

Martin Zogg, Dr.sc.techn.ETHZ
Verfahrens- und Energietechnik
Kirchstutz 3
3414 Oberburg
martin.zogg@bluewin.ch
www.mysunrise.ch/users/martin.zogg

Rückblick auf 10 Jahre BFE-Wärmepumpenforschung

In den ersten Jahren dieser Periode konzentrierten wir uns auf die Verwendung alternativer synthetischer und natürlicher Arbeitsmittel, die Bereitstellung gesicherter Auslegungsunterlagen für Erdwärmesonden als Wärmequelle, die Verbesserung von Wärmeübertragungsvorgängen, die Reduktion des Arbeitsmittelinhalts (Flüssigkeitsbetriebsinhalt), Untersuchungen neuer Kompressortypen, Computersimulationen zur verbesserten Auslegung sowie die Entwicklung eines neuen Absorptionswärmepumpenprinzips. Das Stirlingprinzip wurde auf seine Eignung sowohl als Wärmepumpe wie auch als Antrieb für Kleinblockheizkraftwerke untersucht. Auf der Wärme-Kraft-Kopplungsseite wurden mit der Entwicklung des SwissMotors – eines emissionsarmen Gasmotors aus schweizerischer Herstellung mit hoher Effizienz zum Antrieb von Blockheizkraftwerken – neue Masstäbe für BHKWs gesetzt. In den letzten Jahren konzentrierten sich unsere Anstrengungen auf die Entwicklung von Wärmepumpen für den Sanierungsmarkt mit höheren Vorlauftemperaturen und auf die Verbesserung der ganzen Wärmepumpenheizungsanlage durch optimale Einbindung, Regelung und automatische Betriebsüberwachung. Weiter werden neue Testmethoden für das Erfassen des dynamischen Betriebs von Wärmepumpen wie auch für die gleichzeitige Raumheizung und Warmwasserbereitung entwickelt. Im Bereich der Nutzung industrieller Abwärme konzentrierte sich die Forschung auf neue Methoden zur optimalen prozessinternen Abwärmenutzung (Prozessintegration).

At the beginning of the ten years research period we focused on replacing the chlorofluorocarbons (CFC) by hydrofluorocarbons (HFC) and natural refrigerants, the development of validated design tools for vertical borehole heat exchangers, the enhancement of one and two phase heat transfer operations, the reduction of the refrigerant holdup, the investigation of new compressor types, computer simulations for an improved heat pump heating system design and the development of a diffusion-absorption heat pump. The Stirling cycle – mainly the free piston type – has been investigated for engines and heat pumps as well. On the cogeneration side a gas engine, called SwissMotor, with sensational high efficiency and extremely low emissions has been developed. In the last couple of years we focused on the development of retrofit heat pumps with higher supply temperatures (Swiss Retrofit Heat Pump) and on the optimization of heat pump heating systems as a whole by an optimal integration of the heat pumps, new control methods and automatic rating and diagnosis systems. In addition new test methods for covering the dynamic behavior of heat pumps and the combined space heating and hot tap water production by heat pumps are under investigation. In the topic of utilizing industrial waste heat we focused on new design methods for process integration for continuous and batch processes.

Bedeutung der Wärmepumpentechnik

Die Erzeugung von Niedertemperaturwärme für Raumheizung, Warmwasserbereitung und industrielle Prozesse benötigt über die Hälfte des gesamten Endenergiebedarfs der Schweiz. Durch die Kombination von Elektrowärmepumpen mit effizienten Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (Bild 1) oder modernen Kombikraftwerken aber auch mit fortgeschrittenen Absorptionswärmepumpen lassen sich gegenüber den üblichen Öl- und Gaskesseln bereits heute **30% bis 50% an Brennstoffen einsparen**. Beim Ersatz von Elektrowiderstandsheizungen durch Wärmepumpen spart man sogar 75% und mehr an elektrischer Energie. In Zukunft sind noch höhere Einsparungen möglich. **Ein forcierter Ausbau der Umgebungswärmenutzung in Kombination mit einer effizienten Stromproduktion drängt sich auf**, wenn die CO₂-Produktion tatsächlich rasch und deutlich reduziert werden soll. Auch bei einer gleichzeitigen effizienten Produktion von Wärme- und Strom aus Brennstoffen kann nicht auf Wärmepumpen verzichtet werden [1].

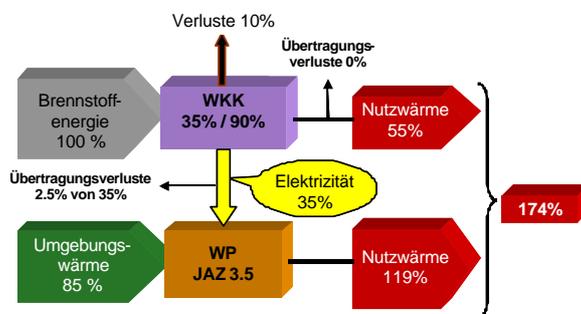


Bild 1: Kombination effizienter Wärme-Kraft-Kopplung mit Wärmepumpen.

