projekte mit

Forschungscharakter konnten im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsprojekten unterstützt werden.

Bewertung 2008 und Ausblick 2009

Die 2008 abgeschlossenen Projekte zeigen alle interessante Resultate. Die Erwartungen wurden weit gehend erfüllt. Einige Projekt wurden verzögert, einerseits aufgrund von technischen und messtechnischen Schwierigkeiten, andererseits auch wegen des enormen Booms in der Wärmepumpen-Branche, der zur Folge hat, dass bei den industrienahen Personen die Abwicklung der laufenden Projekte Vorrang geniesst gegenüber den längerfristigen Forschungsprojekten. Die Ziele im CORE-Konzept werden beharrlich verfolgt. Das 4-Jahreskonzept 2008–2011 verfolgt weiter die wichtigen Ziele Steigerung der Effizienz und Systemintegration. Die Verbreitung der Wärmepumpe hat weiter zugenommen, sie ist v.a. bei neuen Wohnbauten zu einem Massengut geworden. Das wird u.a. durch die Tatsache verdeutlicht, dass ein Käufer heute die Möglichkeit hat, zwischen Preis und Effizienz selbst zu gewichten. Bessere Wärmepumpen sind teurer als einfache mit tieferen Leistungszahlen. Die Energieberater sind allerdings noch nicht überall so weit, dass sie diese Unterschiede den Käufern in der Beratung aufzeigen können, und viele Installateure sind durch Rabattsysteme an Produkte gebunden, was die Verbreitung energieeffizienter Systeme bremst.

Seitens der Programmleitung war die erfolgreiche 9. Internationale Wärmepumpen-Konferenz das Highlight im letzten Jahr. Mit einem kleinen, aber sehr effizienten NOC (National Organizing Com-

mittee) konnten wir erfolgreich eine grosse internationale Konferenz organisieren. Im NOC waren die Bereiche Forschung (Th. Kopp als Chairman), Markt und Industrie (St. Peterhans, Geschäftsführer der FWS) und BFE (Bereichsleiter F. Rognon) vertreten. Rückblickend war es essentiell, dass im NOC alle relevanten Kräfte (Forschung, Markt und BFE) vereint waren und dass die Zusammenarbeit sehr erfolgreich war. An dieser Stelle sei mit Anerkennung und Dank erwähnt, dass sich die Industrie und die Energiedienstleister aus dem In- und Ausland aktiv als Sponsoren an der Konferenz-Organisation beteiligt haben.

2008 haben verschiedene Vorgespräche stattgefunden für Projekte, die 2009 gestartet werden sollen. Erwähnenswert sind sicher ein grosses Projekt mit einem Grossserien-Hersteller zur Entwicklung eines neuartigen Kompressors sowie ein Projekt mit Firmen aus der Kältebranche zur Nutzung der Expansionsenergie bei den Kälteprozessen. Auch wird die Kombination Solarthermie und Wärmepumpen nicht immer optimal umgesetzt: hier müssen rasch verbesserte Planungsunterlagen erarbeitet werden, was im Rahmen eines neuen *IEA-SHC* Task geplant ist.

Am 24. Juni 2009 wird wiederum die nationale WP-Tagung in Burgdorf stattfinden, welche im Rahmen des Forschungsprogramms Wärmepumpen, WKK, Kälte organisiert wird.

Liste der F+E-Projekte

Unter www.bfe.admin.ch/forschung/waermepumpe (Rubrik Projekte) sind die Jahres- und Schlussberichte sowie weitere Informationen verfügbar.

[1] M. Kane¹, D. Creteigny¹, D. Favrat² (malick.kane@epfl.ch),
¹Eneftech Innovations SA, 1015 Lausanne und ²EPFL,

LENI Laboratoire d'énergétique industrielle, 1015 Lausanne: Projet HT Scroll – Nouveau système de cogénération à turbine spirale haute température (Jahresbericht Projekt 101'609).

