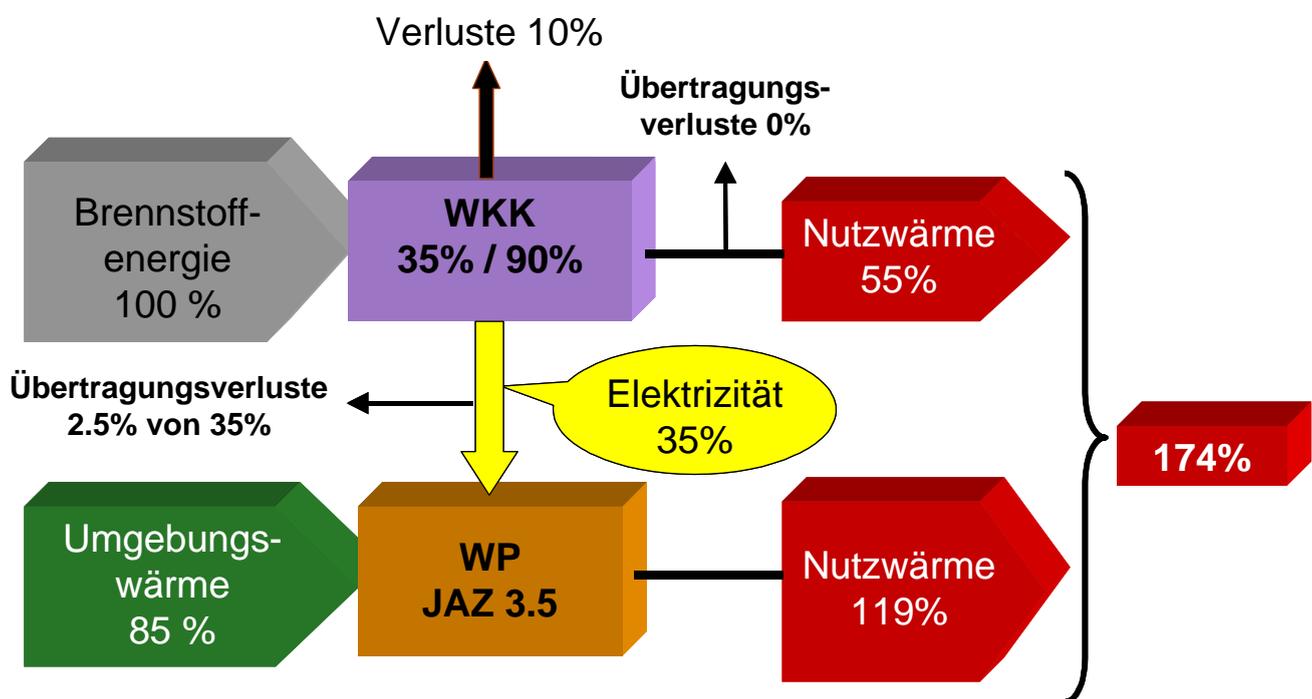


Jahresbericht 2002, 20. Dezember 2002

Programm Umgebungswärme, Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung Aktivitäten und Projekte 2002



Bundesamt für Energie BFE

Worbentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen · Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 · office@bfe.admin.ch · www.energie-schweiz.ch

ENET-Bestellnummer: 220230 · ENET, Egnacherstrasse 69, 9320 Arbon

UMGEBUNGSWÄRME, ABWÄRME, WÄRME-KRAFT-KOPPLUNG

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2002

Martin Zogg

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

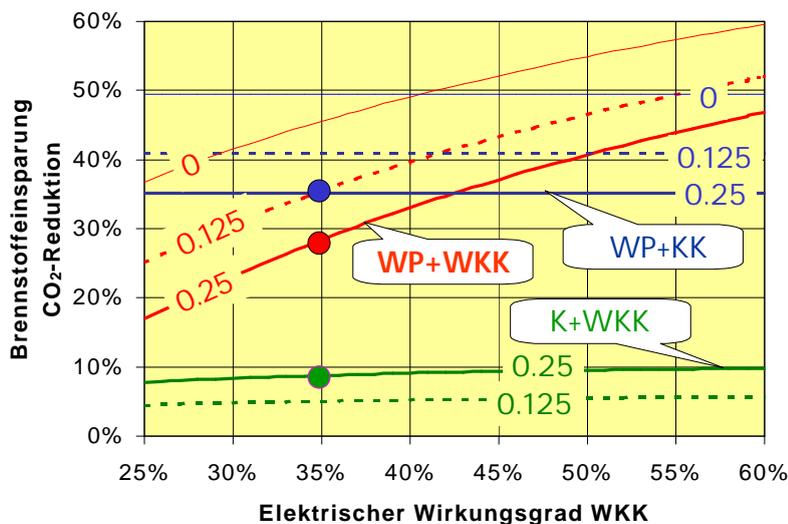


Swiss Retrofit Heat Pump

Vom BFE ausgezeichnete Wärmepumpe für den Heizkesslersatz mit integrierter Warmwasserbereitung der Firma KWT in Belp für grossen Temperaturhub bei geringem Leistungsabfall und hoher energetischer Effizienz.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele 2002