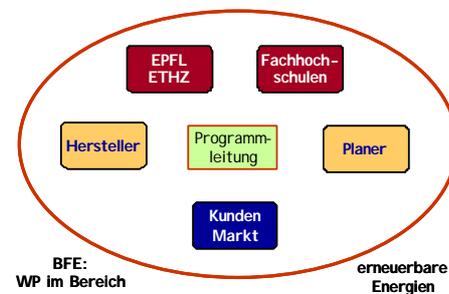


Bild 2: Umfeld der BFE-Wärmepumpenforschung

Ausgangslage und Umfeld

Das **Bundesamt für Energie** hat dank dem damaligen Forschungsprogrammleiter, Ulrich Schärer (heute Leiter der BFE-Sektion „Erneuerbare Energien“), die grosse Bedeutung der Wärmepumpentechnik zur Reduktion des Verbrauchs an elektrischer Energie (beim Ersatz von Widerstandsheizungen) und an fossiler Energie (beim Ersatz von Öl- oder Gaskesseln) früh erkannt. Da die Wärmepumpe zur Erzeugung von Nutzwärme zum grossen Teil Wärme aus der Umgebungsluft, dem Erdboden, dem Grundwasser und dem Oberflächenwasser nutzt, wurde die Wärmepumpe im BFE folgerichtig dem Bereich der **erneuerbaren Energien** zugeteilt. Diese europäische Pioniertat gab der Entwicklung der Wärmepumpentechnik in der Schweiz mehr Schwung als in den meisten anderen europäischen Ländern.

Für eine fruchtbare Forschung und Entwicklung im Wärmepumpen - wie auch im WKK-Bereich¹ waren in der Schweiz zudem **Hersteller und Planer** mit überdurchschnittlichem Pioniergeist, an der Wärmepumpentechnik interessierte **Hochschulen und Fachhochschulen** und last but not least der Schonung der Umwelt besonders verpflichtete **Kunden** vorhanden: Bild 2. In diesem Umfeld konnten in den vergan-

¹ WKK: Wärme-Kraft-Kopplung – der Begriff hat sich in der Schweiz etabliert. Im übrigen deutschen Sprachraum wird aber von Kraft-Wärme-Kopplung gesprochen.

genen zehn Jahren mit rund **130 Forschungsprojekten** wesentliche Wissenslücken geschlossen werden. Dabei wurde bei allen Projekten stets versucht, möglichst viele der im Bild 2 aufgeführten Akteure einzubinden. So konnten die theoretischen Stärken der universitären Hochschule, die Umsetzungstärke der Fachhochschulen und das Realisierungskönnen der Hersteller und Planer zum Erarbeiten kurz-, mittel- und langfristig anwendbarer Lösungen genutzt werden. Der **Programmleiter** wirkte dabei als Initiator, Koordinator, Kommunikator, „Qualitätshüter“ und gelegentlich auch als Vermittler und Helfer bei persönlichen Problemen. Durch seine Einbindung in Gremien der internationalen Energieagentur *IEA* konnten internationale Tendenzen rechtzeitig in nationale Vorhaben einfließen, Forschungsanstrengungen von internationalem Interesse auch auf andere Länder verteilt und Resultate der nationalen Forschung und Entwicklung der internationalen „Wärmepumpengemeinde“ mitgeteilt werden.

Im Jahr **1993** gab es in der Schweiz bereits ca. **30'000 Wärmepumpen** zur Raumheizung. Pro Jahr kamen rund **3000 neue Wärmepumpen** hinzu. 67% der Wärmepumpen nutzten damals **Luft als Wärmequelle**. Die mittlere **Jahresarbeitszahl** war mit **rund 2.3** noch sehr bescheiden. Die Nutzung der **Erdwärme** als Wärmequelle mit Erdwärmesonden steckte noch in den Anfängen. Infolge oft überdimensionierter Wärmeträger-Umwälzpumpen und erheblichen Auslegungsunsicherheiten lag die mittlere Jahresarbeitszahl mit **etwa 2.4** nur wenig höher: Bild 15. Die Wärmepumpenanlagen waren teuer und die Eigenheiten gegenüber den gewohnten Kesselheizungen kaum **berücksichtigt**. Die **erheblichen Verbesserungspotenziale** in Richtung höherer Effizienz und höherer Zuverlässigkeit bei gleichzeitig tieferem Preis wurden erkannt. Forschung und Entwicklung waren aber nicht nur in dieser Richtung gefordert. Es galt auch, die bis anhin in Kältemaschinen und Wärmepumpen verwendeten Fluorchlorkohlenstoffe mit ihrer inzwischen zur Gewissheit gewordenen Bedrohung für die Ozonschicht möglichst rasch durch **alternative Arbeitsmittel** zu ersetzen.

Forschungsschwerpunkte und Ergebnisse

Zur Erhöhung der Effizienz und zur Ausdehnung des sinnvollen Einsatzbereichs von Wärmepumpenheizungen wie auch zur Emissionsreduktion bei WKK-Anlagen wurden in den Jahren 1993 bis 2002 Wissenslücken bei Komponenten und Gesamtsystemen in den in der Tabelle 1 aufgeführten Bereichen geschlossen. Im Folgenden werden daraus einige Resultate vorgestellt. Ausführliche Zusammenfassungen wie auch vollständige Forschungsberichte können aus [7] heruntergeladen werden.

Beim **Ausstieg aus den synthetischen Arbeitsmitteln** standen zunächst Versuche für das unter starkem Zeitdruck vorzunehmende Auswechseln der synthetischen FluorChlorKohlenstoffe FCK² durch geeignete FluorKohlenWasserstoffe FKW in bestehenden Wärmepumpen und Kälteanlagen („Drop-in“, Beispiel: Ersatz von R12 durch R134a). Dann folgte der Ausstieg aus den Hydrochlorfluorkohlenwasserstoffen H-FCKW durch geeignete FKW (Beispiel: Ersatz von R22 durch R134a, R404A und R407C). Da die ebenfalls synthetischen FKW ein sehr hohes Treibhauspotenzial besitzen, und weil aus ihnen in der Umwelt nebst kurzlebigen (Salzsäure,

² Allgemein – aber nicht korrekt – als FluorChlorKohlenWasserstoffe FCKW bezeichnet; im Englischen richtig CFC (chlorofluorocarbons).