[2] L. Gasser, B. Wellig, K. Hilfiker (beat.wellig@hslu.ch), Hochschule Luzern, CC Thermische Energiesysteme &

- Verfahrenstechnik, 6048 Horw: a) WEXA: Exergieanalyse zur Effizienzsteigerung von Luft/Wasser-Wärmepumpen (Schlussbericht April 2008, Projekt 101'543) b) WEXA: Exergy analysis for increasing the efficiency of air/water heat pumps (final report April 2008, project 101'543).
- [3] M. Albert, L. Gasser, B. Wellig (beat.wellig@hslu.ch), Hochschule Luzern, CC Thermische Energiesysteme & Verfahrenstechnik, 6048 Horw: Effiziente Luft/Wasser-Wärmepumpen durch kontinuierliche Leistungssteigerung (Jahresbericht Projekt 102'713).
- [4] L. Berlinger, M. Imholz, M. Albert, B. Wellig, K. Hilfiker (beat.wellig@hslu.ch), Hochschule Luzern, CC Thermische Energiesysteme & Verfahrenstechnik, 6048 Horw: LOREF: Luftkühler-Optimierung mit Reduktion von Eis- und Frostbildung – Optimierung des Lamellenluftkühlers/Verdampfers von Luft/Wasser-Wärmepumpen – Teil 1: Theoretische und experimentelle Untersuchungen (Schlussbericht April 2008, Projekt 100'059).
- [5] R. Sahinagic, L. Gasser, B. Wellig, K. Hilfiker (beat.wellig@hslu.ch), Hochschule Luzern, CC Thermische Energiesysteme & Verfahrenstechnik, 6048 Horw: LOREF: Luftkühler-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 April 2008, Projekt 100'059).
- [6] M. Nani¹, P. Hubacher² (marco.nani@ntb.ch), ¹Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs NTB, 9470 Buchs und ²Hubacher Engineering, 9232 Engelburg: Qualitätsprüfung von Kleinwärmepumpen mittels Norm und ausgewählten Feldmessungen – Effizienzsteigerung (Bestanlagen) und Langzeitverhalten (Schlussbericht Dezember 2007, Projekt 100'991).
- [7] P. Hubacher¹, M. Ehrbar² (he-ko@bluewin.ch), ¹Hubacher Engineering, 9232 Engelburg und ²Enertec AG, 7306 Sargans: a) Feldmonitoring und Analysen an Grosswärmepumpen – Phase 2 (Jahresbericht Projekt 100'917), b) Beurteilungstool für Grosswärmepumpen – Phase 2 (Jahresbericht Projekt 102'366) und c) Verbesserung der Jahresarbeitszahl durch witterungsgeführten Ladekreis (Schlussbericht Nov 2008, Projekt 101'705).
- [8] J. Demierre, D. Favrat, J. Jakubovski (jonathan.demierre@epfl.ch), EPFL, LENI Laboratoire d'énergie industrielle, 1015 Lausanne: Pompe à chaleur thermique à double cycle rankine (Jahresbericht Projekt 102'846).
- [9] A. Grüniger, B. Wellig (beat.wellig@hslu.ch), Hochschule Luzern, CC Thermische Energiesysteme & Verfahrenstechnik, 6048 Horw: CO₂-Erdwärmesonde – Phase 2 (Jahresbericht Projekt 102'247).
- [10] M. Friedl (Markus.Friedl@awtec.ch), awtec AG für Technologie und Innovation, 8050 Zürich: Exergieanalyse der Wärmepumpe im Schulhaus Limmat (Jahresbericht Projekt 102'624).
- [11] P. W. Egolf, A. Kitanovski, D. Vuarnoz, C. Gonin, T. Swinnen, P. Repetti, A. Orita, J.-L. Beney (Peter.egolf@heig-vd.ch), Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, 1401 Yverdon-les-Bains: Magnetische Wärmepumpe mit Erdwärme-Quelle – Optimierter Prototyp (Jahresbericht Projekt 100'873).
- [12] H. Mayer¹, H.R. Gabathuler¹, Th. Baumgartner² (gabathuler.ag@bluewin.ch), ¹Gabathuler AG, 8253 Diessenhofen und ²Baumgartner & Partner AG, 8600 Dübendorf: Warmwasserbereitung mit Wärmepumpe und sekundärseitiger Laderegelung – Messungen an einer Wärmepumpenanlage in Uttwil TG (Jahresbericht Projekt 101'494).