Wärme erreicht in der Schweiz einen Anteil von rund 75% der gesamten Nutzenergie. Rund 90% des Bedarfs an Niedertemperaturwärme (Raumheizung, Warmwasserbereitung etc.) werden aus fossilen Brennstoffen gedeckt. Im Bestreben, die Kohlendioxidproduktion wie auch die Schadstoffemissionen zu senken, ist der effizienten und emissionsarmen Erzeugung von Wärme aus flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen deshalb höchste Priorität einzuräumen. Wie in früheren Beiträgen (Download aus [33], Rubrik „Publikationen“) dargelegt wurde, lassen sich zur Erzeugung von Niedertemperaturwärme mit der Kombination von Wärmepumpen und Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WP+WKK) wie auch mit der Kombination von Wärmepumpen und Kombikraftwerken (WP+KK) gegenüber der noch üblichen Kesselheizung schon mit heute verfügbaren technischen Lösungen **30% bis 50% an Brennstoff einsparen**. Damit wird auch die **CO₂-Produktion entsprechend reduziert**. Wie in [23] ausführlich gezeigt wird, sind Wärmepumpen auch bei der zusätzlichen Erzeugung von elektrischem Strom mit WKK-Anlagen für eine effiziente Nutzung der Brennstoffenergie unentbehrlich. Für die Erzeugung von Wärme und Strom können die Komponenten Kessel (nur Wärme), Wärmepumpe (nur Wärme), WKK-Anlage (Wärme und Strom) und Kombikraftwerk (nur Strom) wie folgt kombiniert werden: Kessel und Kombikraftwerk (K+KK), Kessel und WKK-Anlage (K+WKK), Wärmepumpe und WKK-Anlage (WP+WKK) sowie Wärmepumpe und Kombikraftwerk (WP+KK). Die mit der Kombination WP+WKK erreichbare Reduktion des Brennstoffbedarfs (bzw. der CO₂-Produktion) ist in hohem Mass vom elektrischen Wirkungsgrad der WKK-Anlage abhängig: Figur 1. In diesem Bild werden die Verhältnisse sowohl für die reine Wärmeproduktion (Strom-Wärme-Verhältnis = 0) wie auch für den fiktiven Grenzfall eines vollständigen Ersatzes der schweizerischen Kernkraftwerke durch WKK-Anlagen (Grössenordnung für das Strom-Wärme-Verhältnis während der Heizsaison von 0.25) dargestellt.



Figur 1: Brennstoffeinsparungen und CO₂-Reduktion mit den Kombinationen Kessel + WKK-Anlage, Wärmepumpe + WKK-Anlage und Wärmepumpe + Kombikraftwerk gegenüber der Bezugsvariante Kessel + Kombikraftwerk. Kurvenparameter: Strom-Wärme-Verhältnisse 0 (reine Wärmeproduktion), 0.125 und 0.25. Berechnungsannahmen und Berechnungsbeispiele in [23].

Die Figur 1 verdeutlicht das wesentlich bessere Abschneiden der Varianten mit Wärmepumpen. Das Hauptgewicht der Forschungsanstrengungen lag deshalb erneut bei der Verbesserung und Erweiterung des Einsatzbereichs der Wärmepumpen. Im Jahr 2002 wurden die folgenden Hauptziele verfolgt:

- **Wärmepumpen für den Sanierungsmarkt:** Experimentelle Überprüfung der in den letzten Jahren erarbeiteten Grundlagen zur Entwicklung effizienter Wärmepumpen für Temperaturhübe bis 75 K.
- Verbesserung von Wärmepumpen mit **Umgebungsluft als Wärmequelle:** Reduktion der Abtauverluste und der Lärmemission.

- **Optimieren von Wärmepumpenheizungsanlagen:** Optimierte Standardschaltungen, neue Regelungskonzepte sowie neue Testmethoden für kombinierte Raumheizung und Warmwasserbereitung.
- **Blockheizkraftwerke:** Wirkungsgradverbesserung für Biogas und Potenzialabschätzung für einen unkonventionellen Stirlingmotor.
- Reduktion des Energiebedarfs **verfahrenstechnischer Prozesse**.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

WÄRMEPUMPEN

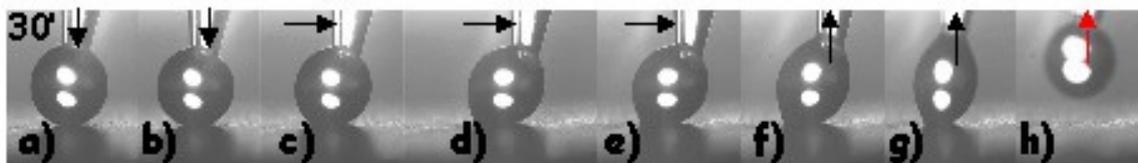
Um einen Durchbruch der Wärmepumpe auch als Ersatz bestehender Kesselheizungen zu erreichen, wurde das Hauptgewicht der Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen erneut auf **Wärmepumpen für den Sanierungsmarkt** (Retrofit-Wärmepumpe) gelegt. Diese müssen als Besonderheit grosse Temperaturunterschiede zwischen der Wärmequelle und den Wärmebezüglern mit geringem Wärmeleistungsabfall, tiefer Kompressoraustrittstemperatur und hoher Effizienz bewältigen. Dem Ziel der Erfüllung dieser hohen Anforderungen waren erneut mehrere Forschungsarbeiten gewidmet [24]. Das im Rahmen einer Ausschreibung zur *Swiss Retrofit Heat Pump (SRHP)* erstplatzierte Funktionsmuster wurde nach einer Verbesserung des Teilsystems zur Wärmeentnahme aus der Umgebungsluft [1] in der Heizsaison 2001/02 als Ölkesseleratz inklusive Warmwasserbereitung einer eingehenden Erprobung unterzogen [2]. Die Gebäude waren typische Altbauten mit Radiatorheizung und Vorlauftemperaturen um 60°C bei einer Aussentemperatur von -12°C. Aufgrund der guten Ergebnisse dieser detaillierten Feldtests zeichnete das BFE den Prototypen der Firma KWT in Belp als Gewinner der SRHP-Ausschreibung aus. Das BFE würdigte damit die innovative und wegweisende technische Lösung zur Raumheizung bei Vorlauftemperaturen bis 60°C mit Umgebungsluft als Wärmequelle, die thermodynamisch überzeugend integrierte Warmwasserbereitung sowie die vielversprechende neue Abtaumethode. Bei der Bildung einer gemeinsamen Produktions- und Vertriebsgesellschaft sind noch einige Hürden zu überwinden.