Tabelle 1: Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte 1993 bis 2002

Schwerpunkte	Bearbeitete Themenbereiche, ausführliche Berichte in [7]
Ausstieg aus den synthetischen Arbeitsmitteln	<ul style="list-style-type: none"> - Ersatzarbeitsmittel für FCK → FKW - Umweltrelevanz natürlicher Arbeitsmittel - Kompressorentwicklung für CO₂ - Wärmepumpenentwicklung für NH₃
Wärmequellen (Umgebungsluft / Erdboden / Abwasser)	<p>Umgebungsluft:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Verdampfung mit freier Konvektion - Optimierung Teilsystem Wärmequelle Luft - Vorwärmung in porösen Schotterschichten - Vorwärmung in Erdregistern (Rohre) - Reduktion der Abtauverluste - Reduktion der Lärmentwicklung <p>Erdboden:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Auslegungsmodul <i>EWS</i> für Computersimulationen - geothermische Stoffwerte des CH-Mittellandes - solare Regeneration von Erdwärmesonden <p>Abwasser (Schmutzwasser):</p> <ul style="list-style-type: none"> - Biofilmbildung Analyse und Massnahmen
Wärmeübertragung und Wärmeübertrager	<ul style="list-style-type: none"> - Optimieren der Geometrie von Plattenwärmeübertragern - optimaler Wärmeträger für Erdwärmesondenanlagen - Verdampfung von FKW und Ammoniak mit und ohne Schmieröl
Wärmepumpen für höhere Temperaturhübe (Retrofit Heat Pump)	<ul style="list-style-type: none"> - zweistufiger Wärmepumpenprozess - separater WP-Kreislauf zur Kondensatunterkühlung - Zwischendruckansaugung mit Economizer - Warmwasserbereitung mit Kondensatunterkühlung
Thermisch angetriebene Wärmepumpen	<ul style="list-style-type: none"> - H₂O/LiBr-AWP für Nahwärmeversorgung (342 Wng.) - Diffusions-Absorptions-Wärmepumpe - AWP-Kessel - Metallhydrid-Adsorptionswärmepumpe - Freikolben-Stirling-Vuilleumier-WP
Wärme-Kraft-Kopplung WKK	<ul style="list-style-type: none"> - BHKW: Betriebsoptimierung und -emissionüberwachung - Neuentwicklung <i>SwissMotor</i> - Stirling-Freikolben-Mikro-BHKW
Optimieren des Gesamtsystems	<ul style="list-style-type: none"> - diverse Simulationsprogramme <i>YUM, WPCalc, WKKCalc, Matlab-Simulink/Carnot-Block-Set</i> - kombiniertes Heizen und Kühlen mit Erdwärmespeicher - dynamischer Wärmepumpentest - Wärmepumpentest für kombinierte Raumheizung und Warmwasserbereitung - Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen - Betriebsüberwachung und Fehlerdiagnose - Wärmepumpenheizungen für Niedrigenergiehäuser - Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen
Abwärme: Prozessintegration (hier nicht behandelt)	<ul style="list-style-type: none"> - Prozessintegration für kontinuierlich und absatzweise arbeitende Prozesse - Lösungsmittelrückgewinnung - Energiemodelle für Batch-Produktionsanlagen

Flusssäure) auch langlebige toxische Abbauprodukte (Trifluoressigsäure) entstehen, wird der Ruf zum Übergang auf **natürliche Arbeitsmittel** immer lauter. Wir liesen deshalb eine auch international viel beachtete Studie zu den Umwelteinwirkun-

gen synthetischer und natürlicher Arbeitsmittel durchführen. Sie verdeutlichte die klare Dominanz der Emissionen aus der Erzeugung des elektrischen Stroms für die meisten Umwelteinwirkungen. Voraussetzung für einen ökologisch sinnvollen Übergang zu natürlichen Arbeitsmitteln ist deshalb das Erreichen einer vergleichbaren Leistungszahl wie mit den FKW. Unter dieser Voraussetzung belasten natürliche Arbeitsmittel die Umwelt weniger als FKW, sie bewirken insbesondere einen geringeren Treibhauseffekt (um 5-65%), einen deutlich geringeren Ozonschichtabbau (um 50-80%) und bei heutigen Arbeitsmittelverlusten etwas weniger terrestrische Ökotoxizität.

Für Anwendungen mit Wärmebedarf über einen grösseren Temperaturbereich wie die Warmwasserbereitung von 10°C auf 60°C sind überkritische Wärmepumpenprozesse mit dem natürlichen **Arbeitsmittel Kohlendioxid** vielversprechend. Als schweizerischer Beitrag zu einem Vorhaben der internationalen Energieagentur wurde deshalb ein geeigneter ölfreier Kleinkompressor für Kohlendioxid entwickelt: Bild 3. Die Neukonstruktion ermöglicht den Bau effizienter Wärmepumpen-Warmwassererwärmer mit dem natürlichen Arbeitsmittel Kohlendioxid ohne die bisher aufgetretenen Probleme mit der hohen Löslichkeit des Schmieröls. Gegenwärtig laufen Abklärungen für eine Weiterentwicklung zur Serienerife und einer späteren Produktion in der Schweiz.

