

UMGEBUNGS- UND ABWÄRME, WÄRME-KRAFT-KOPPLUNG

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 2000

Martin Zogg

martin.zogg@bluewin.ch www.waermepumpe.ch/fe



Wärmepumpe für den Sanierungsmarkt

Funktionsmuster einer Wärmepumpe mit hohem Temperaturhub für die Sanierung bestehender Zentralheizungen auf dem Prüfstand. Aufnahme aus dem Projekt [23].

Programmschwerpunkte und Programmziele

Die Erzeugung von Niedertemperaturwärme für Raumheizung, Warmwasserbereitung und industrielle Prozesse benötigt über die Hälfte des gesamten Endenergiebedarfs der Schweiz. Dieses Forschungsprogramm will die Wissenslücken schliessen, um in Zukunft einen wesentlich **höheren Anteil der Niedertemperaturwärme aus Umgebungswärme** (Luft, Erdboden, Grund- und Oberflächenwasser) **oder aus Abwärme** gewinnen zu können. Durch die Kombination von Elektrowärmepumpen mit effizienten Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen oder modernen Kombikraftwerken aber auch mit fortgeschrittenen Absorptionswärmepumpen lassen sich gegenüber den üblichen Öl- und Gasheizkesseln **bereits heute 30% bis 50% an Brennstoffen einsparen** und damit die **CO₂-Emissionen** entsprechend **reduzieren** [36]. In Zukunft sind noch deutlich höhere Einsparungen möglich. Die Wärmepumpentechnologie in Kombination mit effizienter Stromproduktion hat deshalb nichts an Aktualität eingebüsst [33]. Zur Verbesserung der

Effizienz und der Betriebssicherheit und zur Reduktion der Kosten dieser Systeme sowie einer energieoptimalen Konzeption industrieller Prozesse wurden im Jahr 2000 die folgenden **Hauptziele** verfolgt:

- **Wärmepumpen für den Sanierungsmarkt:** Erarbeiten von Grundlagen zur Entwicklung einer kostengünstigen Wärmepumpe für hohe Temperaturhube.
- **Systemoptimierung:** Entwickeln neuer Methoden für die **Betriebsüberwachung**, das **Testen**, das **Optimieren** und das **Regeln** von Wärmepumpenheizungssystemen; Erarbeiten von **Standardschaltungen** für Wärmepumpenheizungssysteme bis 30 kW.
- **Prozessintegration:** Weiterentwickeln und Umsetzen der Methoden zur Reduktion des Energiebedarfs komplexer industrieller Prozesse.

Durchgeführte Forschungsarbeiten und erreichte Ergebnisse

WÄRMEPUMPEN

In der Schweiz wird bereits jeder dritte Neubau mit Wärmepumpen beheizt. Im wesentlich grösseren **Sanierungsmarkt** kommt es dagegen erst zu gelegentlichem Wärmepumpeneinsatz. Das Hauptgewicht der Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen wurde deshalb auf eine für den Sanierungsmarkt geeignete Wärmepumpe gelegt. Diese muss grosse Temperaturunterschiede zwischen der Wärmequelle und den Wärmebezügern mit hoher Effizienz bewältigen können. Sie muss auch bei tiefen Aussentemperaturen eine hohe Wärmeleistung aufweisen, um einen monovalenten Betrieb zu gewährleisten. Weiter muss die Überhitzung des Kältemittels im Kompressor begrenzt bleiben. Zur Erfüllung des BFE-Pflichtenhefts für die Entwicklung einer **Swiss Retrofit Heat Pump (SRHP)** wurden deshalb weitere Forschungsarbeiten durchgeführt. Im Rahmen einer Ausscheidung zur **SRHP** wurden vier Funktionsmuster eingereicht und im Sommer 2000 durch Messungen im Wärmepumpentestzentrum Töss geprüft und einer detaillierten Kostenanalyse unterzogen. Die im Rahmen des Projekts [23] entwickelte Versuchsanlage kam den Anforderungen des Bundesamts für Energie an eine Wärmepumpe für den Sanierungsmarkt am nächsten. Da sie einen deutlichen Entwicklungsschritt für Heizungssanierungen mit Wärmepumpen darstellt, wurde das Funktionsmuster von einer unabhängigen Jury einstimmig für die Felderprobung in der Heizsaison 00/01 ausgewählt [24]. Die anderen Teilnehmer an der Ausscheidung haben ebenfalls mit grossem Einsatz interessante Lösungen realisiert. Sie konnten aber leider für die Felderpro-

bung nicht berücksichtigt werden. Die Anforderungen an Wärmepumpen mit hohem Temperaturhub für die Heizungssanierung legen die Verwendung echt zweistufiger Wärmepumpenprozesse mit zwei Kompressoren und einem Kältemittelkreislauf nahe. Diese sind recht aufwendig und haben mit dem Problem der Schmierölverschiebung zwischen den Kompressoren zu kämpfen. Diesem Phänomen wird in [19] nachgegangen.

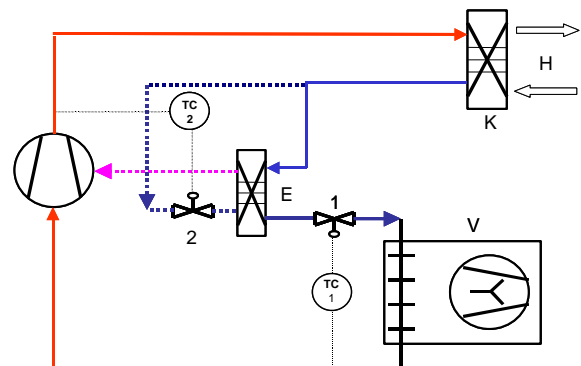


Bild 1: Wärmepumpenprozessvariante für grossen Temperaturhub mit Zwischendruckansaugung und Economizer E. H Wärmeabgabe an Heizung, K Kondensator, V Verdampfer mit Umgebungsluft als Wärmequelle, 1 Expansionsventil für Hauptstrom, 2 Expansionsventil für Nebenstrom.

Vorerst drängen sich einfachere Lösungen mit **einem Kompressor und Zwischendruckansaugung** auf: Bild 1. Diese vermögen die erwähnten Anforderungen an eine Wärmepumpe für den Kesslersatz ebenfalls zu erfüllen. Allerdings fehlt zurzeit auf dem Markt ein dafür optimierter Scrollkompressor.

Der Idee eines Wärmepumpenprozesses auf der Basis von Bild 1 wurde auf zwei parallelen Wegen nachgegangen. Kommerziell ist erst ein für das Einspritzen einer flüssigen Phase ausgelegter Scrollkompressor erhältlich. Eine Versuchswärmepumpe mit diesem Kompressor und R407C als Kältemittel zeigte gegenüber konventionellen einstufigen Wärmepumpenprozessen mit zunehmendem Temperaturhub trotzdem bereits wesentliche Verbesserungen [23]. Bei $-10^{\circ}\text{C} / 60^{\circ}\text{C}$ wurde bei geringfügig höherer Leistungszahl eine Erhöhung der Heizleistung um 15% und eine Reduktion der Verdichtungsendtemperatur um über 20°C gemessen.