Auf der Basis früherer Forschungsarbeiten wurde eine weitere Variante einer **Retrofit-Wärmepumpe** mit konventioneller Wärmeentnahme aus der Umgebungsluft entwickelt [3], [25]. Auch diese beruht auf einer Economizerschaltung. Sie wurde aber mit einem speziell für das Zwischenansaugen von verdampftem Arbeitsmittel ausgelegten **Prototyp-Scrollkompressoren** ausgerüstet. Damit wurden deutlich höhere Leistungszahlen erreicht. Sie liegen im ganzen Einsatzbereich über den im SRHP-Pflichtenheft geforderten Minimalwerten. Für den effizienteren Einsatz von Wärmepumpen im Sanierungsmarkt ist zu hoffen, dass der untersuchte Prototypkompressor eines grossen ausländischen Herstellers bald in Serie produziert und damit auch für die SRHP zur Verfügung stehen wird. In einer zweiten Projektetappe wurde als interessante Alternative zur Zwischenansaugung mit Economizerschaltung das Potenzial einer **Boosterschaltung** untersucht. Bei dieser wird bei tiefen Aussentemperaturen und damit hohen Temperaturhuben ein zweiter Verdichter (Hilfsverdichter, Booster) in Serie zugeschaltet. Die Wärmeleistung wird damit um gut 60% erhöht. Dies allerdings bei einer Effizienz einbusse um rund 10%. Für diese interessante Lösung steht leider noch kein für den Wärmepumpeneinsatz geeigneter Hilfsverdichter zur Verfügung. Eine thermodynamisch noch bessere Lösung wären echt zweistufige Prozesse. Hier treten aber Probleme mit der Verlagerung des Schmieröls vom Kompressor der zweiten Stufe zum Kompressor der ersten Stufe auf. Nachdem erste Modellvorstellungen die beobachtete Tendenz bestätigen, wird das Phänomen der **Schmiermittelwanderung** experimentell untersucht [4]. Personelle Engpässe führten hier leider zu einer weiteren Verzögerung. Vollständig zu umgehen ist das Problem der Schmiermittelwanderung bei zweistufigen Wärmepumpen mit ölfrei arbeitenden Kompressoren. Eine Machbarkeitsstudie zeigte für eine neue Generation von **Wärmepumpen mit ölfreien, luftgelagerten Radialkompressoren** ein interessantes Potenzial, insbesondere auch im Sanierungsmarkt. Erste rechnerische Abschätzungen ergaben mit R134a als Arbeitsmittel eine bei hohen Temperaturhuben um rund 25% höhere energetische Effizienz als nach dem SRHP-

Pflichtenheft gefordert. Dies allerdings mit geometrischen Toleranzen von Laufrad, Gehäuse und Lagerung im Mikrometerbereich [5].

Im Hinblick auf den oft diskutierten Ausstieg aus den Fluorkohlenwasserstoffen ist Ammoniak als hervorragendes natürliches Arbeitsmittel von besonderem Interesse. Was bei grossen Kälteanlagen und Wärmepumpen längst Stand der Technik ist, fand bisher noch keinen Eingang in die Kleinwärmepumpentechnik. Mit dem in einer früheren Projektphase gebauten Funktionsmuster einer **Kleinwärmepumpe mit Ammoniak** werden nun umfassende Versuche zur Bestimmung der abgegebenen Wärmeleistung, der Leistungszahl, des Gütegrads und der Kompressoraustrittstemperatur durchgeführt. Die bisherigen Versuche [6] mit hohem Temperaturhub ergaben mit einem niedrig verdichtenden Flügelzellenverdichter Leistungszahlen, welche noch deutlich unter den Anforderungen des SRHP-Pflichtenhefts liegen. Die Messungen mit einem neuen Flügelzellenverdichter und mit einem Schraubenverdichter können infolge von Lieferantenverzögerungen und technischen Problemen erst im Jahr 2003 durchgeführt werden.

Über die Hälfte der neuen Kleinwärmepumpen mit Wärmeleistungen bis 25 kW nutzt Umgebungsluft als leicht zugängliche, unerschöpfliche Wärmequelle. Bei der Wärmeentnahme aus der Umgebungsluft kommt es aber bei Temperaturen unter etwa 4°C zur Eisbildung an den Wärmeübertrageroberflächen und damit zu einem Abfall der Effizienz. Die vereisten Wärmeübertrageroberflächen müssen deshalb von Zeit zu Zeit wieder abgetaut werden. Der dazu benötigte Energieaufwand ist mit einer Grössenordnung von 10% des Bedarfs an elektrischer Energie beträchtlich. Die energetischen und wirtschaftlichen Vor- und Nachteile der üblichen **Abtaumethoden** von Wärmepumpen mit Luft als Wärmequelle (Heissgasabtauung und Prozessumkehr) sowie von innovativen Abtaulösungen (Abtauen mit Heizungswasser, Luftabtauung) wurden deshalb in [7] eingehend untersucht. Das Einsparpotenzial ist hier noch beträchtlich. In einem anderen Ansatz wird versucht, die **Eisbildung zu verhindern** [8]. Dazu soll eine hydrophobe Beschichtung der Wärmeübertrageroberfläche deren Benetzung verhindern: Figur 2. Nach erfolgreichen Laborversuchen werden die Beschichtungen im kommenden Jahr auf einen handelsüblichen Lamellenverdampfer aufgebracht und dann unter realen Anström-, Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsbedingungen erprobt. Besonders in dicht besiedelten Gebieten haben Wärmepumpen mit Luft als Wärmequelle vereinzelt zu Beanstandungen der Lärmimmissionen geführt. Deshalb wurden die Lärmquellen von Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen eingehend analysiert: Figur 3. Auf der Grundlage dieser Analyse wurde ein umfassender Leitfaden für Hersteller und Planer zur **lärmmarmen konstruktiven Gestaltung** solcher Anlagen mit zahlreichen konkreten Massnahmen ausgearbeitet [9].



Figur 2: Wassertropfenbewegung auf einer Aluminiumoberfläche mit basischer Sol-Gel-Beschichtung (aus [8]).