- [13] R. Dott, C. Wemhöner, Th. Afjei (thomas.afjei@fhnw.ch), Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie am Bau, 4132 Muttenz: SEK – Standardlösungen zum energie-effizienten Heizen und Kühlen mit Wärmepumpen (Jahresbericht Projekt 101'579).
- [14] C. Wemhöner, Th. Afjei (carsten.wemhöner@fhnw.ch), Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie am Bau, 4132 Muttenz: Operating Agent IEA HPP Annex 32 – Economical Heating and Cooling Systems for Low Energy Houses (Jahresbericht Projekt 101'579).
- [15] D. Mollet, R. Dott, Th. Afjei (thomas.afjei@fhnw.ch), Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie am Bau, 4132 Muttenz: IWB-Kundenzentrum Neubau Steinen – Erfolgskontrolle der erdgekoppelten Diffusions-Absorptions-Wärmepumpe zum Heizen und Kühlen (Jahresbericht Projekt 101'527).
- [16] S. Citherlet, J. Bony, B. Nguyen (stephane.citherlet@heig-vd.ch), HEIG-VD Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Laboratoire d'Energétique Solaire et de Physique du Bâtiment (LESBAT), 1401 Yverdon-les-Bains: SOL-PAC – Analyse des performances du couplage d'une pompe à chaleur avec une installation solaire thermique pour la rénovation (Schlussbericht Dez 2008, Projekt 102'321).
- [17] J. Marti¹, A. Witzig¹, A. Huber², M. Ochs² (joerg.marti@velasolaris.com), ¹Vela Solaris AG, 8400 Winterthur, ²Huber Energietechnik AG, 8032 Zürich: Simulation von Wärmepumpensystemen in Polysun 4 (Schlussbericht Okt 2008, Projekt 102'248).
- [18] St. Bertsch, M. Uhlmann (stefan.bertsch@ntb.ch), Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs NTB, 9470 Buchs: Dynamischer Wärmepumpentest – Phase 3 und 4 (Jahresbericht Projekt 102'073).
- [19] P. Hubacher¹, C. Bernal¹, M. Ehrbar² (he-ko@bluewin.ch), ¹Hubacher Engineering, 9032 Engelburg, ²Enertec AG, 7306 Sargans: QS-WP/QP: Qualitätsprüfung von Kleinwärmepumpen mittels Norm- und Feldmessungen (Schlussbericht September 2008, Projekt 100'454).
- [20] M. Nani (marco.nani@ntb.ch), Wärmepumpen-Testzentrum WPZ der Interstaatlichen Hochschule für Technik Buchs NTB, 9470 Buchs: Vertretung BFE im CEN und Vorsitz WG10 (Jahresbericht Projekt 101'510).
- [21] P. Soltic, D. Edenhauser, A. Winkler (patrik.soltic@empa.ch), EMPA, 8600 Dübendorf: Energetische Optimierung von Biogas-BHKW's (Schlussbericht Juli 2008, Projekt 102'322).
- [22] M. Schmid¹, J. Schiffmann², J. Borth³ (schmid@oeko-zentrum.ch), ¹Oekozentrum Langenbruck, 4438 Langenbruck, ²Fischer Engineering Solutions AG, 3360 Herzogenbuchsee und ³ZHAW Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften, 8400 Winterthur: Aactor !GT – Entwicklung einer inversen Gasturbine Aactor zur Nutzung erneuerbarer Energie und industrieller Abwärme, Phase 2 (Jahresbericht Projekt 102'820).
- [23] G. Cherix¹, M. Capezzali², (massimiliano.capezzali@epfl.ch), ¹CREM Centre de recherche énergétique et municipale, 1920 Martigny, ²EPFL Energy Center, 1015 Lausanne: MEU – Instruments innovants de planification et de management de systèmes énergétiques en zones urbaines (Jahresbericht Projekt 102'775).
- [24] M. Erb, St. Gutzwiller (markus.erb@eicher-pauli.ch), Dr. Eicher+Pauli AG, 4410 Liestal: Wärmerückgewinnung (WRG) in der gewerblichen Kälte (Jahresbericht Projekt 101'544).