Gefragt für den Wärmepumpenbetrieb im Sanierungsbereich ist ein Scrollverdichter, welcher bei thermodynamisch optimalem Zwischendruck höhere Zwischenansaugvolumenströme ermöglichen würde. In einem parallel durchgeführten Projekt [17] wurde ein Wärmepumpenprozess mit einem entsprechend für diesen Einsatz optimierten **Prototypen eines Scrollverdichters** untersucht. Dieser wurde ebenfalls mit R407C als Kältemittel und gegenüber dem Prozess im Bild 1 einem zusätzlichen Sauggasüberhitzer ausgestattet. Mit diesem neuen Scrollverdichter wurden durch die Zwischenansaugung bei hohen Temperaturhuben Erhöhungen der Leistungszahl um bis zu 15% und der Wärmeleistung um bis zu 30% erreicht (Werte für Luft -7°C , Wasser 60°C). Für den effizienteren Einsatz von Wärmepumpen im Sanierungsmarkt ist zu hoffen, dass dieser Verdichterprototyp bald Eingang in die Serieproduktion finden wird. Die Untersuchungen werden in einer weiteren Projektphase vertieft [18]. Dabei wird das Abtauen des Verdampfers optimiert und nach Vereinfachungsmöglichkeiten für den Prozess gesucht.

Der **Flügelzellenverdichter** ist für die Realisierung von Wärmepumpenprozessen mit Zwischenansaugung gemäss dem Bild 1 ebenfalls geeignet. Er könnte im Gegensatz zu Scrollverdichtern auch mit Drehzahlvariation in einem sehr weiten Bereich betrieben werden. Dies würde eine bessere Anpassung an den praktischen Wärmepumpenheizungsbetrieb ermöglichen. Ein vielversprechendes Baumuster aus dem Bereich der Transportkühlung wurde deshalb einer eingehenden experimentellen Analyse unterzogen [7]. Dabei ergaben sich zwischen den Messergebnissen und den Herstellerangaben erhebliche Unterschiede, denen in einer nächsten Projektetappe nachgegangen wird. Dabei soll die Schmierölabscheidung verbessert werden. Der in [7] untersuchte Flügelzellenverdichter wurde auch für das Vorhaben „**Kleinwärmepumpe mit Ammoniak** als Kältemittel“ [9] verwendet. Im Berichtsjahr konnte das Funktionsmuster trotz vieler

Hürden (Ölabscheidung, mangelhafte Informationen des Verdichterherstellers, Beschaffung kleiner ammoniakverträglicher Armaturen, Verschmutzung im Kältemittelkreislauf, Geschäftsleitungswechsel in der beteiligten Firma) erstmals bis zu $-15^{\circ}\text{C}/65^{\circ}\text{C}$ betrieben werden: Bild 2. Es erreichte bei $-16.5^{\circ}\text{C}/51.5^{\circ}\text{C}$ ohne Abzug der Pumpleistung für den Erdwärmesonden-Kreislauf den respektablen Gütegrad von 0.50. ($\text{COP} = 2.4$). In einer zweiten Projektetappe soll nun für den noch unbefriedigenden Ölkreislauf eine praxistaugliche Lösung gefunden werden. Weiter ist die ins Wärmepumpengehäuse integrierte Ammoniakfalle für den Leckagefall zu testen.



Bild 2: Funktionsmuster einer Kleinwärmepumpe mit Ammoniak als Kältemittel, aus [9].

Die **Abtauverluste** erreichen bei Luft/Wasser-Wärmepumpen 10% bis 15% des gesamten Bedarfs an elektrischer Energie. Verbesserungen bei den Abtaumethoden könnten somit wesentlich zum Anheben der Jahresarbeitszahl beitragen. Aus diesem Grund wird in einem weiteren Vorhaben [8] nach Verbesserungen des Abtauens von Verdampfern mit Luft als Wärmequelle gesucht. Bei Wärmepumpen erfolgt das Abtauen im Wesentlichen durch Prozessumkehr und durch Heissgasabtauung. In der ersten Phase des Projekts wurden die gängigen Abtaumethoden einer eingehenden Analyse unterzogen. Beide Abtauprozesse erweisen sich aufgrund einer detaillierten thermodynamischen Analyse zumindest bei höheren Temperatu-

ren auf der Wärmeabgabeseite als energetisch vergleichbar. Die indirekten Verluste bei der Prozessumkehr relativieren den allgemein postulierten energetischen Vorteil der Prozessumkehr gegenüber der Heissgasabtauung. Problematisch bei der Heissgasabtauung ist die geringe Heizleistung. Sie gewährleistet oft kein vollständiges Abtauen der ganzen Verdampferoberfläche, und Einflüsse der freien Konvektion der Umgebungsluft im Verdampfer können zu unliebsamen Überraschungen führen. Im Schlussbericht werden auch alternative Abtaumethoden angesprochen. Weiter werden die in der Praxis realisierten Strategien wie auch noch nicht erprobte Vorschläge zum Ein- und Ausleiten der Abtauung analysiert. In den nächsten Projektphasen ist für einen fundierten Vergleich gängiger Abtaumethoden die Analyse einer grossen Zahl ausgemessener Luft/Wasser-Wärmepumpen vorgesehen. Darauf aufbauend sollen Verbesserungen erarbeitet und getestet werden.

Die umfassende Ökobilanz zur **Umweltverträglichkeit von Kältemitteln** ([34], [36]) fand auch im Jahr

2000 grosses internationales Interesse [27]. Das natürliche Kältemittel CO₂ ist für Wärmepumpen ein auch bezüglich energetischer Effizienz interessantes Kältemittel, wenn die Wärme bei einer grossen Temperaturänderung des wärmeaufnehmendem Mediums abgegeben werden kann. Dies ist namentlich bei der Warmwasserbereitung der Fall, wo die Wassertemperatur in der Wärmepumpe von 10°C auf 50°C oder mehr erhöht werden muss. Für den Bau entsprechender Wärmepumpen fehlt bisher ein geeigneter Verdichter. In einem neuen Projekt [1] wird aus den Erfahrungen mit ähnlichen Hochdruckkleinkompressoren ein **ölfreier, semihertmetischer CO₂-Kompressor** für überkritische Wärmepumpprozesse mit grossen Temperaturhüben gebaut. Bei diesem treten Ansaugdrücke um 35 bar und Enddrücke um 80 bis 150 bar auf. Das elektrisch angetriebene Funktionsmuster wird eine elektrische Leistungsaufnahme von etwa 500 Watt aufweisen und wird im nächsten Jahr in einem geschlossenen Heissgasprozess getestet werden. Mit diesem Projekt beteiligen wir uns an einem Vorhaben der internationalen Energieagentur.