Erdwärmesonden als weitere wichtige Wärmequelle für Wärmepumpen erfordern insbesondere bei grösseren Anlagen eine sorgfältige Auslegung. Das dazu im Auftrag des BFE entwickelte und im BFE-Simulationsprogramm WPCalc bereits implementierte **Programmmodul EWS** wurde deshalb überprüft [10]. Es zeigte sich, dass EWS trotz hoher Rechengeschwindigkeit die Entzugsleistung auch bei tiefen Erdwärmesonden gut wiederzugeben vermag. Anhand von Fallbeispielen wurde aufgezeigt, dass eine tiefe Erdwärmesonde (im Fallbeispiel 265 m) anstelle eines Erdwärmesondenfelds aus mehreren weniger tiefen Erdwärmesonden bei niedrigen Kosten um bis zu 7% höhere Jahresarbeitszahlen ergeben. **Abwasser** ist eine noch wenig genutzte Wärmequelle für Wärmepumpen. Bisherigen Erfolgen stehen auch einige Enttäuschungen gegenüber. Es bestehen noch zwei wesentliche Wissenslücken, nämlich die maximal zulässige Abkühlung und die Ursachen für die Biofilmbildung auf den

Oberflächen der Wärmeübertrager. Zunächst wurden in einem neuen Projekt [11] die Auswirkungen der Abwasserabkühlung auf die Wirkung von nachgeschalteten Kläranlagen (ARA) dargelegt und in einem Nomogramm dargestellt. In weiteren Projektetappen werden die zur Biofilmbildung führenden Mechanismen untersucht. Schliesslich sollen Massnahmen zur Bekämpfung der Biofilmbildung vorgeschlagen und in Pilotversuchen überprüft werden.



Figur 3: Messung der Strömungsgeräusche von Wetter-schutzgittern in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit (aus [9]).

SYSTEMOPTIMIERUNG

Der zu bewältigende Temperaturhub (Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Heizungskreislauf) ist von grossem Einfluss auf die Effizienz und die Wärmeleistung von Wärmepumpen. Um diesen stets möglichst klein zu halten, erfordern effiziente Wärmepumpenheizungssysteme eine besonders sorgfältige Auslegung, eine eingehende Betriebsoptimierung und eine gute Regelstrategie mit Einbezug der Wechselwirkungen zwischen Gebäude, Wärmeverteilungssystem, Wärmespeichersystem, Wärmepumpe und Wärmequelle voraus. Aus Kostengründen können **Kleinwärmepumpenanlagen** nicht mit Simulationsprogrammen dimensioniert werden. Deshalb wurden für Kleinwärmepumpenanlagen bis 30 kW Heizleistung für alle praxisrelevanten Anwendungsfälle optimierte **Standardschaltungen** ausgearbeitet [12], [27]. Nach einer Evaluation der häufigsten Schaltungen von Kleinwärmepumpenanlagen mit Heizleistungen bis 25 kW wurden in Zusammenarbeit mit bedeutenden Wärmepumpenanbietern sieben Schaltungen im Hinblick auf gute Praxistauglichkeit, hohe Energieeffizienz und hohe Zuverlässigkeit ausgewählt. Diese wurden mit Computersimulationen detailliert untersucht und optimiert. Das Ergebnis wird als Planungshilfe zur Auswahl der geeigneten Standardschaltung und zur vollständigen Dimensionierung einer Kleinwärmepumpenanlage dargestellt. Die neue Planungshilfe reduziert die bisher verwirrende Zahl von Schaltungen und führt mit einem minimalen Planungsaufwand zu effizienten, kostengünstigen und betriebssicheren Wärmepumpenheizungsanlagen. Es ist zu hoffen, dass die leicht anwendbare Planungshilfe rasch Eingang in die Praxis finden wird. Kunden von Anlagelieferanten sollten künftig nur noch diese BFE-Standardschaltungen zulassen und die vollständige Auslegung nach den erarbeiteten BFE-Planungshilfen verlangen.

Die Regelung von Wärmepumpen durch **Pulsbreitenmodulation** beruht auf einer laufenden Bestimmung des Wärmebedarfs eines Gebäudes und einer zeitoptimalen Zufuhr dieses Wärmebedarfs durch die Wärmepumpe. Dabei sollen die thermische Trägheit von Gebäude und Wärmeverteilungssystem sowie der Stromtarifzeiten geschickt genutzt werden. In der zweiten Projektphase [13] wurden handelsübliche Regler von zwei Industriepartnern mit den neuen Regelungsalgorithmen programmiert und in einem Sanierungsobjekt erprobt. Die Vorteile der in den letzten Jahren im Rahmen dieses Forschungsprogramms entwickelten Varianten der Pulsbreitenmodulation [28] gegenüber der konventionellen aussentemperaturgeführten Rücklaufregelung werden in der dritten Projektphase mit einem **dynamischen Wärmepumpenprüfstand** experimentell aufgezeigt [14]. Die Messungen erfolgen mit realen Reglern und realen Wärmepumpen. Das zeitlich variable Verhalten des Erdwärmesonden-

kreislaufs und des Wärmebedarfs unterschiedlicher Gebäudetypen wird am Prüfstand künstlich erzeugt. Momentan laufen die umfangreichen Vorbereitungsarbeiten am Prüfstand.

Wenn Wärmepumpen zur Raumheizung eingesetzt werden, sollten diese auch zur Warmwasserbereitung genutzt werden. Durch eine geschickte Kombination von Raumheizung und Warmwasserbereitung können beispielsweise die Überhitzung nach dem Kompressor für höhere Warmwassertemperaturen und die Unterkühlung nach dem Kondensator zur Gebrauchwasservorwärmung genutzt werden. Solche Lösungen werden durch die bisherigen Wärmepumpentests nicht honoriert. Deshalb wird in [15] nach einem neuen **Wärmepumpentest für die kombinierte Raumheizung und Warmwasseraufbereitung** gesucht. Ziel des Parallelvorhabens **Jahresnutzungsgrad von Wärmepumpenanlagen zur kombinierten Raumheizung und Warmwasserbereitung** [16] ist die Entwicklung einer anwenderfreundlichen und transparenten Rechenmethode zur Bestimmung des Jahresnutzungsgrads von kombinierten Heizungs-/Warmwasser-Wärmepumpen. Eine erste auf Summenhäufigkeiten beruhende Methode wurde bereits ausgearbeitet. Dieses Vorhaben dient auch als Vorbereitung für ein internationales Projekt (siehe unten). Zur Umsetzung der Ergebnisse dient eine aktive **Beteiligung in europäischen Normengremien** [17].

