

Forschungsprogramm
Umgebungs- und Abwärme
Wärme-Kraft-Kopplung (UAW)

Jahresübersicht 1998 zum Forschungsprogramm UAW

Ausführliche Fassung

ausgearbeitet durch den Programmleiter
Dr. Martin Zogg
Kirchstutz 3, 3414 Oberburg

im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

Zusammenfassung

Wir benötigen in der Schweiz 75% der gesamten Nutzenergie in der Form von Wärme. Davon ist der grösste Teil Niedertemperaturwärme zur Raumheizung. Wir erzeugen diese heute hauptsächlich durch Verbrennen von Heizöl und Erdgas in Kesseln. Das entspricht in keiner Weise unseren heutigen technischen Möglichkeiten. Das Forschungsprogramm *Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung UAW* befasst sich mit der wesentlich effizienteren Nutzung der Umgebungswärme (Luft, Erdboden, Grund- und Oberflächenwasser) und von Abwärme (Gebäude, verfahrens- und energietechnische Prozesse) für die Produktion von Niedertemperaturwärme zur Raumheizung, für die Warmwasserbereitung und für industrielle Prozesse. Bei der Raumheizung haben Wärmepumpen im Neubaumarkt bereits einen Marktanteil von etwa einem Drittel erreicht. Im wesentlich grösseren Sanierungsmarkt liegt ihr Anteil jedoch noch unter 3%. Das Programm UAW möchte in diesem die Wissens- und Erfahrungslücken schliessen, um in Zukunft einen wesentlich höheren Anteil der **Niedertemperaturwärme aus Umgebungswärme und Abwärme** gewinnen zu können und um **industrielle Prozesse energetisch zu optimieren**.

Durch die Kombination von Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlagen mit Elektrowärmepumpen aber auch mit fortgeschrittenen Absorptionswärmepumpen lassen sich gegenüber den üblichen Öl- und Gasheizkesseln **bereits heute 30 bis 50% an Brennstoffen zur Raumheizung einsparen** und damit die **CO₂-Emission entsprechend reduzieren**. Für Neuentwicklungen, zur Effizienzsteigerung, zur Erhöhung der Betriebssicherheit und zur Reduktion der Kosten der genannten Systeme wurden im Jahr 1998 **die folgenden Hauptziele** verfolgt:

- Verbessern der Auslegungsgrundlagen für Wärmepumpen mit Erdwärmesonden
- Entwickeln optimaler Wärmepumpenheizungssysteme für Niedrigenergiehäuser.
- Bau eines Funktionsmodells einer Ammoniak-Kleinwärmepumpe mit.
- Entwickeln einer effizienten Wärmepumpe für den Sanierungsmarkt.
- Betriebsoptimierung von Blockheizkraftwerken und Entwickeln eines emissionsarmen Gasmotors.
- Ausarbeiten und Erproben neuer Methoden für den Test und die Regelung von Wärmepumpen und ganzen Wärmepumpenheizungssysteme.
- Weiterentwickeln der Methoden der Prozessintegration zur Reduktion des Energiebedarfs für Batch-Prozesse und die komplexere Haustechnik sowie Umsetzen der Methoden der Prozessintegration in die Praxis.

Dieser Bericht ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden.
Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor verantwortlich.

Weitere Exemplare können als ENET-Artikel 30919 bezogen werden bei:
ENET, Administration und Versand, Postfach 130, 3000 Bern 16
031-350-00-05 n+1@email.ch Fax 031-352-77-56.