BLOCKHEIZKRAFTWERKE

Die Kombination von Blockheizkraftwerken mit Wärmepumpen ermöglicht Wärmeerzeugungsnutzungsgrade über 150%. Wunder Punkt bei den Blockheizkraftwerken ist die gemäss geltender Luftreinhalteverordnung (LRV 98) zugelassenen hohen Emissionen an Stickoxiden (Näheres in [36], Rubrik „Publikationen“). Aus diesem Grund wird vom Bundesamt für Energie seit 1995 die Entwicklung eines besonders schadstoffarmen Motors mit hohem mechanischem Wirkungsgrad unterstützt. Nun liegen mit einem neuen Konzept eines aufgeladenen Gasmotors mit Abgasrückführung gemäss dem Bild 3 sehr erfreuliche Resultate vor. Der als *SwissMotor* bezeichnete Motor eines schweizerischen Herstellers erreicht gegenüber konventionellen Motoren mit stöchiometrischem Betrieb einen um rund 20% höheren mechanischen Wirkungsgrad (über 40% im Leistungsbe- reich von 200 kW!), bei gleichem Hubvolumen um etwa 60% höhere Leistung und wesentlich tiefere

Emissionswerte. Nun konnte auch die Regelung zur automatischen Anpassung des Motorbetriebs und des Abgasnachbehandlungssystems an die Variation der Motorlast und der Erdgaszusammensetzung entwickelt und experimentell erfolgreich erprobt werden [15]. Nicht nur im stationären Betrieb sondern auch bei variabler Motorleistung wurden die Abgasemissionen deutlich unter die sehr strengen Grenzwerte für die Stadt Zürich gesenkt. In einer nächsten Phase dieses Vorhabens wird das Regelungskonzept auf das für den praktischen BHKW-Betrieb Notwendige vereinfacht. Es ist zu hoffen, dass die anschliessende Felderprobung dem weltrekordverdächtigen *SwissMotor* den Weg für den kommerziellen Einsatz in Blockheizkraftwerken mit höchsten elektrischen Wirkungsgraden und geringsten Emissionen ebnet wird. Damit wird ein neuer Stand der Technik erreicht und es wird dann Zeit, die Emissionsanforderungen nach der LRV 98 wieder auf jene der LRV 92 zu senken!

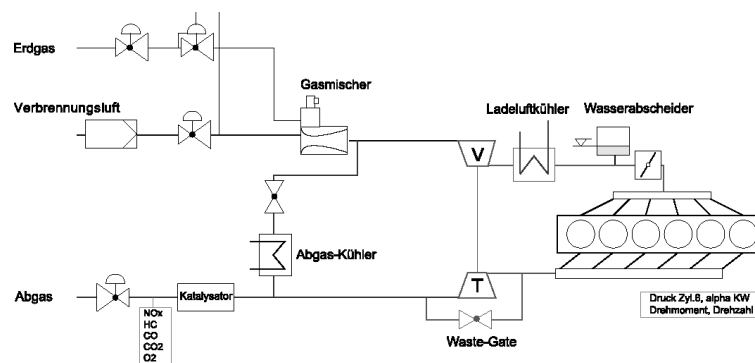


Bild 3: Versuchsanordnung zur Erprobung der Regelung des SwissMotors für Betrieb bei Teillast und variabler Erdgaszusammensetzung, aus [15].

SYSTEMOPTIMIERUNG

Ein gutes System ist nicht nur die Summe aller Komponenten. Bei Wärmepumpenheizungssystemen ist die Wechselwirkung zwischen Gebäude, Wärmeverteilungssystem, Wärmespeichersystem, Wärmepumpe und Wärmequelle offensichtlich. Gute Lösungen sind nur durch Einbezug des Gesamtsystems zu erzielen. Hier sind noch bedeutende Fortschritte möglich.

In einer neuen Studie [3] soll das Potenzial der Nutzung der in natürlichen **geologischen Schotterformationen** der Schweiz auf rund 10°C vorgewärmten Luft als Wärmequelle für Wärmepumpen geklärt werden. Die **BFE-Programme WPCalc und WKKcalc** zur Auslegung von Wärmepumpen- und BHKW-Heizungsanlagen sollen gründlich überarbeitet werden. In einem Vorprojekt [10] soll nach Lösungen zum Ersatz der bisherigen Tagesgangmethode für den Wärmebedarf des Gebäudes durch eine vereinfachte Gebäudesimulation gesucht werden. Die Programme könnten dann auch zur Beurteilung von Regelstrategien genutzt werden. Weiter soll aufgrund einer Benutzerumfrage ein Pflichtenheft für die neuen Programmversionen ausgearbeitet werden. Als Sofortmassnahme wird das in einem früheren BFE-Projekt entwickelte **Berechnungsmodul für Erdwärmesonden EWS** (Näheres in [36]) in das Programm *WPCalc* implementiert [22]. Aus Kostengründen kommt die Planung von Kleinwärmepumpenanlagen oft zu kurz. In einem neuen Vorhaben werden deshalb für Kleinwärmepumpenanlagen bis 30 kW Heizleistung **Standardschaltungen** mit einfachen Dimensionierungstabellen erarbeitet [6]. Dabei werden sowohl Neubauten (Vorlauftemperatur bis 45°C) wie auch Sanierungsobjekte (Vorlauftemperatur bis 60°C) und unterschiedliche Warmwasserbereitungsmethoden berücksichtigt. Auch die thermische Solarenergienutzung soll einbezogen werden.

Die Anpassung der Wärmeabgabe an den variablen Wärmeleistungsbedarf einer Wärmepumpenheizung erfolgt im Allgemeinen durch taktenden Betrieb der Wärmepumpe. Die durch das An- und Abstellen verursachte Abminderung der Nutzwärmeleistung gegenüber dem stationären Dauerbetrieb sind noch wenig erforscht. In der ersten Phase eines Forschungsprojekts zur Entwicklung von Messverfahren für den **dynamischen Wärmepumpentest** wurden die nach dem An- und Abstellen ablaufenden physikalischen Vorgänge erfasst, modelliert und durch Simulationsrechnungen nachgebildet [13]. Das gleichzeitig entwickelte mathematische Modell für den instationären Verlauf der Wärmepumpenleistung vermag die Abhängigkeit der Minderleistung von der Zykluszeit und der Einschaltzeit vergleichbar wiederzugeben. In einer kommenden zweiten Projektphase wird dieser Ansatz an einer Sole/Wasser- und an einer Luft/Wasser-Wärmepumpe erprobt und nötigenfalls modifiziert. Anschliessend wird ein möglichst einfach durchzuführendes Testprozedere ausgearbeitet.

Ziel des Forschungsvorhabens **Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen** ist es, die wichtigsten Kenngrößen von Wärmepumpenheizungssystemen aus möglichst wenigen, kostengünstigen Betriebsmessungen an installierten Anlagen in kurzer Zeit zu bestimmen. Damit soll eine bessere Betriebsoptimierung und Regelung sowie eine laufende Betriebsüberwachung erreicht werden. Für spätere Phasen ist die Umsetzung in die Praxis durch die Spezifikationen eines Einbausets für Wärmepumpen und eines Diagnosesets für den temporären Anschluss eines externen Computers für weitergehende Diagnosen geplant. Die in der 4. Projektphase entwickelte neue Methode *FuzzyWatch* zur Betriebsüberwachung von Wärmepumpen und Kältemaschinen bedarf einer weitergehenden experimentellen Erprobung. Zu diesem Zweck wird in der 5. Projektphase [14] ein dynamischer Wärmepumpenprüfstand gemäss **Bild 4** aufgebaut. Dieser erlaubt es, zu entdeckende Fehler in der Wärmepumpe aber auch im ganzen Wärmepumpenheizungssystem vorzutäuschen. Damit kann *FuzzyWatch* mit realen Wärmepumpen trainiert werden. Parallel dazu wird ein physikalisches Wärmepumpenmodell zum rechnerischen Trainieren der neuen Methode entwickelt und später am Prüfstand validiert. Der Prüfstand soll auch den Wärmebedarf des Gebäudes vortäuschen können und wird damit der Weiterentwicklung der Pulsbreitenmodulation dienen.