BLOCKHEIZKRAFTWERKE

Da bereits ein Überangebot der mit Blockheizkraftwerken produzierten elektrischen Energie gegenüber der von den Wärmepumpen konsumierten besteht, wurde die Weiterentwicklung der konventionellen BHKW-Technik mit Verbrennungsmotoren und fossilen Brennstoffen zurückgestellt. Eine Ausnahme bilden mit Biogas betriebene BHKWs. Ein Liebherr Sechszylinder-**Magermotor** wurde mit einer speziellen Zündvorkammer für den **Betrieb mit Biogas** optimiert [18], [29]. Das Entwicklungsziel eines signifikant höheren elektrischen Wirkungsgrads von 36% bei Einhalten der Emissionsgrenzwerte nach der gültigen LRV ohne Abgasnachbehandlung wurde in Laborversuchen erreicht. Im nächsten Jahr soll der Motor an einer Biogasproduktionsanlage im Dauerbetrieb getestet werden. Anstelle von Verbrennungsmotoren mit innerer Verbrennung werden insbesondere zum Betrieb mit Biogas immer wieder neue Varianten von Stirling-Motoren vorgeschlagen. In diesem Umfeld wurde eine Potenzialstudie für einen **langsam laufenden Stirlingmotor** mit einem über eine Hydraulik unabhängig bewegten Arbeits- und Verdrängerkolben durchgeführt [19]. Das Ergebnis ist wenig ermutigend. Insbesondere das Problem einer wartungsfreien, trocken laufenden Kolbendichtung bei Differenzdrücken von 80 bar scheint mit vertretbarem Aufwand kaum lösbar. An diesem Problem scheiterte bei wesentlich tieferen Differenzdrücken schon so manches Stirlingkonzept. Eine weitere Realisierungshürde ist die enorme Kopfbelastung.

VERFAHRENSTECHNISCHE PROZESSE

Mit dem Ziel einer rationelleren Energienutzung in verfahrenstechnischen Prozessen konzentrierten sich unsere Forschungsbemühungen auf die in der chemischen Industrie der Schweiz wichtigen Batch-Prozesse, die Lösungsmittelbewirtschaftung und die energetische Prozessintegration. Energiesparende Massnahmen haben nur dort eine Realisierungschance, wo sie auch Wesentliches bringen. Deshalb wird der **Energiebedarf von Batch-Prozessen** in Mehrprodukt-Produktionsanlagen der Spezialitätenchemie mit umfangreichen Messungen analysiert [20]. Dabei wurde ein verblüffend hoher Energiebedarf für die Raumheizung von 10 bis 25% des Gesamtdampfverbrauchs festgestellt. Bei der elektrischen Energie ergab sich ein produktionsunabhängiger Grundbedarf um 50% des Gesamtbedarfs. Gegenwärtig werden die Anteile einzelner Grundoperationen am Gesamtprozessenergiebedarf ermittelt. Anschliessend soll eine Methode zur Abschätzung des Energiebedarfs von Prozessvarianten entwickelt werden. Die chemische Industrie verbraucht jährlich allein in Europa etwa 4 Millionen Tonnen (davon ca. 10% in der Schweiz) an **Lösungsmitteln**. Damit ist ein erheblicher Energiebedarf und eine hohe Belastung der Umwelt verbunden. Die Frage, ob es ökologisch sinnvoller ist, Abfalllösungsmittel der chemischen Industrie zu verbrennen oder durch Rektifikation wiederzugewinnen, wurde anhand von fünf Lösungsmittel-Referenzgemischen mit einer detaillierten Ökobilanz untersucht [21]. Das Ergebnis zeigt, dass die **Rektifikation** einer **Verbrennung** vorzuziehen ist, wenn die Herstellung des Lösungsmittels mit einer grossen Umweltbelastung verbunden ist und sich die Komponenten des

Lösungsmittelgemischs durch Rektifikation leicht trennen lassen (grosse Dampfdruckunterschiede). Schliesslich wurde das im Auftrag des BFE entwickelte **PC-Programm PinchLENI** zur energetischen Integration kontinuierlicher Prozesse überarbeitet [22]. PinchLENI eignet sich sowohl für die Ausbildung wie auch für den praktischen Einsatz zur energetisch optimalen Auslegung einfacherer verfahrenstechnischer Prozesse nach der Pinch-Methode. Die aktuelle Version 3.0 kann gratis ab der Internetadresse <http://leniwww.epfl.ch> heruntergeladen werden.

Nationale Zusammenarbeit

Da an den meisten der ohnehin sehr anwendungsnahen Projektarbeiten private Firmen beteiligt sind, ist eine direkte Zusammenarbeit mit der **Privatwirtschaft** selbstverständlich. Sie reicht je nach Anwendungsnähe von einer Beteiligung in entsprechenden Projektbegleitgruppen bis zur Übernahme erheblicher finanzieller Beiträge. Interessierte Kreise werden durch Übersichten des Programmleiters in der Fachpresse und eine laufende Publikation der Forschungsergebnisse in der rege benutzten Internetseite des Programms [33] orientiert. Ein **Workshop an der ETH-Zürich** stellte die Ergebnisse des im Vorjahr abgeschlossenen Vorhabens „Betriebsüberwachung in Wärmepumpen und Kältemaschinen“ zur Diskussion. Die Resultate des Vorhabens Standardschaltung [12] wurden im Rahmen eines weiteren **Workshops an der FH Muttenz** mit den interessierten Anbietern von Wärmepumpen besprochen. Sie fliessen bereits in die PENTA-Haustechnikurse des BFE (www.pentaproject.ch) ein. Die in [9] erarbeiteten Massnahmen zur Lärmreduktion bei Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen wurden bereits in **FWS-Kursen** vorgestellt. Studenten von Bau- und Architekturabteilungen an **Fachhochschulen** wurden in die Wärmepumpentechnik eingeführt [30]. Die Resultate dieses Programms fanden auch Eingang in den von EnergieSchweiz geförderten **Kurs Umweltenergie** des SVK (Schweizerischer Verein für Kältetechnik). Die zur Tradition gewordene **Jahrestagung an der FH Burgdorf** orientierte diesmal im Rahmen des P+D-Programms über aktuelle Fragen zu grossen Wärmepumpen mit Heizleistungen über 100 kW [33].