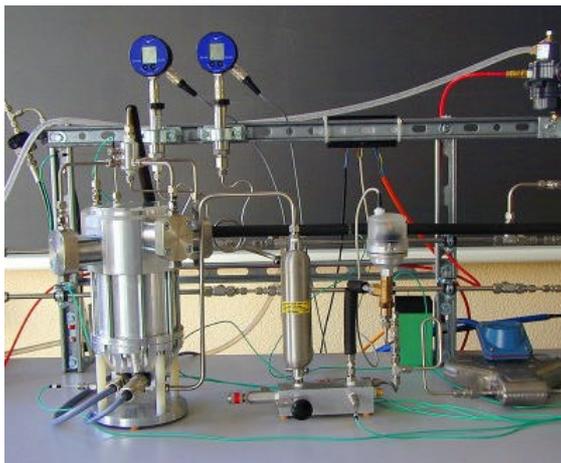


Bild 3: Versuchskompressor für CO₂ (links) auf den Prüfstand an der FH Winterthur [2]



Bild 4: Versuchsanlage einer Ammoniakkleinwärmepumpe an der FH Rapperswil [3]

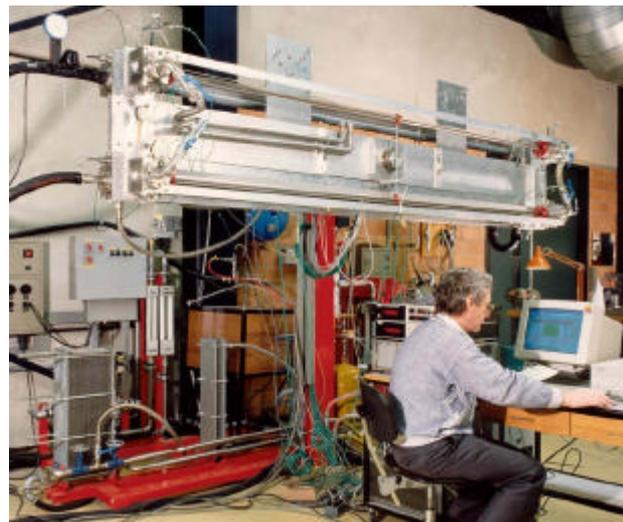
Ammoniak als weiteres natürliches Arbeitsmittel ist bei grossen Kälteanlagen und Wärmepumpen längst Stand der Technik. Im Hinblick auf den oft diskutierten Ausstieg aus den Fluorkohlenwasserstoffen wurde deshalb die Machbarkeit einer **Ammoniak-Kleinwärmepumpe für den Sanierungsmarkt** untersucht: Bild 4. Nach der Überwindung zahlreicher Schwierigkeiten wurde ein Funktionsmuster mit bereits erfreulicher Energieeffizienz gebaut. Zur Kühlung des Ammoniaks bei der Verdichtung wird als Besonderheit ein Flügelzellenverdichter mit hohem Schmierölumlauf eingesetzt. Im Schwerpunkt „**Wärmequellen**“ wurde die Wirksamkeit von künstlichen und natürlichen Schotterschichten zur Konditionierung der **Umgebungsluft** vor dem Eintritt in den Verdampfer der Wärmepumpe hinterfragt. Diese Lösung erwies sich als kaum lohnend. Die Versuche mit einer **Wärmepumpe mit stillem Verdampfer** (ohne Ventilator, Umwälzung der Umgebungsluft nur mit freier Konvektion) bestätigten die Machbarkeit des Konzepts: Bild 5. Dem Vorteil einer etwas höheren Jahresarbeitszahl stehen allerdings die Nachteile einer grossen

Verdampferoberfläche und eines grossen Bauvolumens gegenüber. Infolge der geringen Heizflächenbelastung ist weiter eine stabile Verdampfung nicht selbstverständlich. Der Energieaufwand zur **Abtauung der Verdampfer** von Wärmepumpen mit Umgebungsluft als Wärmequelle ist mit einer Grössenordnung von 10% des Gesamtbedarfs an elektrischer Energie beträchtlich. Die üblichen Abtaumethoden (Heissgasabtauung und Prozessumkehr) sowie innovative Abtaulösungen (Abtauen mit Heizungswasser, Luftabtauung) wurden deshalb eingehend analysiert. Durch entsprechende Verbesserungen in den Prozessen und vor allem bei der Steuerung zur Auslösung und Beendigung des Abtauens sollte der Abtauenergiebedarf noch bis auf rund die Hälfte des heute Üblichen reduziert werden können. Im Rahmen eines weiteren Forschungsvorhabens wurden die Lärmquellen von Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen analysiert und ein Leitfaden für Hersteller und Planer zur **lärmmarmen konstruktiven Gestaltung** solcher Anlagen mit einer grossen Zahl konkreter Massnahmen ausgearbeitet.