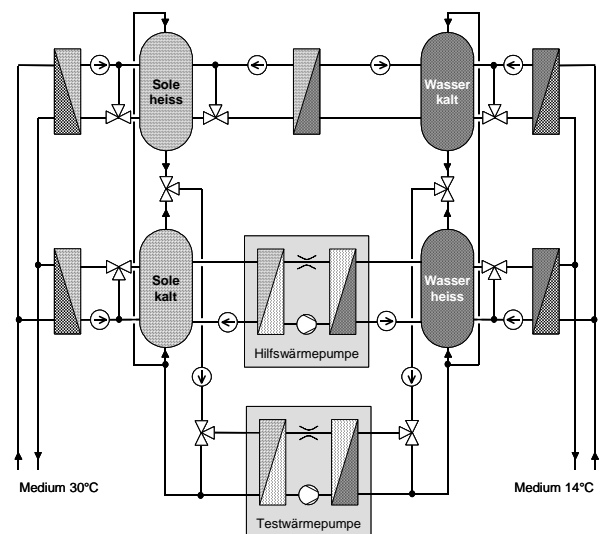


Bild 4: Fließbild des dynamischen Wärmepumpenprüfstands (aus [14]).

Die Phase 1 des Vorhabens „**Regelung von Wärmepumpen durch Pulsbreitenmodulation**“ zeigte die Vorteile dieses Konzepts (Näheres in [36]). In der zweiten Phase folgt eine Verfeinerung und weitere Erprobung sowohl des energiekenlinienbasierten wie auch des modellbasierten Ansatzes unter Beteiligung von zwei Industriepartnern [11]. Die für 2001 geplan-

ten Versuche mit entsprechenden Regelungsvarianten der Wärmepumpenheizung werden in einem Haus mit für eine Heizungssanierung typischen Charakteristik durchgeführt. Die Messungen dienen auch der Gewinnung eines realistischen Wärmebedarfs-Datensatzes des für spätere experimentelle Untersuchungen an dem im **Bild 4** gezeigten Prüfstand. Fernziel des Vorhabens ist eine Regelung, welche die massgebenden Einflussgruppen nach einer Inbetriebnahmephase selbst identifiziert und dann die Wärmepumpe automatisch mit diesen Parametern optimal regelt.

Bei **Niedrigenergiehäusern** (z.B. nach Minergiestandard) sinkt der Heizleistungsbedarf von Gebäuden auf rund die Hälfte konventioneller Bauten. Damit steigt der Wärmebedarfsanteil für die Warmwasserbereitung auf 30% bis 40% des gesamten Wärmebedarfs. Dies stellt neue Anforderungen an die Heizsysteme, die kostengünstig und mit möglichst geringer Umweltbelastung zu erreichen sind. Aufgrund der theoretischen Überlegungen und der Laborversuche in den Phasen 1 und 2 dieses Vorhabens wurden in der Phase 3 neue Niedrigenergiehäuser entsprechend ausgerüstet und in den Heizperioden 98/99 und 99/00 praktisch erprobt [4]. Die einfachen, speicherfreien Systeme nach **Bild 5** mit Fussbodenheizung ergaben die im **Bild 6** dargestellten mittleren Nutzungsgrade (Verhältnis der abgegebenen Wärme zur zugeführten elektrischen Energie). Bei der Beurteilung dieser Resultate ist zu beachten, dass es in erster Linie um die Tauglichkeit der vorgeschlagenen einfachen Konzepte ging. Eine Verbesserung der erreichten Nutzungsgrade ist durchaus noch möglich. Ein drittes Niedrigenergiehaus wurde mit Luft als Wärmeverteilungssystem ausgestattet. Dieses System verspricht zwar ein sehr interessantes Preis/Leistungsverhältnis. Es traten aber für eine abschliessende Bewertung noch zu viele Kinderkrankheiten auf.

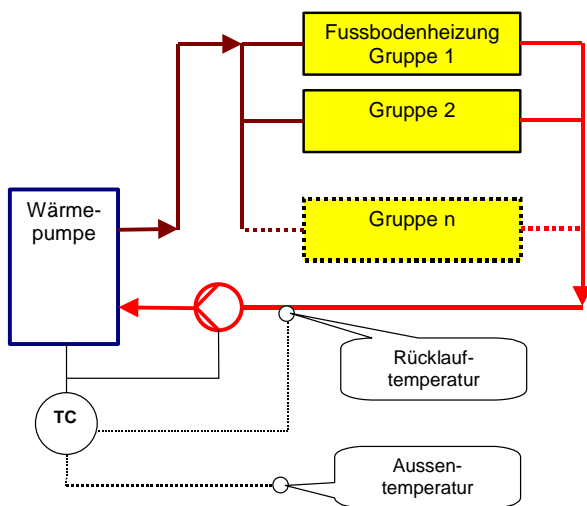


Bild 5: Einfache hydraulische Einbindung und Regelung einer Wärmepumpe mit Niedrigtemperatur-Fussbodenheizung.

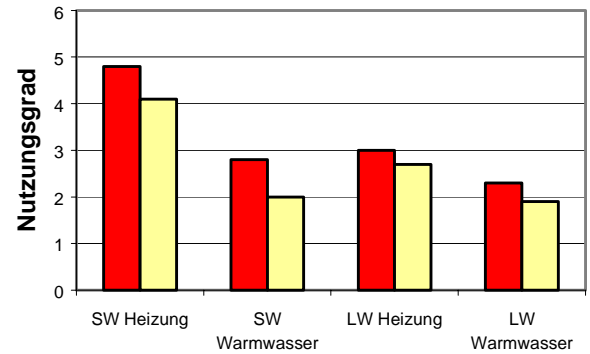


Bild 6: Vergleich der Nutzungsgrade der untersuchten Systeme für die Raumheizung und für die Warmwasserbereitung für Mai 1999 bis April 2000. Links: Wärmeerzeugung, rechts: nach Wärmeverteilung. SW: Erdwärmesonde als Wärmequelle, Warmwasserbereitung mit Beistellboiler, alternativ zur Heizung; LW: Umgebungsluft als Wärmequelle, Warmwasserbereitung mit separatem Wärmepumpenboiler.

Die Erkenntnisse dieses umfangreichen Forschungsprojekts zum Bau kostengünstiger Wärmepumpenheizungen für Niedrigenergiehäuser mit einem Jahresheizwärmebedarf für die Raumheizung unter $200 \text{ MJ/m}^2\text{a}$ (oder $55 \text{ kWh/m}^2\text{a}$) und hydraulischer Wärmeverteilung wurden in einem **technischen Handbuch** zusammengefasst [5]. Dieses dient insbesondere zur Auslegung von Wärmepumpenheizungen für Wohnbauten nach dem Minergiestandard. Das Handbuch gibt auch einen Ausblick auf Passivhäuser mit noch deutlich geringerem Jahresheizwärmebedarf [25], [26].