Die gute Zusammenarbeit mit dem Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft **PSEL** für eine effizientere Niedertemperaturwärmeerzeugung wurde durch die beiden gemeinsamen Projekte [5] und [10] fortgesetzt. Der PSEL unterstützte mit dem BFE, der Axpo und dem Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke VSE die Qualitätssicherung von Wärmepumpen durch das **Wärmepumpentestzentrum Töss**. Mit dem Energieforschungsfonds der schweizerischen Gasindustrie **FOGA** und dem Forschungsfonds der schweizerischen Erdölvereinigung **FEV** wurde die Reaktivierung der Weiterentwicklung der Diffusions-Absorptionswärmepumpe koordiniert. Die Aktivitäten des FOGA, des PSEL wie auch des FEV im Bereich der Wärme-Kraft-Kopplung erleichterten uns eine Konzentration der beschränkten Mittel auf die Weiterentwicklung der Wärmepumpentechnik. In der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz **FWS** arbeiten das BFE, Branchenverbände von Planern und Installateuren, Herstellern und Anbietern von Wärmepumpen, Elektrizitätswerke und Dienststellen von Kantonen zur Verbreitung zuverlässiger, effizienter und preiswerter Wärmepumpenheizungsanlagen zusammen. Nach dem bewährten **Gütesiegel** für Wärmepumpen hat sich nun auch das Gütesiegel für Erdwärmesonden etabliert. Es konnte bereits an acht Bohrfirmen mit einem Gesamtmarktanteil von 80% vergeben werden. In der Schweiz werden heute gegen 40% aller Neubauten mit Wärmepumpen ausgerüstet. Zu diesem Erfolg haben die gemeinsamen Anstrengungen von BFE, FWS und PSEL wesentlich beigetragen. Die Anliegen der dezentralen Erzeugung elektrischer Energie durch Wärme-Kraft-Kopplung werden durch den **WKK-Fachverband** wahrgenommen.

Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit erfolgte auch im Jahr 2002 vorwiegend durch **bilaterale Kooperation** mit Nachbarländern, die Mitwirkung in für die Wärmepumpentechnik wichtigen europäischen Normengremien und durch die Mitarbeit in Projekten der Internationalen Energieagentur IEA. Die FWS

ist assoziiertes Mitglied der **European Heat Pump Association EHPA** und hat an der Eingabe für das EU-SAVE-Projekt „European Heat-Pump Installer Training Program,“ aktiv mitgearbeitet. Im Rahmen der schweizerischen Beteiligung am **IEA Heat Pump Programme HPP** hat die Schweiz ans Projekt Selected Issues on CO₂ as a Working Fluid in Compression Systems (Annex 27) einen bedeutenden Beitrag [26] geleistet. Im Berichtsjahr konnte durch die Schweiz ein neues IEA-Projekt (Annex 28) zum **Testen von Wärmepumpen zur kombinierten Raumheizung und Warmwasserbereitung** gestartet werden. Im Rahmen der Vorbereitungsarbeiten dazu wurde in der Schweiz ein Expertentreffen durchgeführt. Neben der Schweiz beteiligen sich bisher am neuen Projekt Österreich, Frankreich, Norwegen, die USA und Kanada. Schweden, Deutschland und Japan werden mit grosser Wahrscheinlichkeit ebenfalls mitwirken. Die Schweiz wird die Leitung des Vorhabens übernehmen. Die siebte **Internationale Wärmepumpenkonferenz** in Peking war eine ausgezeichnete Gelegenheit, unsere Forschungsanstrengungen [24], [25], [28] und [32] international vorzustellen und zu diskutieren. Auch der im letzten Jahr im Rahmen des Annex 27 entwickelte ölfreie Kleinkolbenkompressor für Kohlendioxid fand grosses internationales Interesse [26]. 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**. Der Besuch der Delegation des Heat Pump & Thermal Storage Technology Center of Japan in der Schweiz förderte die Tätigkeiten von schweizerischen Firmen zur Realisierung von Erdwärmesonden als Wärmequelle für Wärmepumpen in **Japan**. Die Internetsite des Forschungsprogramms [33] findet mit über 90% der Zugriffe aus dem Ausland auch international grosse Beachtung.

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

Die im Konzept 2000/2003 für das Jahr 2002 anvisierten Ziele konnten im Wesentlichen erreicht werden. Die gemeinsam mit Hochschulen und privaten Firmen bearbeiteten Forschungsarbeiten wiesen den Weg zu einer **neuen Generation von Wärmepumpen** für den Sanierungsmarkt [1], [2], [3], [5], [6], [24], [25]. Sie brachten bei der **Optimierung von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen** auch beachtliche Fortschritte auf dem Weg zur einer einfachen und doch effizienten und zuverlässigen Auslegung von Kleinwärmepumpenanlagen bis 30 kW [12] und zu einer optimaleren Regelung von Wärmepumpenheizungssystemen [13], [14]. Wichtige Grundlagen konnten für eine **verbesserte Nutzung von Umgebungsluft** [1], [7], [8], [9] und von Erdwärmesonden [10] als Wärmequellen erarbeitet werden. Die im Bereich **verfahrenstechnischer Prozesse** gemeinsam mit der chemischen Industrie durchgeführten Arbeiten lieferten wertvolle Erkenntnisse zur Reduktion des Energiebedarfs komplexer chemischer Prozesse [20], [21]. Zahlreiche P+D-Projekte helfen, das in der Forschung Erarbeitete in zuverlässig funktionierende Anlagen umzusetzen.