Inhaltsverzeichnis

1	PROGRAMMÜBERSICHT UND PROGRAMMZIELE	5
2	DURCHGEFÜHRTE FORSCHUNGSARBEITEN UND ERGEBNISSE	9
	2.1 Wärmequellen	9
	2.1.1. Umgebungsluft	10
	2.1.2. Erdwärme	11
	2.1.2.1 Geothermische Eigenschaften des Schweizer Molassebeckens	11
	2.1.2.2 Berechnungsmodul für Erdwärmesondenfelder	13
	2.1.2.3 Aufladung von Erdwärmesonden	13
	2.2 Wärmeübertragung	15
	2.3 Wärmepumpen	16
	2.3.1. Swiss Retrofit Heat Pump - Wärmepumpe für den Sanierungsmarkt	16
	2.3.2. Kleinwärmepumpen mit Ammoniak	18
	2.3.3. Zweistufige Kleinwärmepumpe	19
	2.3.4. Wärmepumpe mit separatem Kreislauf zur Kondensatunterkühlung	20
	2.4 Blockheizkraftwerke	22
	2.4.1. Entwicklung eines emissionsarmen Gasmotors (<i>Swiss-Motor</i>)	23
	2.4.2. Betriebsoptimierung von Blockheizkraftwerken	24
	2.5 Systemoptimierung	24
	2.5.1. Raumheizung mit Wärmepumpen	24
	2.5.1.1 Auslegungsprogramme	25
	2.5.1.2 Dynamischer Wärmepumpentest	25
	2.5.1.3 Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen	26
	2.5.1.4 Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen	30
	2.5.1.5 Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe	32
	2.5.2. Integration verfahrens- und energietechnischer Prozesse	38
	2.5.2.1 Pinch-Methode in der Haustechnik	38
	2.5.2.2 Energetische Integration bei Batch-Prozessen	39
	2.5.2.3 Umsetzung der Pinch-Methode	39
3	ZUSAMMENARBEIT	41
	3.1 Nationale Zusammenarbeit	41
	3.2 Internationale Zusammenarbeit	42
	3.2.1. Bilaterale Kooperation mit Nachbarländern	42
	3.2.2. Beteiligung am IEA Wärmepumpenprogramm	43
	3.2.2.1 Heat Pump Centre (Annex16)	43
	3.2.2.2 Thermophysical Properties of Refrigerants (Annex 18)	44
	3.2.2.3 Compression Systems with Natural Working Fluids (Annex 22)	44
	3.2.2.4 Heat pumps for single room applications (Annex 23)	44
	3.2.2.5 Advanced Supermarket Refrigeration, Heat Recovery Systems (Annex 26)	44
	3.2.3. EU-Projekte	45
	3.2.4. International Institute of Refrigeration (IIR)	45
	3.2.5. Beteiligung am IEA Programm zur Prozessintegration	45
4	TRANSFER IN DIE PRAXIS	46

Programmübersicht und Programmziele		4
5	AUSBLICK AUF 1999	48
6	QUELLEN	50
	6.1 Forschungsprojekte im Jahr 1998	50
	6.2 Weitere Referenzen	52
	6.3 Internet-Adressen	53
	6.3.1. Referenzen	53
	6.3.2. Weitere nützliche Adressen	55
7	ANHANG: JAHRESBERICHTE DER PROJEKTLEITER	56

1 PROGRAMMÜBERSICHT UND PROGRAMMZIELE

In der Schweiz verlieren wir auf dem Weg von der Primärenergie zu der dem Benutzer zur Verfügung stehenden Nutzenergie rund 57%. Diese Verluste entsprechen keinem Naturgesetz. Wir haben es in der Hand, sie wesentlich zu reduzieren. Und wir müssen dies dringend tun. Nicht nur aus Sorge um eine Verteuerung der endlichen Vorräte an fossilen Brennstoffen oder aus Angst um die sich durch den gewaltigen CO₂-Ausstoss unserer technischen Zivilisation anbahnende Klimaveränderung. Wir müssen dies auch aus Solidarität zu jenem grossen Teil der Erdbevölkerung tun, die unseren Wohlstand noch nicht geniessen kann [25].

Noch stossender ist, dass bei uns 3.4% der Niedertemperaturwärme durch ohmsche Widerstandsheizung erzeugt werden. Aus thermodynamischer Sicht entsprechen nur die Niedertemperaturwärmeproduktion mit Wärmepumpen, Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen, Fernwärme und Wärme aus Kehrlichtverbrennungsanlagen dem Stand der Technik. Sie erreichen einen Gesamtanteil an der Niedertemperaturwärmeproduktion von 10.3%. Toleranz verdient Holz als erneuerbarer Energieträger. Holz trägt mit 2.9% mehr als zur Hälfte an die erneuerbaren Energien zur Raumheizung bei.