In der geschickten **Nutzung der Abwärme von Gewerbekälteanlagen** liegt ein erhebliches Energiesparpotenzial. Bei der Gewerbekälte (Kühlräume und Kühlmöbel in Gewerbebetrieben) fällt der Kältebedarf im Allgemeinen ganzjährig etwa konstant an. Der ausentemperaturabhängige Wärmebedarf zur Raumheizung besteht nur im Winter. Da im Sommer nur ein Wärmebedarf für die Warmwasserbereitung vorhanden ist, besteht ein Interesse einer saisonalen Speicherung der Abwärme der Kälteanlagen mit Erdwärmesondenfeldern. Dieses kann nach der Auskühlung im Winter auch zur direkten Raumkühlung genutzt werden. Je nachdem, ob ein Eintragsüberschuss (im Sommer) oder ein Entzugsüberschuss (im Winter) besteht, ist das Erdwärmesondenfeld für den Sommerbetrieb oder den Winterbetrieb zu dimensionieren. Das dazu einzuschlagende Vorgehen wird in einem Handbuch ausführlich zusammengestellt und an einem Beispiel aus der Praxis illustriert [12], [28], [29].

ABWÄRMENUTZUNG BEI PROZESSEN

Im Bereich der **Abwärmennutzung** bei industriellen Prozessen konzentrierten sich unsere Forschungsanstrengungen auf die in der Schweiz wichtigen Batch-Prozesse und die Lösungsmittelbewirtschaftung. Da-

mit energiesparende Massnahmen dort ergriffen werden, wo sie auch Wesentliches bringen, werden **Batch-Prozesse** anhand eines repräsentativen Beispiels aus der chemischen Industrie mit einem Jahresgesamtenergiebedarf über 20 GWh und Energiekosten über 1.75 Millionen Franken in einem neuen Vorhaben eingehend analysiert: Bild 7. Nach einer Vertiefung dieser Analysen ist eine Verallgemeinerung für Batch-Anlagen vorgesehen. Die energetische Konzeption und Optimierung von Wärmeübertragernetzwerken für Batch-Prozesse wird in [16] mit genetischen Algorithmen angegangen. Dabei werden sowohl die Fälle mit Wärmepufferspeichern wie auch jene mit direkter Wärmeübertragung ohne Speicher angegangen. Im Energiebedarf der chemischen Prozesstechnik spielen Lösungsmittel eine bedeutende Rolle. Die ak-

tuelle Situation der **Lösungsmittelbewirtschaftung in der chemisch-pharmazeutischen Industrie** der Schweiz wurde deshalb detailliert analysiert [20]. Die Verbrennung mit Abwärmenutzung von Abfalllösungsmitteln und die Wiedergewinnung durch Rektifikation sollen durch eine Ökobilanz verglichen werden. Dazu wird mit Daten aus einem grossen Industriebetrieb eine geeignete Methodik entwickelt. Toluol-Wasser dient als Referenzgemisch.

Erwähnt sei in diesem Zusammenhang auch, dass im Rahmen des im *IEA-Implementing Agreement on Process Integration* mit Unterstützung der Schweiz eine ausgezeichnete Einführung und Übersicht zur Prozessintegration verfasst wurde [30].

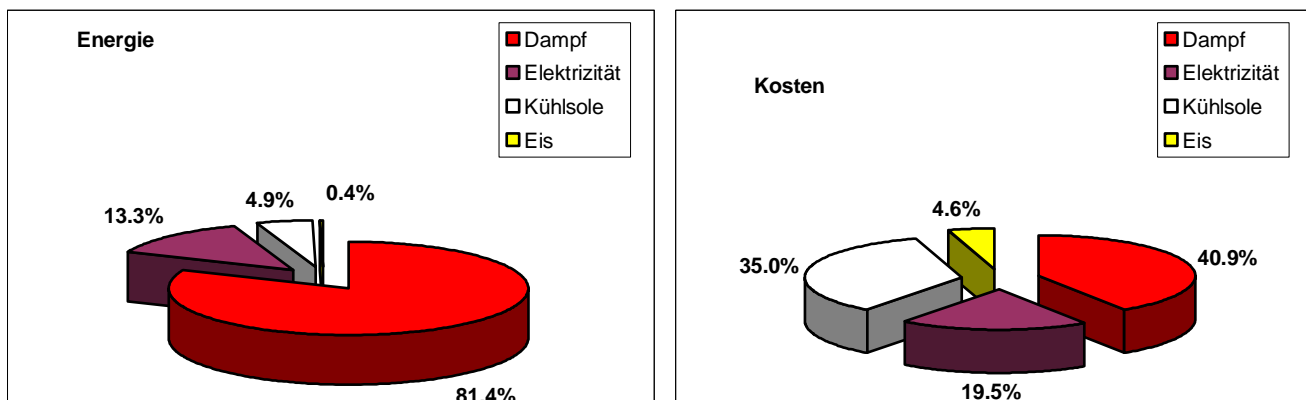


Bild 7: Erste Ergebnisse für die Energiebedarfs- und die Kostenstruktur in dem in [21] untersuchten Batch-Betrieb im Jahr 1999.

Nationale Zusammenarbeit

Die Aktivitäten des Energieforschungsfonds der Schweizerischen Gasindustrie *FOGA* wie auch des Forschungsfonds der Schweizerischen Erdölvereinigung *FEV* im Bereich der Wärme-Kraft-Kopplung erlaubte uns eine Konzentration der beschränkten Mittel auf den Wärmepumpenbereich. Mit dem *FOGA* und den *FEV* wurde die Reaktivierung der Weiterentwicklung der Diffusions-Absorptionswärmepumpe eingeleitet. Unsere Anstrengungen für eine thermodynamisch sinnvollere Erzeugung der Niedertemperaturwärme wird auch mit dem Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft *PSEL* koordiniert. Der *PSEL* unterstützte mit dem *BFE*, diversen nordostschweizerischen Elektrizitätswerken, dem Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke *VSE* und der *VEW Energie AG* in Dortmund die Qualitätssicherung von Wärmepumpen durch das **Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum Töss**. Dieses auch international anerkannte Prüfinstitut wird durch die Nordostschweizerischen Kraftwerke *NOK* und das Elektrizitätswerk der Stadt Zürich *EKZ* betrieben. In der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz *FWS* arbeiten das

BFE, Branchenverbände von Planern und Installateuren, Hersteller und Anbieter von Wärmepumpen, Elektrizitätswerke und Dienststellen von Kantonen zur Verbreitung zuverlässiger, effizienter und preiswerter Wärmepumpenheizungsanlagen zusammen. Das Gütesiegel für Wärmepumpen hat sich im Markt etabliert. Neu gegründet wurde eine Gütesiegelkommission für Erdwärmesonden. Zur Qualitätssicherung der ganzen Wärmepumpenheizungsanlage ist ein nationales Weiterbildungsmodul zum „Zertifizierten Wärmepumpen-Anlagenbauer“ in Vorbereitung. Dank den gemeinsamen Anstrengungen der erwähnten Institutionen wurden in der Schweiz im Jahr 2000 über ein Drittel aller Neubauten mit Wärmepumpen ausgerüstet und total über 7000 Wärmepumpen in Betrieb genommen. Die Anliegen der dezentralen Erzeugung elektrischer Energie in liberalisierten Märkten durch Wärme-Kraft-Kopplung werden durch den **WKK-Fachverband** wahrgenommen.