Bei der Umsetzung der im Rahmen des Forschungsprogramms entwickelten **neuen Wärmepumpengeneration** für den Sanierungsmarkt SRHP konnte die gemeinsame Produktion durch schweizerische Hersteller leider noch nicht realisiert werden. Auch in einer vielversprechenden Weiterentwicklung einer erdgasbetriebenen Diffusionsabsorptionswärmepumpe gab es Rückschläge. Wir hoffen im Jahr **2003** in beiden Fällen weiterzukommen. Weiter sollen 2003 Entscheidungsgrundlagen für weitere Aktivitäten bei Wärmepumpen mit Ammoniak als Kältemittel [6] und Oberflächenbeschichtungen für die Vermeidung der Verdampfervereisung [8] vorliegen. Die Vorarbeiten zum **Wärmepumpentest für kombinierte Raumheizung und Warmwasserbereitung** [15], [16] dienen als gute Basis für eine zielgerichtete Leitung des im Jahr 2003 startenden internationalen Projekts im Rahmen der IEA (IEA HPP Annex 28). Aufbauend auf den Standardschaltungen für Kleinanlagen [12] sollen auch für grössere Wärmepumpenanlagen **Standardschaltungen** ausgesucht und optimiert werden. Bei den restlichen Vorhaben stehen Abschluss und Umsetzung im Vordergrund. **Neu** sind Projekte zur Verbesserung der Teilsysteme zur Nutzung von Umgebungsluft als Wärmequelle, zu Erdwärmesonden mit Kohlendioxid als Wärmeträger, zum optimalen Wärmeträgervolumenstrom in Erdwärmesonden und zur Entwicklung einer neuen Diffusionsabsorptions-Wärmepumpe geplant. Im Bereich der verfahrenstechnischen Prozesse sind die bisherigen Untersuchungen zur Lösungsmittelbewirtschaftung zu verallgemeinern.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2001 vorhanden

(ZB) Zwischenbericht vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

Alle Berichte können von www.waermepumpe.ch/fe heruntergeladen werden.

- [1] Th. Kopp (thomas.kopp@hsr.ch), M. Deller, M.Studer, FH Rapperswil & KWT Kälte-Wärme-Technik, Belp & EMPA, Dübendorf: **Wärmequelle Luft für Retrofitwärmepumpen** (SB) ENET 220137
- [2] H.R. Gabathuler (gabathuler.ag@bluewin.ch), H. Mayer, Gabathuler AG, Diessenhofen & KWT Kälte-Wärme-Technik, Belp & FH Burgdorf: **Messungen an Retrofit-Wärmepumpen, Phase 2** (SB) ENET 220143
- [3] S. Guex, M. Zehnder, D. Favrat (daniel.favrat@epfl.ch), Laboratoire d'énergétique industrielle, EPF Lausanne & Electricité de France, Moret-sur-Loing & SATAG THERMOTECNIK, Arbon: **Pompe à chaleur air-eau à haute température, phase 2** (SB) ENET 220219
- [4] M. Zehnder, D. Favrat (daniel.favrat@epfl.ch), Laboratoire d'énergétique industrielle, EPF Lausanne: **Migration d'huile dans les pompes à chaleur** (JB) ENET 220227
- [5] J. Schiffmann (jurg.schiffmann@ofttech.com), OFFTECH SA, Lausanne: **Compresseur radial pour pompe à chaleur bi-étagée, Phase 1: Etude de faisabilité**, (SB) ENET 220195
- [6] E. Geisser, Th. Kopp (thomas.kopp@hsr.ch), FH Rapperswil & UNEX AG, Zürich & KAPAG AG, Zumikon & Ecopac AG, Herrliberg: **Kleinwärmepumpe mit Ammoniak, Phase 3: Bau eines Funktionsmusters** (JB) ENET 220221
- [7] S. Bertsch, M. Ehrbar (ehrbar@ntb.ch), FH Buchs & P.Hubacher, Hubacher Engineering, Engelburg: **Verbesserung des Abtauens bei luftbeaufschlagten Verdampfern, Phase 2: Bewertung der Abtauprozesse** (SB) ENET220187
- [8] P. Hoffmann (patrik.hoffmann@epfl.ch), Institut d'Optique Appliquée, EPFL Lausanne: **Méthodes de traitement de surface pour obtenir une diminution du givrage** (JB) ENET 220222
- [9] H.R. Graf (hansrudolf.graf@sulzer.com), Sulzer Innotec, Winterthur: **Lärmreduktion bei Luft/Wasser- Wärmepumpenanlagen - Grundlagen und Massnahmen** (SB) ENET220193
- [10] S. Signorelli, Th. Kohl (kohl@geo.phys.ethz.ch), Institut für Geophysik, ETHZ Zürich: **Validieren des Programms EWS und Optimieren der Erdwärmesondenlänge**, (SB) ENET 220186
- [11] O. Wanner (wanner@eawag.ch), V. Panagiotidis, H. Siegrist, EAWAG, Dübendorf: **Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen** (JB) ENET 220226
- [12] H.R. Gabathuler, H. Mayer (gabathuler.ag@bluewin.ch), Gabathuler AG, Diessenhofen & Th. Afjei, FH Muttenz: **Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen, Teil 1: Planungshilfe** (SB) ENET 220216;
 H.R. Gabathuler, H. Mayer, Gabathuler AG, Diessenhofen & P. Renaud (pierre.renaud@planair.ch) PLANAIR, La Sagne & Th. Afjei, FH Muttenz: **Schémas standard pour petites**