Zur Verwendung in dynamischen Computersimulationen von Wärmepumpenanlagen mit **Erdwärmesonden** wurde ein neues Berechnungsmodul *EWS* für die Berechnung der Soleaustrittstemperatur aus Doppel-U-Erdwärmesonden entwickelt und validiert. Durch eine geschickte Kombination einer numerischen Simulation des Nahbereichs von 1 bis 2 m um die Sonde mit einer periodischen analytischen



***Bild 5:** Wärmepumpe mit „stillem Verdampfer“ an der FH Muttenz [4]*



***Bild 6:** Versuchsanlage an der EPFL zur Untersuchung des Wärmeübergangs bei der Verdampfung von Arbeitsmitteln in glatten und strukturierten Rohren [5]*

Erfassung des ausserhalb liegenden Bodenbereichs wurden sehr kurze Rechenzeiten erreicht. Zur bequemen Berechnung der für die fundiertere Auslegung grösserer Erdwärmesondenanlagen mit *EWS* benötigten **geothermischen Stoffwerte** (Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Dichte des Erdbodens) wurde für das Molassebecken des schweizerischen Mittellandes ein PC-Programm erstellt. In einer Potenzialstudie wurde der Einfluss der **Regeneration kleiner Erdwärmesondenfelder durch solare Überschusswärme und durch Sommerkühlung** (sanfte Kühlung) auf die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe und auf die Gesamtkosten untersucht. Es zeigte sich, dass eine Regeneration nur sinnvoll ist, wenn sie wie bei der Raumkühlung zu einer Komfortsteigerung und/oder zu einem Wegfall anderer Geräte und Maschinen führt.

Im Schwerpunkt „Wärmeübertragung“ wurden nebst einer Optimierung der Geometrie von **Plattenwärmeübertragern** Wissenslücken bei der Berechnung der **Verdampfung von FKW und Ammoniak** mit und ohne Schmieröl in glatten und strukturierten Rohren geschlossen: Bild 6.

Über das umfangreiche Vorhaben zur **Entwicklung einer Wärmepumpe für den Sanierungsmarkt** wurde in letzter Zeit bereits mehrfach berichtet. Zu der bei hohen Temperaturhüben geforderten Erhöhung der Wärmeleistung und Reduktion der Kompressorausstrittstemperatur wurden mehrere Varianten eingehend untersucht. Beim gegenwärtigen Entwicklungsstand erwies sich für Kleinwärmepumpen die Lösung mit Economizer und Zwischendruckansaugung als optimal: Bild 7. Zwei Varianten dieses Prinzips wurden zur Marktreife entwickelt und eingehend getestet: Eine innovative Lösung, die *Swiss Retrofit Heat Pump* der Firma KWT mit indirekter Luftkühlung und separatem Wärmepumpenkreislauf zur Warmwasserbereitung (Kondensatunterkühlung als Wärmequelle) und eine einfachere, pragmatische Lösung, die Retrofitwärmepumpe der Firma SATAG. Mit für Dampfphasenzwischenansaugung optimiertem Scrollkompressor erreichen diese Neuentwicklungen bei $-12^{\circ}\text{C}/65^{\circ}\text{C}$ gegenüber einfachen Wärmepumpenprozessen eine um 30% höhere Wärmeleistung als einfache Wärmepumpenprozesse. Weiter kann die Arbeitstemperatur am Kompressorausstritt auf problemlose Werte begrenzt werden. Diese Entwicklungen fanden auch im Ausland grosse Beachtung. Es ist zu hoffen, dass sie sich am Sanierungsmarkt gegen die tiefen Preise von Heizöl und Erdgas und die kostengünstigen Kessel durchsetzen werden.

Im Bereich der **thermisch angetriebenen Wärmepumpen** blieb die Effizienz einer neu entwickelten **Freikolben-Stirling-Vuilleumier-Wärmepumpe** deutlich hinter den Erwartungen zurück. Abschätzung zu einer aus Russland stammenden Idee einer Metallhydrid-Adsorptionswärmepumpe waren ebenfalls wenig verheissungsvoll. Die von H.Stierlin entwickelte **Diffusions-Absorptionswärmepumpe** (Bild 8) versprach dagegen Interessantes: völlig geräuschlos, keine bewegten Teile, Wärmeverhältnis 1.35, Heizleistung 3.5 kW. Für die aufwändige Konstruktion fanden wir in der Schweiz leider keinen Hersteller. Die ganze vielversprechende Entwicklung wurde an die deutsche *Buderus* verkauft. In Deutschland und Holland wurden inzwischen erfolgreiche Feldversuche durchgeführt. Das Aggregat soll in Kürze auch auf dem Schweizer Markt erhältlich sein.

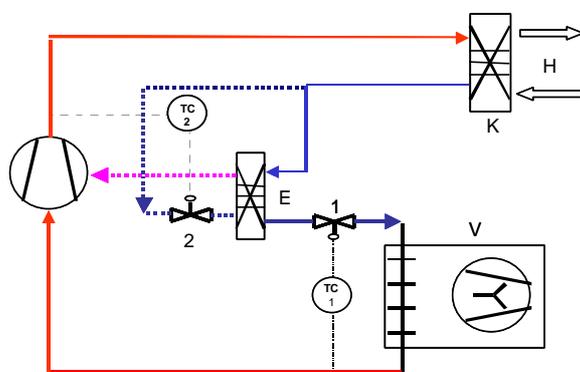


Bild 7: Wärmepumpenkreisprozess mit Zwischenansaugung und Economizer (E), H Heizungskreislauf, K Kondensator, V Verdampfer