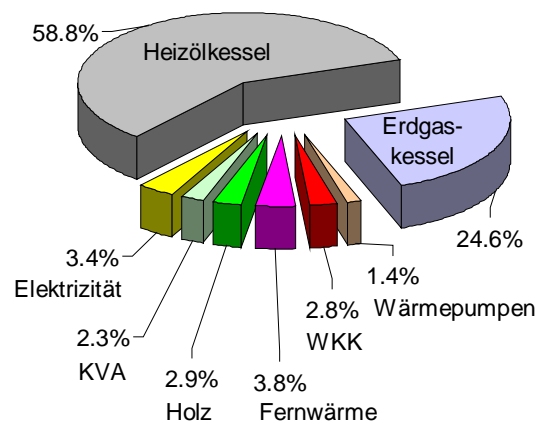


Bild 1: Schweizerische Produktion von Niedertemperaturwärme (1996), aus [25].

Bei der Niedertemperaturwärmeproduktion in Kesseln müssen wir den Hebel ansetzen. Hier liegt ein enormes Potential zur Reduktion des Verbrauchs an fossilen Brennstoffen. Die technische Lösung ist der Ersatz der Heizkessel durch eine Kombination von Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen oder von Kombikraftwerken mit Kompressionswärmepumpen zur Umgebungswärmenutzung. Bereits heute lassen sich mit diesen thermodynamisch sinnvolleren Systemen zur Raumheizung dank der Nutzung der Umgebungswärme **30% bis 50% an Brennstoffen zur Raumheizung einsparen** und damit die **CO₂-Emissionen** entsprechend **reduzieren**. Es ist zu hoffen, dass aus den heute erfolgreichen Einzelfällen morgen das selbstverständliche Heizsystem wird! Näheres in [27].

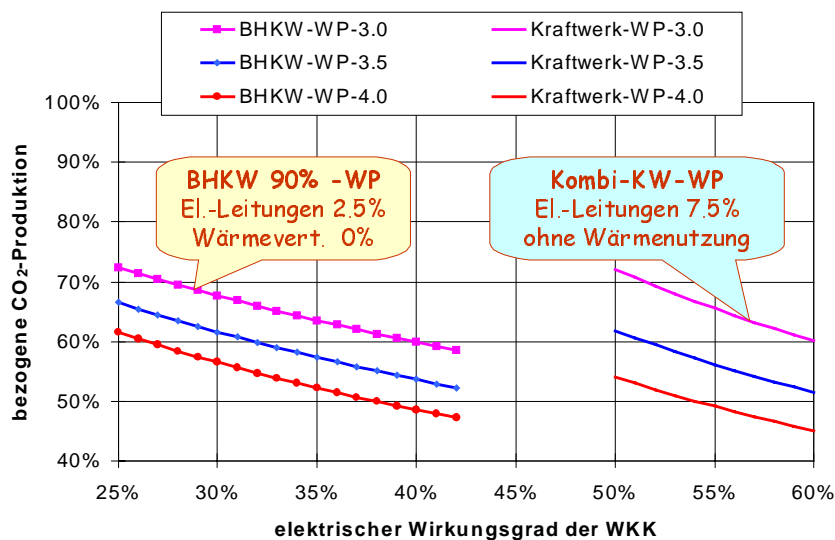


Bild 2: Kohlendioxid-Produktion (beziehungsweise Brennstoffbedarf) des Heizungssystems WKK-WP bezogen auf die Kohlendioxid-Produktion (beziehungsweise Brennstoffbedarf) eines Heizkessels mit einem auf den unteren Heizwert bezogenen Nutzungsgrad von 100% für die Erzeugung der gleichen Nutzwärme (linke Kurvenschar: Gesamtwirkungsgrad 90%, 2.5% Übertragungsverluste für die elektrische Energie, keine Verluste in der Wärmeverteilung) und für eine zentrale Stromproduktion in einem Kombi-Kraftwerk ohne Abwärmenutzung (rechte Kurvenschar, elektrische Übertragungsverluste 7.5%). Aus [27].