Referenzen

- [25] Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2007, Bundesamt für Energie, Bern, 2008.
- [26] Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien Ausgabe 2007, Bundesamt für Energie, Bern, Oktober 2008.
- [27] F. Rognon: Rund um Wärmepumpen in 10 Fragen – Antworten für Laien und Interessierte über Wärmepumpen und deren Anwendungen, Bundesamt für Energie, Bern, August 2007.
- [28] Newsletter IEA Heat Pump Centre, (hpc@heatpumpcentre.org), S-501 15 Borås, Sweden.
- [29] J. Schiffmann: Integrated design, optimization and experimental investigation of a direct driven turbocompressor for domestic heat pumps, PhD thesis, EPFL, 2008.
- [30] E. Ochsner: Abwasserwärmepumpe mit Propan, aus Die Kälte und Klimatechnik 6, Verlag Alfons W. Gentner GmbH & Co. KG, D-70015 Stuttgart, 2006.
- [31] P. Renold: Sewage as an energy source, International Energy Agency (IEA) Heat Pump Conference 2008, Paper and Presentation 8.6, Zürich, May 20-22 2008.
- [32] P. W. Egolf, F. Gendre, A. Kitanovski, O. Sari, HEIG-VD Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud: Machbarkeitsstudie für magnetische Wärmepumpen: Anwendungen in der Schweiz, Bundesamt für Energie, Bern, Schlussbericht Projekt 100'873, 2006.
- [33] H. Mayer, H.R. Gabathuler, Th. Baumgartner, Gabathuler AG und Baumgartner & Partner AG: Warmwasserbereitung mit Wärmepumpe, Bundesamt für Energie, Bern, Schlussbericht Projekt 101'494, Juli 2007.
- [34] C. Wemhöner, R. Dott, Th. Afjei, D. Helfenfinger, P. Keller, R. Furter, Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie am Bau, 4132 Muttenz: Calculation method for the seasonal performance of heat pump compact units and validation, Bundesamt für Energie, Bern, Schlussbericht Projekt 100'238, 2006.
- [35] M. Erb, P. Hubacher, M. Ehrbar, Dr. Eicher+Pauli AG, 4410 Liestal: Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen FAWA 1996 – 2003, Bundesamt für Energie, Bern, Schlussbericht Projekt 100'064.
- [36] Conference Proceedings of the 9th International IEA Heat Pump Conference in Zürich (20-22 May 2008). Order from publication section at www.heatpumpcentre.org.
- [37] M. Zogg (mazo@zogg-engineering.ch), Verfahrens- und Energietechnik, 3414 Oberburg: Geschichte der Wärmepumpe – Schweizer Beiträge und internationale Meilensteine, Bundesamt für Energie, Bern, Schlussbericht Projekt 102'311, 2008.

Impressum

Juni 2009
 Bundesamt für Energie BFE
 CH-3003 Bern
 Druck: Ackermann Druck AG, Bern-Liebelfeld
 Bezug der Publikation: www.energieforschung.ch

Programmleiter

Prof. Dr. Thomas Kopp
 HSR Hochschule Rapperswil
 Oberseestrasse 10
 CH-8640 Rapperswil
tkopp@hsr.ch

Bereichsleiter

Andreas Eckmanns
 Bundesamt für Energie BFE
 CH-3003 Bern
andreas.eckmanns@bfe.admin.ch