Bild 8: Diffusions-Absorptions-Wärmepumpe der Firma Creatherm

Wie das Bild 1 verdeutlicht, gehört zu einer Wärmepumpe auch eine effiziente Produktion des elektrischen Stroms. Im Forschungsprogramm *UAW* haben wir uns deshalb auch mit der Betriebsoptimierung und der Emissionsbegrenzung konventioneller Blockheizkraftwerke beschäftigt. Schwerpunkt bildete aber die Entwicklung eines hocheffizienten, emissionsarmen Gasmotors, des *SwissMotors*³, durch den Hersteller *Liebherr* in Bulle, die *EPFL* und die *ETHZ*. Die Magermotorvariante der *EPFL* wurde vor allem für Biogas als Treibstoff bereits mehrfach verkauft. Sensationelle Wirkungsgrade mit geringsten Schadstoffemissionen erzielte die von der *ETHZ* entwickelte $\lambda 1$ -Variante mit massiver Abgasrückführung: **Bild 9**. Das mit dem **AGR-SwissMotor** ausgerüstete *DIMAG*-Blockheizkraftwerk erreicht bei einer elektrischen Leistung um 190 kW einen elektrischen Wirkungsgrad von 38% und ohne Abgaskondensation einen Gesamtwirkungsgrad von 90%. Die Schadstoffemission beträgt nur 5% des LRV-98-Grenzwerts. Ein Meilenstein in der BHKW-Entwicklung! Derzeit laufen Anlagen der Nullserie im praktischen Einsatz.

Weniger erfolgreich verlief die Entwicklung eines **Freikolben-Stirlinggenerators**, aus der wir frühzeitig ausgestiegen sind. Das von der Firma *SIG* übernommene Vorhaben wurde veräussert und hat momentan noch eine ungewisse Zukunft. Aus der Sicht einer effizienten *WKK-WP*-Kombination ist der bisher erreichte elektrische Wirkungsgrad von 20% klar zu gering. Ein weiteres Stirlingvorhaben wurde nach einem Vorprojekt abgebrochen. Wie der *AGR-SwissMotor* illustriert, hat der Verbrennungsmotor einen Stand erreicht, der weitere Stirlingentwicklungen fraglich erscheinen lässt. Dies gilt auch für den immer wieder angesprochenen Betrieb mit Brennstoffen regenerierbaren biologischen Ursprungs. Auch hier laufen bereits erfolgreiche Versuche mit dem *AGR-SwissMotor*.



Bild 9: *AGR-SwissMotor* der Firma *Liebherr* in einem BHKW der Firma *DIMAG* (Bild *DIMAG*)

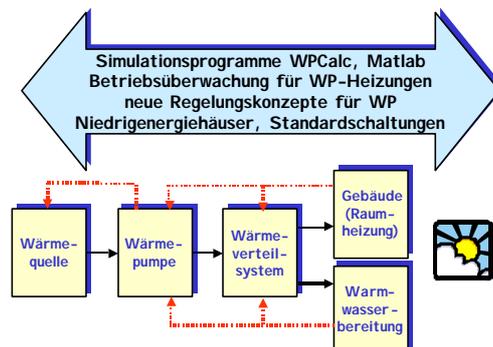


Bild 10: Optimieren des Gesamtsystems

Grosses Gewicht wurde auf den Schwerpunkt **Optimieren des Gesamtsystems** gelegt: **Bild 10**. Hier liegt ein erhebliches Verbesserungspotenzial sowohl für Wärmepumpen - wie auch für *WKK*-Heizungsanlagen. Nach einer Ergänzung des inzwischen in die Jahre gekommen Auslegungsprogramms *WPCalc* durch das beschriebene Modul *EWS* zur besseren Erfassung von Erdwärmesonden wurden neue **Simulationsprogramme für Gesamtsysteme** auf der Basis von *Matlab-Simulink* entwickelt und in diversen Projekten eingesetzt. Der Einsatz solcher Werkzeuge wird für die Planung von Kleinanlagen meist als zu aufwändig empfunden. Im Projekt **Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen** wurde deshalb ein anderer Weg eingeschlagen. 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 sozusagen „ein- für allemal“ detailliert untersucht und optimiert. Die Ergebnisse dienen der Ausarbeitung einer einfach anzuwendenden ta-

³ Gemeinsames Vorhaben mit dem BFE-Bereich Verbrennung.

bellarischen Planungshilfe zur Auswahl der geeigneten Standardschaltung und zur vollständigen Dimensionierung einer Kleinwärmepumpenanlage. Die neue Planungshilfe bedeutet einen wesentlichen Schritt zur Reduktion der verwirrenden Zahl existierender Schaltungen. Sie führt mit einem minimalen Planungsaufwand zu **effizienten, kostengünstigen und betriebssicheren Wärmepumpenheizungsanlagen**. Sie trägt auch zu einer besseren Vergleichbarkeit von Angeboten und ausgeführten Anlagen verschiedener Lieferanten bei. 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. Für kostengünstige Wärmepumpenheizungen von **Niedrigenergiehäusern** wurde eine spezielle Planungshilfe geschaffen.

Konventionelle Heizungsregler mit aussentemperaturgeführter Rücklauftemperaturregelung sind für Wärmepumpen nicht optimal. Deshalb wurde eine **neue Wärmepumpenregelung durch Pulsbreitenmodulation** entwickelt. Diese funktioniert nach der Grundidee einer optimalen Nutzung der thermischen Trägheit von Gebäude und Wärmeverteilsystem sowie der Stromtarifzeiten bei der Zufuhr der über einen Tag benötigten Wärme durch geschickt portionierten Wärmepumpenbetrieb. Zur laufenden Ermittlung wesentlicher Parameter von Wärmepumpen und dem laufenden Erkennen allfälliger Fehlfunktionen bei der Inbetriebnahme und im Betrieb wurden zwei **neue Betriebsüberwachungs- und Fehlerdiagnosemethoden** entwickelt. Sie erleichtern die Betriebsoptimierung und geben beim späteren Betrieb Gewissheit über das optimale Funktionieren der Wärmepumpe. Insbesondere erlauben sie aber die Auslösung eines Wartungseingriffs erst bei tatsächlichem Bedarf (zustandsorientierte Instandhaltung). Die Methoden sind auch auf Kältemaschinen anwendbar. Sie wurden an einem **dynamischen Wärmepumpenprüfstand** erprobt: Bild 11. Dieser dient nun auch zum Vergleich der neu entwickelten Methoden zur Pulsbreitenmodulation