Internationale Zusammenarbeit

Die **internationale Zusammenarbeit** erfolgte auch im Jahr 2000 vorwiegend durch **bilaterale Kooperation** mit Nachbarländern und durch Mitarbeit in Projekten der **Internationalen Energieagentur IEA**. Zwischen der FWS und den entsprechenden Organisationen in Deutschland und Österreich finden regelmäßige Dreiländertreffen statt. Auch die *Electricité de France EdF* ist an unserer Wärmepumpentechnologie interessiert. Die FWS ist der *European Heat Pump Association EHPA* als assoziiertes Mitglied beigetreten. Die Schweiz wirkt auch in für die Weiterentwicklung der Wärmepumpentechnik wichtigen **internationalen Normengremien** mit und bringt dort ihre Erfahrungen bei der Herstellung und Prüfung von Wärmepumpen ein [2].

Im Rahmen der schweizerischen Beteiligung am **IEA Heat Pump Programme HPP** sind wir mit dem Vorhaben [1] am IEA-Projekt **Selected Issues on CO₂ as a Working Fluid in Compression Systems** (Annex 27) beteiligt. Die Schweiz hat auch aktiv an der Reorganisation des **IEA Heat Pump Centre** mitgewirkt (Annex 16). Nebst diesen IEA-Aktivitäten sichert das BFE die Mitgliedschaft der Schweiz an dem für die Forschung und Entwicklung in der Wärmepumpen- und Kältetechnik wichtigen **International Institute of Refrigeration IIR**. Im Bereich der Abwärmenutzung trat die Schweiz nach dem Abschluss der bereits erwähnten Einführung in die Prozessintegration [30] infolge zu geringem Interesses der Industrie und schleppender Realisierung neuer Vorhaben aus dem **IEA-Implementing Agreement on Process Integration** aus.

Transfer in die Praxis

Da an den meisten der ohnehin sehr anwendungsnahen Projektarbeiten private Firmen beteiligt sind, ist die **direkte Zusammenarbeit mit der Privatwirtschaft** sehr eng. Die im Jahr 2000 gemeinsam mit Hochschulen und privaten Firmen bearbeiteten Forschungsarbeiten sind **gute Grundlagen für die Entwicklung von Wärmepumpen für den Sanierungsmarkt** und dienen einer **besseren Auslegung** und einem **optimaleren Betrieb** von Wärmepumpenheizungssystemen. Die teilweise gemeinsam mit der chemischen Industrie durchgeführten Arbeiten zur Prozessintegration dienen der **Reduktion des Energiebedarfs komplexer chemischer Batch-Prozesse**. Mit den in der Fachpresse und in der **Internetseite** des Forschungsprogramms publizierten **Kurzfassungen** des Programmleiters [36] wird laufend auf die Resultate abgeschlossener Vorhaben hingewiesen. Entsprechend rege wird die Downloadmöglichkeit für die vollständigen Schlussberichte genutzt. Zahlreiche P+D-Projekte helfen, das in der Forschung Erarbeitete in zuverlässig funktionierende Anlagen umzusetzen. Der Umsetzung der Forschungsergebnisse diente auch die sehr gut besuchte **7. UAW-Tagung des Bundesamts für Energie** vom Mai 00 [31]. Sie zeigte anhand der laufenden Forschungsvorhaben das erhebliche Optimierungspoten-

zialer Wärmepumpenheizungssysteme mit Wärmequelle, Wärmepumpe, eventueller Wärmespeicherung, Wärmeverteilung, Gebäude und Regelung auf [32]. Aus den Forschungsprojekten [4], [5] und [12] wurde am Statusseminar des Zentrums für Energie- und Nachhaltigkeit im Bauwesen ZEN und aus [12] am Herbstkolloquium des Schweizerischen Vereins für Kältetechnik SVK berichtet.

Das auch vom BFE unterstützte **Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum Töss** leistet einen bedeutenden Beitrag zur Sicherung der Wärmepumpenqualität und zur Erhöhung der Effizienz der im Handel angebotenen Wärmepumpen. Die von der FWS organisierte **WP-Expo 2000** mit ergänzenden Workshops in Bern bot erneut eine ausgezeichnete Gelegenheit, einer grossen Besucherzahl die neueste Entwicklung der Wärmepumpentechnik (darunter auch ein Prototyp aus dem Projekt [24]) zu zeigen. Die FWS sorgt durch **Ausbildung** der entsprechenden Fachleute, **Beratung**, Verleihung und Weiterentwicklung des **Gütesiegels** sowie Herausgabe diverser **Dokumente** und Formulare für eine Erhöhung der Qualität der Wärmepumpentechnik.

Bewertung 2000 und Ausblick auf 2001

Die für das Jahr 2000 gesteckten Ziele konnten im Wesentlichen erreicht werden. Allerdings gab es auch dieses Jahr infolge unvorhergesehener Hindernisse einige Verzögerungen in den Terminplänen. Besonders gravierend wirkte sich der Mangel an geeigneten Projektassistenten an Fachhochschulen aus. So musste das Vorhaben [8] nach der Phase 1 auf unbestimmte Zeit unterbrochen werden.

Entsprechend dem **Konzept für die Jahre 2000 bis 2003** [35] dienen die für 2001 geplanten Forschungsarbeiten in erster Linie dem Schliessen von Wissenslücken zur Entwicklung einer effizienten und kostengünstigen Wärmepumpe für den Sanierungsmarkt. Ebenfalls hohe Priorität wird der Systemoptimierung beigemessen. Diese umfasst nebst Regelung, hydraulischer Schaltung, Abtaugung, automatischer Betriebsüberwachung und Erfassen des Anfahrver-

haltens auch eine gründliche Überarbeitung des BFE-Auslegungsprogramms für Wärmepumpenheizungen *WPCalc* und für Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen *WKKCalc*. Am 8.Mai 2001 führen wir in Burgdorf die

8. öffentliche UAW-Tagung mit dem Thema „Neue Wege zur Heizungssanierung mit Wärmepumpen“ durch. Programm und Anmeldung in [36].