- installations de pompes à chaleur, 1ère partie: fiches techniques** (SB) ENET 220217; Th. Afjei (t.afjei@fhbb.ch), U. Schonhardt, C. Wemhöner, FHBB Muttenz & G. Zweifel, M. Achermann, R. von Euw, U. Stöckli, FH Horw & H.R. Gabathuler, H. Mayer, Gabathuler AG, Diessenhofen, & M. Erb, Eicher+Pauli, Liestal: **Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen, Teil 2: Grundlagen und Computersimulationen** (SB) ENET 220218
- [13] H.R. Gabathuler, H. Mayer (gabathuler.ag@bluewin.ch), Gabathuler AG, Diessenhofen & E. Shafai, R. Wimmer, IMRT/ETH Zürich: **Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen, Phase 2: Erprobung in einem Wohnhaus**, (SB) ENET 220142
- [14] E. Shafai (shafai@imrt.mavt.ethz.ch), Institut für Mess- und Regeltechnik, ETH Zürich & Gabathuler AG, Diessenhofen: **Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen, Phase 3: Vergleich der PBM-Regler auf dem dynamischen Prüfstand** (JB) ENET 210231
- [15] A. Montani (andre.montani@axpo.ch), Wärmepumpentestzentrum Töss, Winterthur: **Wärmepumpentest für kombinierte Raumheizung und Warmwasserbereitung** (JB) ENET 220223
- [16] Th. Afjei (t.afjei@fhbb.ch), C. Wemhöner, FH Muttenz: **Jahresnutzungsgrad von Wärmepumpenanlagen mit Warmwasserbereitung** (JB) ENET 220232
- [17] S. Roth (stefan.roth@axpo.ch), A. Montani, Wärmepumpen-Testzentrum Töss, Winterthur & M. Ehrbar, FH Buchs & K. Eggenschwiler, EMPA Dübendorf: **Vertretung der Schweiz in den Arbeitsgruppen des CEN TC113** (JB) ENET 220225
- [18] A. Roubaud, D. Favrat (daniel.favrat@epfl.ch), Laboratoire d'énergétique industrielle, EPF Lausanne: **BiogasMotor** (SB) ENET 220203
- [19] P. von Böckh (p.vonboeckh@fhbb.ch), FH Muttenz & H.P. Zumsteg, Ch. Gaegauf, Ökozentrum, Langenbruck: **Potenzialabschätzung eines langsam laufenden Stirlingmotors** (SB) ENET 220138
- [20] P. S. Bieler (pbsieler@tech.chem.ethz.ch), Laboratorium für technische Chemie, ETH Zürich: **Analyse und Modellierung des Energiebedarfs in Batch-Prozessen** (ZB) ENET 220185
- [21] Th.B. Hofstetter (hungerb@tech.chem.ethz.ch), Laboratorium für technische Chemie, ETH Zürich: **Abfalllösungsmittelmanagement in der chemischen Industrie - Ökologischer Vergleich von Rektifikation und Verbrennung** (SB) ENET 220141
- [22] F. Maréchal, D. Favrat (daniel.favrat@epfl.ch), Laboratoire d'énergétique industrielle, EPF Lausanne: **Utilisation rationnelle de l'énergie dans l'industrie par PinchLENI** (SB) ENET 220229

Referenzen

- [23] M. Zogg: **Wärme und Strom aus Brennstoffen – effizient und umweltschonend**, Gas-Wasser-Abwasser gwa 82(2002)12, 907/912; Download ab [33].
- [24] M. Zogg: **The Swiss Retrofit Heat Pump Program**, Preprints, 7th International Energy Agency Heat Pump Conference, Beijing, 19-22 May 2002, China Academy of Building Research, Vol. 1, pp. 208/218; Download ab [33].

- [25] M. Zehnder, D. Favrat, H. Hohl, C. Olivier, M. Perevozchikov: **High Performance Air-Water-Heat Pump with Extended Application Range for Residential Heating**, 7th International Energy Agency Heat Pump Conference, Beijing, 19-22 May 2002, Vol. 2, pp.146/157.
- [26] H. Baumann, Martin Konzett: **Small Oilfree Piston Type Compressor for CO₂**, Proceedings of the 2002 International Compressor Engineering Conference, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA.
- [27] Th. Afjei: **Standardlösungen für Kleinwärmepumpenanlagen**, Kälte & Klimatechnik (2002)9, 62/64,66/68.
- [28] E. Shafai, R. Wimmer, H. P. Geering: **A New Control Approach for Heat Pump Heating Systems**, Preprints, 7th International Energy Agency Heat Pump Conference, Beijing, 19-22 May 2002, Vol.1, pp. 146/157.
- [29] A. Roubaud, R. Röthlisberger, D. Favrat: **Unscavenged Combustion Prechamer as a Way to Improve Efficiency and Emissions of a Lean-Burn Cogeneration Biogas Engine: Comparison with Natural Gas**, International Conference on Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Berlin, Germany, 3-5 July, 2002.
- [30] M. Zogg: **Einführung in die Wärmepumpentechnik**; Ausbildungsmodul der Schweizerischen Vereinigung für Geothermie; Download ab [33].
- [31] F. Rognon (Hrsg.): **Wärmepumpen: Wo sind die Grossen?**, Tagungsband zur 9.UAW-Tagung vom 11.Juni 2002, Bundesamt für Energie 2002, Download ab [33].
- [32] Th.Afjei: **Heat Pump Heating Systems for Low-Energy Houses in Switzerland - Field Measurements and Technical Handbook**, Proceedings of the 7th International Energy Agency Conference on Heat Pumping Technologies, Beijing, China, May 19-22, 2002, Vol. 2, China Academy of Building Research, pp. 827/839.
- [33] **Internetseite des Forschungsprogramms www.waermepumpe.ch/fe**. Rubrik „Berichte“: Download von Zusammenfassungen und der ausführlichen Schlussberichte durchgeführter Forschungsarbeiten, Rubrik „Publikationen“: Download von Publikationen des Programmleiters.