Bild 11: Dynamischer Wärmepumpenprüfstand zur Erprobung neuer Regelungs- und Betriebsüberwachungsmethoden an der ETHZ [6]

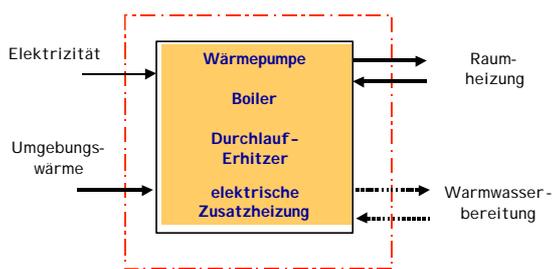


Bild 12: Entwicklung einer Testmethode für die kombinierte Raumheizung und Warmwasserbereitung

Systemüberlegungen erfordern aber auch weitergehende Tests als der bisherige Wärmepumpentest bei stationärem Betrieb nach EN 255. Die Minderleistung zu rasch taktender Wärmepumpen kann nur durch einen **dynamischen Wärmepumpentest** erfasst werden. Es fehlt auch ein Test für **kombinierte Raumheizung und Warmwasserbereitung** mit Wärmepumpen: Bild 12. Gute Lösungen zur Warm-

wasserbereitung wie das Nutzen der Kondensatunterkühlung und der Enthitzung werden mit den heutigen Tests nicht honoriert. Ein neu gestartetes Projekt zu diesem Problem soll hier Abhilfe schaffen. Es fand grosses internationales Interesse und wird nun gemeinsam mit Partnerländern der *IEA* weitergeführt.

Wie weiter?

In den vergangenen zehn Jahren hat sich die Wärmepumpenheizung dank vereinten Anstrengungen von Herstellern, Planern, Installateuren, EWs, Bund und Kantonen einen erfreulichen Marktanteil von **gegen 40% bei den Neubauten** erobert. Marginal ist der Wärmepumpenanteil leider im bedeutend gewichtigeren Bereich der Heizungssanierungen geblieben. Er erreicht dort nicht einmal 3%. Wie das Bild 13 verdeutlicht, ist das Energiesparpotenzial durch Heizungssanierungen mit Wärmepumpen noch enorm. Die im Rahmen der *BFE*-Forschung neu entwickelten Konzepte legten den technischen Grundstein für dessen baldige Realisierung. Die Umsetzung in den Markt liegt nun - im Rahmen der durch die Energiepreisentwicklung gegebenen engen Randbedingungen - in den Händen der Wärmepumpenhersteller. Man mag es drehen und wenden wie man will: **Voraussetzung für eine echte Bewegung in dieser Richtung ist der Übergang von der bisherigen gewerblichen Kleinserienproduktion zu einer echten industriellen Produktion**, wie sie bei kleinen Heizkesseln heute üblich ist. Wie das Bild 14 illustriert, ist hierzu bei den Wärmepumpen noch ein **Quantensprung** nötig.

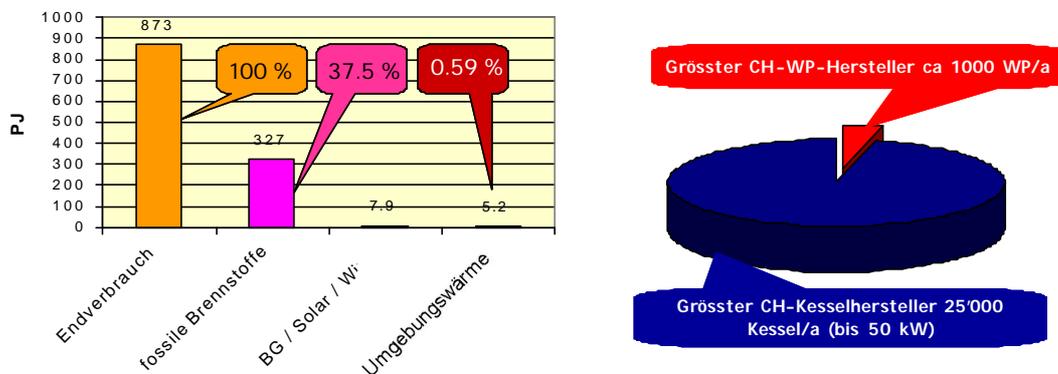


Bild 13: Aus der CH-Gesamtenergiestatistik 2001

Bild 14: Vergleich der Jahresproduktionen der grössten CH-Hersteller von Wärmepumpen und Heizkesseln (Kesselexport > 90%)