Projets P+D
Fabrice Rognon, chef du programme P+D
OFEN, 3003 Berne

PROGRAMME P+D16, CHALEUR AMBIANTE (POMPES A CHALEUR)

Suite au coup de frein donné fin 1999, nous avons enregistré et accepté deux demandes nouvelles en 2000. Le mandat de recherche de sites pour l'implantation de pompes à chaleur utilisant la chaleur résiduelle des stations d'épuration des eaux porte ses fruits: 2 projets ont ainsi vu le jour en 2000. Malgré cela, le budget 2000 n'a pas pu être utilisé complètement car 3 gros projets ont malheureusement dû retarder le début des travaux, entraînant des reports financiers problématiques. Les projets ne sont heureusement pas compromis mais reporté d'une année. Outre 14 mandats, 22 installations se trouvent à des stades divers de réalisation. Une fois achevées, elles totaliseront 5'700kW thermiques et économiseront l'équivalent de 1'300 tonnes de mazout par an. Elles se répartissent de la manière suivante:

Répartition par sources de chaleur

Source de chaleur	Nombre
Air	5
Sondes géothermiques	3
Nappe phréatique	7
Eau de surface (rivière, lac)	2
Eau de STEP	5

Répartition par systèmes principaux

Système	Total	Avec réseau CAD	Avec réseau de source de chaleur
Air/eau monovalent	4	0	0
Air/eau avec appoint	1	1	0
Sol/eau monovalent	3	0	0
Eau/eau avec appoint	14	11	13
Eau/eau avec appoint et combinai-	2	2	0

son CCF et PAC			
----------------	--	--	--

CAD: chauffage à distance

CCF: couplage chaleur-force

Répartition par puissance thermique de la PAC et prix de revient de la chaleur

Puissance thermique de la PAC en kW	Total	Prix de revient chaleur en cts/kWh après subvention Mini / maxi
0 à 20	1	21 (projet pilote)
20 à 50	1	38 (sondes géo-thermiques avec recharge)
50' à 100	5	7 / 40 (dont 1 contracting)
100 à 500	6	9 / 18 (dont 2 contracting)
Plus de 500	5	6 / 15 (dont 4 contracting)

Attention: ces chiffres concernent des installations pilotes ou démonstration qui ne sont pas disponibles sur le marché. Ceci explique l'ampleur des fourchettes de prix et le niveau des maximas. Le contracting se multiplie dans les projets de grande puissances, là où les prix après subvention sont compétitifs. Dans ces cas, notre aide représente environ 25% des surcoûts et 5 à 18% de l'investissement total.

Les rapports suivants sont parus en 2000 et sont disponibles auprès d'ENET:

14166: Grundwasser-Wärmepumpenanlage Walperswilmatte in Aarberg/BE

12515: Le Vieux Manoir, Kältemaschinen als Wärmepumpen im Hotelbetrieb

10956: Centrale termica Morettina Locarno, rapporto d'esercizio

17884: Oberstufenzentrum Remisberg Kreuzlingen, Qualitätsplanung, Betriebsoptimierung Qualitätsprüfung, Wirtschaftlichkeit

14239: Grundwasser-Wärmepumpenanlage "Husrüti" in Münsingen, Erfolgskontrolle und Umsetzung

22203: Grosswärmepumpen, Kostenermittlung und Marktsituation

31544: Kälte- und Wärmeerzeugung mit Wärmepumpen und Erdwärmesonden im Restaurant Grauholz

Soulignons l'originalité des projets 12515 et 31544 qui combinent dans la même installation la production de chaleur et de froid. La planification de telles installations est désormais facilitée par le manuel élaboré dans le programme recherche [12]. Le potentiel d'application dans l'hôtellerie et la restauration est important.

A l'avenir, les priorités restent: la rénovation de chauffages existants, l'utilisation de fluides frigorigènes neutres pour l'environnement, l'amélioration du coefficient de performance et l'abaissement des coûts. La prospection pour des projets dans les STEP sera effectuée dès février 2001 dans le domaine infrastructures.

PROGRAMME P+D06, COUPLAGE CHALEUR-FORCE (SANS PILES À COMBUSTIBLE)

Durant l'année écoulée, nous avons enregistré 1 demande nouvelle qui, vu la complexité et l'ampleur du projet, est encore en discussion. Le mandat de recherche de sites d'implantation dans des STEP d'installations mini-cogénération (puissance électrique de quelques kW, rendement électrique inférieur à 30%) fonctionnant au biogaz a permis la réalisation de 2 installations en 2000. La prospection pour des projets dans les STEP sera effectuée dès février 2001 dans le domaine infrastructures.

Outre le mandat susmentionné, 3 des 4 projets en cours fonctionnent au biogaz ou au gaz de STEP. Sauf dans un cas, la chaleur est utilisée. Le rapport suivant est paru en 2000 et est disponible auprès de ENET:

Projet OFEN no. 23740: Cogénération par les groupes de secours, suivi, mesures et transfert du groupe de secours transformé en unité de cogénération aux Transports publics genevois TPG à Bachet de Pesay

Afin d'encourager l'utilisation de groupes chaleur-force en combinaison avec des pompes à chaleur, nous avons lancé une étude afin de mettre à la disposition des cantons un outil de planification de systèmes combinés CCF et PAC. Le rapport paraîtra mi-2001.

Les grandes lignes du programme n'ont pas changé vu la modestie du budget: priorité absolue est donnée aux projets pilotes et aux carburants renouvelables. Lors d'utilisation de combustibles fossiles, le rendement électrique doit être supérieur à 33%.

Liste der Forschungsprojekte

- [1] H. Baumann, BAUMANN ENGINEERING, Winterthur: *Ölfreier CO₂-Kleinkompressor* (JB) ENET 0037570, (WWW)
- [2] Th. Afjei, EUTACON, Zürich: *Internationale Zusammenarbeit in Normengremien* (SB) ENET 0036228
- [3] Ch. Dériaz, GEOTECHNIQUE APPLIQUEE DERIAZ SA, Carouge: *Chauffage et climatisation à l'aide de l'air de l'alluvion ancienne dénoyée* (JB) ENET 0037046, (WWW)
- [4] Th. Afjei, FH-Basel & W. Betschart, P. Keller, G. Zweifel, FH-Luzern & H.P. Geering, S. Ginsburg, E. Shafai, IMRT / ETH-Zürich & M. Bonvin, FH-Wallis & D. Wittwer, FWS, Zürich: *Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe, Phase 3: Test an Funktionsmustern* (SB) ENET 986187 (WWW)
- [5] Th. Afjei, FH-Basel & P. Keller, M. Dürig, G. Zweifel, FH-Luzern & A. Huber, P. Widmer, HUBER ENERGIE-TECHNIK, Zürich & E. Shafai, IMRT / ETH-Zürich & A. Bühring, FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME, D-79100 Freiburg: *Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe, Phase 4: Technisches Handbuch* (SB) ENET 9816187
- [6] Th. Afjei, FH-Basel & G. Zweifel, M. Achermann, FH-Luzern & H.R. Gabathuler, GABATHULER AG, Diessenhofen & P. Renaud, PLANAIR, La Sagne & M. Erb, H.P. Eicher, EICHER UND PAULI AG, Liestal: *Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen* (JB) ENET 0039172 (WWW)
- [7] A. Zingerli, M. Ehrbar, FH-Buchs: *Charakteristiken von Vielzellen- und Scrollkompressoren* (ZB, JB) ENET 9934443, (WWW)
- [8] B. Hubacher, M. Ehrbar, FH-Buchs: *Verbesserung des Abtauens bei luftbeaufschlagten Verdampfern, Phase I: Analyse gängiger Abtauverfahren* (SB) ENET 0036270, (WWW)