Ein Ersatz der Kesselheizungen durch effiziente Wärmepumpenheizungssysteme (WKK-WP oder GuD-WP) brächte somit einen **erheblichen Beitrag zur Senkung des Bedarfs an fossilen Brennstoffen und des Kohlendioxidausstosses**. Damit Einsparungen im oben gezeigten Ausmass möglich sind, müssen die Systemkomponenten oder Gesamtsysteme allerdings den nachstehenden **Bedingungen** genügen. Das Erfüllen dieser Kriterien ergibt auch die Leitlinie für eine Finanzierung von Forschungsprojekten im Rahmen dieses BFE-Forschungsprogramms *Umgebungswärme, Abwärme und Wärme-Kraft-Kopplung*. Näheres in [28]:

1. Die Produktion von Niedertemperaturwärme durch eine Kombination effizienter Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen mit modernen Kompressionswärmepumpen (**WKK-WP-System**) ergibt gegenüber Kesselanlagen bereits heute **Einsparungen an Brennstoffen** und damit an CO_2 -Ausstoss von **35% bis 50%**.
2. Um diese hohe Brennstoffeinsparung zu erzielen, sollen der **elektrische Wirkungsgrad der WKK-Anlagen wenigstens 33%**¹ und die **Jahresarbeitszahl der Kompressionswärmepum-**

¹ Auf den **unteren Heizwert** der eingesetzten Brennstoffe bezogene Wirkungsgrade.

pen wenigstens 3 betragen.

3. *Bei der Verbesserung des WKK-WP-Systems kommt einer **Erhöhung der Jahresarbeitszahl** der Wärmepumpen höchste Priorität zu. Begründung in [28].*
4. *Wenn keine geeignete zentrale Wärmeversorgung eingebaut werden kann, sind beim **Ersatz vorhandener Einzelraum-Elektrowiderstandsheizungen** durch Einzelraum-Elektrowärmepumpen Jahresarbeitszahlen unter 3 zulässig.*
5. *Bei der Verwendung **erneuerbarer Brennstoffe** (wie Holz, Klärgas, Deponiegas, Biogas) sind WKK-Anlagen auch bei elektrischen Wirkungsgraden unter 33% sinnvoll.*
6. *Auch die **Blockheizkraftwerke mit kleinen Leistungen** sind der Luftreinhalteverordnung zu unterstellen und sollen bei Gesamtwirkungsgraden von wenigstens 90% ebenfalls einen elektrischen Wirkungsgrad von 33% erreichen.²*
7. ***WKK-WP-Heizsysteme im Stromgleichgewicht** ermöglichen eine maximale Nutzung der Umgebungswärme für die Produktion von Niedertemperaturwärme. Sie erreichen deshalb **die höchste Brennstoffeinsparung und die höchstmögliche Reduktion des CO₂-Ausstosses** [26].*
8. *Eine **über den Eigenbedarf der WKK-WP-Heizsysteme im Stromgleichgewicht hinausgehende Stromproduktion durch effiziente WKK-Anlagen** (WKK-Betrieb ohne Stromverwertung durch Wärmepumpen) ist energetisch sinnvoll, wenn ein Wärmepumpenbetrieb infolge sehr hoher Vorlauftemperaturen oder Problemen mit geeigneten Wärmequellen nicht vertretbar ist und die Wärme vollständig genutzt wird.³*
9. *Mit Erdgas betriebene WKK-Anlagen sollten die **Emissionsgrenzwerte** der alten Luftreinhalteverordnung (LRV92) nicht überschreiten.⁴*

² Von den sich in Entwicklung befindenden **Brennstoffzellensystemen** sind auch für kleinere Einheiten bei sehr geringen Emissionen elektrische Wirkungsgrade über 33% zu erwarten. Die in letzter Zeit entwickelten **Kleinstblockheizkraftwerke** mit konventionellen Verbrennungsmotoren oder Stirlingantrieben erfüllen die Forderung eines minimalen elektrischen Wirkungsgrads von 33% dagegen klar nicht. Falls sie sich aus anderen Gründen (vorhandenes Wärmeverteilsystem mit hohen Vorlauftemperaturen, problematische Wärmequellen für die Wärmepumpe, vorhandene Infrastruktur) trotzdem durchsetzen, soll für eine entsprechende Emissionsüberwachung gesorgt werden.