Die heute in der Schweiz installierten Wärmepumpenheizungen erreichen im Mittel **Jahresarbeitszahlen** um 3 bei Luft-Wasser-Systemen und um 3.5 bei Sole-Wasser-Systemen (WP mit Erdwärmesonden). Dies sind **gegenüber 1993 beachtliche Verbesserungen um 30% bzw. 46%**; Bild 15. Weitere Effizienzsteigerungen sind zwar noch möglich. Es wird aber schwieriger. **Bis 2010** sollte der Anteil an Wärmepumpenheizungen **bei Neubauten auf 50%** und jener im **Sanierungsmarkt auf 10%** gesteigert werden können. Dies bedingt eine konsequente Weiterführung der bisherigen Anstrengungen von Herstellern, Planern, Installateuren, EWs, Bund und Kantonen. Im Bereich der Forschung und Entwicklung sind die Anstrengungen zur **Erhöhung der Effizienz und der Umweltverträglichkeit** fortzusetzen. Dazu sind insbesondere Projekte zu den folgende Aufgaben fortzuführen oder neu zu starten:

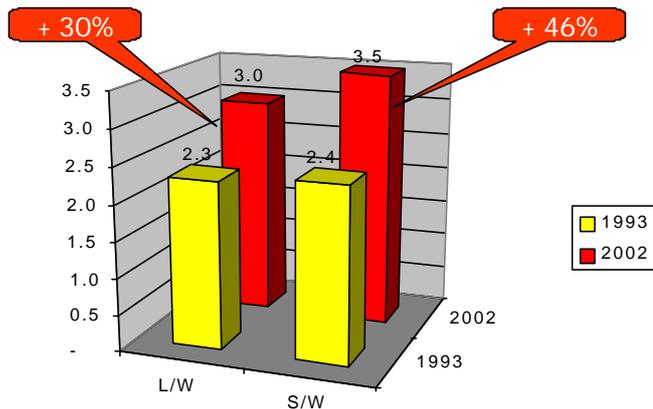


Bild 15: Zunahme der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenheizungen in den letzten zehn Jahren

- **Weitere Verbesserung der Kompressoren** - insbesondere durch Einführung hocheffizienter Elektroantriebe. Da die Kompressoren für Kleinwärmepumpen aus dem Ausland bezogen werden müssen, bleibt uns hier wohl nur die Hoffnung.
- **Verbesserung der Effizienz der Luft-/Wasser-Wärmepumpen** durch neue Systeme zur Wärmeentnahme aus der Umgebungsluft (variabler Luftvolumenstrom, freie Konvektion) bei gleichzeitiger Geräuschreduktion.
- Entwicklung von Komponenten und Wärmepumpen zum Betrieb mit **natürlichen Arbeitsmitteln**.
- Umsetzung der in der Forschung bereitgestellten Methoden zur **Pulsbreitenmodulation** und zur **Betriebsdiagnose** in kostengünstige Wärmepumpenregler.
- Steigerung der Effizienz bei der **kombinierten Raumheizung und Warmwasserbereitung** sowie Entwicklung von Testmethoden zur Beurteilung derartiger Systeme.
- Realisieren einer **zweiten Generation von Wärmepumpen** für den Sanierungsmarkt mit echt zweistufigem Prozess.
- **Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrads über 37.5%** bei weiterer Reduktion der Schadstoffemissionen bei Blockheizkraftwerken (Massstab für die Schadstoffemissionen muss der Stand des Gaskessels werden).

Die schweizerischen **Wärmepumpenhersteller** überzeugen durch innovative Lösungen. Ihre Zukunft ist aber gefährdet durch zu viele Hersteller mit entsprechend kleinen Stückzahlen (vergleiche Bild 14) und einer zu starken Konzentration auf dem kleinen Inlandmarkt. Hier ist ein aktives Vordringen auf den europäischen Markt und eine freiwillige innerschweizerische Marktberreinigung (vor Übernahmen durch grosse ausländische Hersteller!) von Nöten.

Ebenso in der Forschung und Entwicklung leisten unsere **Projektleiter und Sachbearbeiter** - auch mit internationalen Massstäben gemessen - Beachtliches. Aber auch hier ist die Kleinheit unseres Landes ein Problem. Die Anzahl der für die Wärmepumpenforschung in Frage kommenden Forscher ist kritisch bis unterkritisch. Nur eine erfolgreiche Wärmepumpenindustrie vermag die nötigen Projektmit-

arbeiter anzuziehen. Das Problem kann auch durch eine vermehrte internationale Zusammenarbeit entschärft werden.

Quellen

- [1] Zogg, M: Wärme und Strom aus Brennstoffen – effizient und umweltschonend, Gas-Wasser-Abwasser gwa 82(2002)12, 907/912; Download ab www.waermepumpe.ch/fe - Rubrik „Publikationen“

- [2] Baumann, H.: Ölfreier CO₂-Kleinkompressor, Schlussbericht BFE 2001, ENET-Nr.210125; Download ab [7].

- [3] Kopp, Th.: Kleinwärmepumpe mit Ammoniak, Phase 2: Bau eines Funktionsmusters, Schlussbericht BFE 2001, ENET-Nr. 210137; Download ab [7].

- [4] von Böckh, P.: Stille Verdampfer für Luft-Wasser-Wärmepumpen, Schlussbericht BFE 1998, ENET-Nr. 9721060/1; Download ab [7].

- [5] Zürcher, O., Favrat, D., Thome, J.R., Kattan, N., Nidegger, E.: Local Heat Transfer Coefficient Prediction of Substitute Refrigerants with Smooth or Enhanced Surfaces, Schlussbericht BFE 1966, ENET-Nr. 9553972; Download ab [7].

- [6] Zogg, D., Shafai, E.: Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen, Phase 5: Test der Fehlerdiagnosesysteme, Schlussbericht BFE 2001, ENET-Nr. 210136; Download ab [7].

- [7] Download ab www.waermepumpe.ch/fe - Rubrik „Berichte“.