- [9] Th. Kopp, P.Frei, FH-Rapperswil & A. Flück, Th.Schmid, NEK-UMWELTECHNIK, Zürich & H. Albrecht, KAPAG, Zumikon: **Kleinwärmepumpe mit Ammoniak, Phase 2, Etappe 1: Funktionsmuster** (ZB) ENET 9719746; **Etappe 2: Ölkreislauf und Ammoniakfalle** (JB) ENET 9719746, (WWW)
- [10] G. Zweifel, FH-Luzern & M. Stalder, INGENIEURBÜRO, Hauptikon & E. Shafai, IMRT / ETH-Zürich: **Ausbau der Calc-Programme, Phase 1: Konzept und Gebäudesimulation** (JB) ENET 0038248, (WWW)
- [11] H.R. Gabathuler, H. Mayer, GABATHULER, Diessenhofen & E. Shafai, R. Wimmer, IMRT/ETH-Zürich: **Pulsweitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen, Phase 2** (JB) ENET 0038848, (WWW)
- [12] A. Huber, P. Widmer, HUBER ENERGIETECHNIK, Zürich & J. Good, INGENIEURBÜRO VERENUM, Zürich & D.Trüssel, KWT KÄLTE-WÄRME-TECHNIK AG, Belp & Ch. Schmid, SCHMID ENERGIETECHNIK, Winterthur: **Systemauslegung für Gewerbekälteanlagen mit Erdwärmenutzung** (JB) ENET 9933304
- [13] E. Shafai, D. Zogg, IMRT / ETH-Zürich & M. Ehrbar, L.Wirth, FH-Buchs: **Dynamischer Wärmepumpentest, Phase 1, Dynamischer Wärmepumpentest - Modellansatz für die prüftechnische Charakterisierung der Minderwärmeproduktion** (SB) ENET 9933684
- [14] D. Zogg, E.Shafai, IMRT / ETH-Zürich: **Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen - Phase 5** (JB) ENET 0037129, (WWW)
- [15] Ch. Nellen, K. Boulouchos, Ch. Schaer, Ch. Onder, LVV / ETH-Zürich: **Regelung des SwissMotors für den Einsatz in der Praxis** (SB) ENET 0039708, (WWW)
- [16] P. Krummenacher, D. Favrat LENI / EPF-Lausanne: **Intégration énergétique de procédés discontinus à l'aide d'algorithme génétique**, (JB) ENET 0038089 (WWW)
- [17] F.Brand, M.Zehnder, D.Favrat, LENI / EPF-Lausanne & H.U. Bruderer, H. Hohl, SATAG THERMOTECHNIK AG, Arbon: **Pompe à chaleur air-eau à haute température, phase 1: solution avec compresseur à injection vapeur** (SB) ENET 9934445 (WWW)
- [18] M.Zehnder, LENI / EPF-Lausanne & H.U. Bruderer, H. Hohl, SATAG THERMOTECHNIK AG, Arbon: **Pompe à chaleur air-eau à haute température, phase 2** (JB) ENET 0040071 (WWW)
- [19] M. Zehnder, D. Favrat, LENI / EPF-Lausanne: **Migration d'huile dans les pompes à chaleur** (ZB) ENET 9933683, (WWW)
- [20] Ch. Jahn, K.Hungerbühler LTC / ETH-Zürich: **Lösungsmittelbewirtschaftung in der chemischen Industrie** (ZB), (JB) ENET 9931269 (WWW)
- [21] P. S. Bieler, K. Hungerbühler LTC / ETH-Zürich: **Analyse und Modellierung des Energiebedarfs in Batch-Prozessen** (JB) ENET 0039592 (WWW)
- [22] M. Stalder, INGENIEURBÜRO, Hauptikon & A. Huber, HUBER ENERGIETECHNIK, Zürich & S. Albrecht, Albrecht Informatik, Winterthur: **Erweiterung des Programms WPCalc mit dem Erdwärmesondenmodul EWS** (JB) ENET 0039710, (WWW)
- [23] D. Trüssel, KÄLTE-WÄRME-TECHNIK, Belp & E. Zahnd, J. Cizmar, FH-Burgdorf & M.Zehnder, D. Favrat, LENI / EPF-Lausanne: **Wärmepumpe mit Zwischeneinspritzung bei Scrollkompressoren** (SB) ENET 9931783, (WWW)
- [24] D. Trüssel, KÄLTE-WÄRME-TECHNIK, Belp & E. Zahnd, J. Cizmar, FH-Burgdorf: **Feldmessung einer Retrofit Wärmepumpe** (JB) ENET 0039773 (WWW)

(JB) Jahresbericht 1999 vorhanden (ZB) Zwischenbericht vorhanden (SB) Schlussbericht vorhanden

(WWW) Download ab www.waermepumpe.ch/fe Rubrik *Berichte*

Referenzen

- [25] Th. Afjei: *Kostengünstige Wärmepumpenheizung für Niedrigenergiehäuser*, Bulletin SEV/VSE 91(2000)24, 11/14; tec21 1(2000)47, 17/20.
- [26] Th. Afjei, A.Huber: *Handbuch für kostengünstige Niedrigenergie- und Passivhäuser*, Tagungshandbuch 11. Schweizerisches Status-Seminar 2000, EMPA ZEN, 203/211.
- [27] R. Frischknecht: *Life Cycle Assessment for commercial refrigeration systems operated in Switzerland*. Preprints HeISIE Symposium on Industrial Ecology and Material Flows, 30.Aug.-3.Sept.00.
- [28] J. Good: *Kälte und Wärme aus einem System*, Gebäudetechnik 2(2000)3, 20/22.
- [29] A.Huber, P.Widmer: *Dimensionierung erdgekoppelter Kälte- und Wärmeerzeugungsanlagen mit dem Programm EWS*, Tagungshandbuch 11. Schweizerisches Status-Seminar 2000, EMPA ZEN, 179/184.
- [30] T. Gundersen: *A Process Integration Primer*. IEA Implementing Agreement on Process Integration, Trondheim 2000, ENET 9554740/4, *Download ab [36]*.
- [31] M. Zogg (Hrsg.): *Effizientere Wärmepumpenheizungen durch Optimieren des Gesamtsystems*, Tagungsband zur 7.UAW-Tagung vom 9.Mai 2000, Bundesamt für Energie 2000, *Download aller Beiträge ab [36]*.
- [32] M. Zogg: *Effizientere Wärmepumpenheizungen*, Heizung Klima 27(2000)3, 152/154,157/158; Bulletin SEV/VSE 91(2000)24, 15/19; *Download ab [36]*.
- [33] M. Zogg: *Niedertemperaturwärme aus Erdgas - Ökobilanz für effiziente Systeme*, Gas, Wasser, Abwasser 80(2000)2, 124/127; *Download ab [36]*.
- [34] M.Zogg: *Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel in Wärmepumpen*, KI Luft- und Kältetechnik 36(2000)4, 177/181; *Download ab [36]*.
- [35] M. Zogg, F. Rognon: *Konzept 2000/2003 für das F+E und das P+D-Programm im Bereich Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung*, Bundesamt für Energie 1999; M. Zogg: *Umgebungswärmenutzung, Wärme-Kraft-Kopplung*, Schweizer Ingenieur und Architekt, 117(99)47, 14/16; *Swiss research projects on heat pumps*, European Heat Pump News, 1(99)3, 5/8.
- [36] *Internetsite des Forschungsprogramms www.waermepumpe.ch/fe*. Rubrik „Berichte“: Download von Zusammenfassungen und der ausführlichen Schlussberichte durchgeführter Forschungsarbeiten, Rubrik „Publikationen“: Download von Publikationen des Programmleiters.