³ Das WKK-WP-System im Stromgleichgewicht stösst an Grenzen, wenn bei den mit Wärmepumpen zu bedienenden Verbrauchern zu viele Heizungswärmeverteilsystemen mit sehr hoher Vorlauftemperatur existieren oder wenn die Erschliessung geeigneter Wärmequellen problematisch ist. Für die Deckung des Wärmebedarfs der durch das WKK-WP-System im Stromgleichgewicht schlecht versorgbaren Bezüger ist eine **zusätzliche Stromproduktion durch effiziente WKK-Anlagen** auch energetisch sinnvoll. Darüber hinaus sollte die Erzeugung von elektrischem Strom aus der Sicht eines minimalen Verbrauchs an Brennstoffen und einer maximalen Reduktion des CO₂-Ausstosses in hocheffizienten Kombikraftwerken erfolgen.

⁴ Nach der neuen LRV 98 übertreffen die **maximal zulässigen Stickoxidemissionen** von BHKWs jene von Kombikraftwerken wesentlich [28]. Das Einhalten der LRV 92 ist kein technisches

10. Die Kombination moderner **Kombikraftwerke ohne Abwärmenutzung** mit Wärmepumpen (GuD-WP-System) ist energetisch den besten WKK-WP-Systemen im Stromgleichgewicht gleichwertig.⁵

Es ist beizufügen, dass zur Bereitstellung der für Wärmepumpenanlagen benötigten elektrischen Energie der durch den **Ersatz von Elektrowiderstandsheizungen** durch Wärmepumpen frei werdende elektrische Strom und elektrischer Strom aus **Kehrichtverbrennungsanlagen** Priorität haben.

Forschungsschwerpunkt war im Bereich der **Abwärmenutzung** die Weiterentwicklung und die Verbreitung von **Methoden der Prozessintegration**. Diese führen zu einem systematischen Vorgehen für die optimale Konzeption neuer und die Verbesserung bestehender Produktionsanlagen der Verfahrens-, der Energie- und der komplexeren Haustechnik. Ziel der Prozessintegration ist es, einen Prozess mit gefordertem Durchsatz und geforderter Produktequalität mit einem minimalen Energie- und Ressourcenbedarf sowie minimalen Emissionen durchführen zu können. Die weitaus erfolgreichste **Pinch-Methode** wird infolge ihrer Einfachheit und hohen Anschaulichkeit sowie der leichten Eingriffsmöglichkeiten für den planenden Ingenieur für kontinuierliche Prozesse bereits mit Erfolg eingesetzt. Sie erlaubt, den Energiehaushalt komplexer Prozesse und ganzer Anlagen mit nur zwei Kurven darzustellen und energetisch optimale Lösungen systematisch zu konzipieren [32]. Diese Methode lässt sich auch für Stoffströme (beispielsweise zur Reduktion des Kühlwasserbedarfs, der Emissionen und des Abwasseranfalls einer Anlage) anwenden.

Im Forschungsprogramm UAW wurden **im Jahr 1998** die nachstehend aufgeführten **Hauptziele** verfolgt und im Wesentlichen bis zu den geplanten Etappenzielen erreicht:

- **Wärmequellen:** Für Luft als Wärmequelle wurde ein Funktionsmuster eines stillen Verdampfers gebaut und erprobt [5]. Das Hauptgewicht lag auf dem Verbessern der Auslegungsgrundlagen für Wärmepumpen mit Erdwärmesonden. So wurden wesentliche Beiträge zum Erfassen der geothermischen Eigenschaften des Schweizer Molassebeckens geleistet [8], die Wirkung einer oft diskutierten Regeneration von Erdwärmesonden im Sommer untersucht [1] und mit der Erweiterung des Programmbausteins *EWS* zur Simulation von Erdwärmesondenfeldern begonnen [11].
- **Wärmeübertragung:** Die Grundlagenuntersuchungen zur Verdampfung natürlicher Arbeitsmittel wurden auf Ammoniak mit löslichem Schmieröl ausgedehnt [20].
- **Wärmepumpen für den Sanierungsmarkt:** Mit dem Bau und der Erprobung eines Funktionsmusters einer Ammoniak-Kleinwärmepumpe werden neue Lösungen für natürliche Kältemittel gesucht [4],[6]. Mit der Untersuchung zweistufiger Kreisprozesse [19] und der Kondensatunterkühlung in einem zusätzlichen Wärmepumpen-

Problem – aber ein wirtschaftliches.

⁵ Die Kombination moderner **Kombikraftwerke ohne Abwärmenutzung** mit elektrischen Wirkungsgraden über 55% mit Wärmepumpen (GuD-WP-System) erreicht Nutzungsgrade, die den besten „WKK-WP-System im Stromgleichgewicht“ **durchaus ebenbürtig** sind [28] – und dies mit gemäss LRV 98 geringeren Stickoxidemissionen.

kreislauf [21], [22], wird das Problem des hohen Temperaturhubes im Sanierungsmarkt angegangen.

- **Blockheizkraftwerke:** Durch die Entwicklung eines emissionsarmen Gasmotors [18] sollen die Emissionsgrenzen der strengen Luftreinhalteverordnung 92 ohne Abgaskatalysatoren erreicht werden. Massnahmen gegen die oft viel zu geringen Betriebszeiten von Blockheizkraftwerken sollen durch eine Betriebsoptimierung [2] ausgearbeitet werden.
- **Systemoptimierung:** Zur exakteren Planung von Wärmepumpenheizungssystemen mit Computersimulationen wird ein dynamischer Wärmepumpentest ausgearbeitet [3]. Zur rascheren Betriebsoptimierung und zur Steigerung der Effizienz von Wärmepumpenheizungssystemen wird eine neue Kurztestmethode ausgearbeitet [23], [12] und eine neue wärmepumpengerechte Regelung entwickelt [7]. Für die speziellen Anforderungen von Niedrigenergiehäusern wurden optimale Wärmepumpenheizungssysteme vorgeschlagen und mit anderen Heizungsarten verglichen [13], [14], [15].
- **Prozessintegration:** Die Methoden der Prozessintegration werden zur Reduktion des Energiebedarfs von Batch-Prozessen [16] weiterentwickelt. Mit der Ausarbeitung eines Handbuchs und der Durchführung von Kursen wurden wesentliche Schritte zum Umsetzen der bei uns noch viel zu wenig bekannten Methoden der Prozessintegration in die Praxis getan [10]. Weiter werden Wege zur systematischen Konzipierung komplexerer Anlagen der Haustechnik mit der Pinch-Methode gesucht [9].

Leider erlitt die Realisierung der geplanten **Swiss Retrofit Heat Pump** (Wärmepumpe für den Sanierungsmarkt) eine erhebliche Verzögerung. Mit einer neuen Ausschreibung [WWW 1] wird der sich an mehreren Stellen anbahnenden technischen Entwicklung in dieser Richtung Rechnung getragen.

2 DURCHGEFÜHRTE FORSCHUNGSARBEITEN UND ERGEBNISSE

Nachfolgend wird über die 1998 im Forschungsprogramm *Umgebungswärme, Abwärme und Wärme-Kraft-Kopplung (UAW)* durchgeführten Forschungsarbeiten berichtet. Die Hauptergebnisse der abgeschlossenen Arbeiten werden zusammenfassend dargestellt. Die noch laufenden Forschungsarbeiten werden mit einem Hinweis auf die entsprechenden ausführlichen Jahresberichte im Anhang nur kurz beschrieben.

2.1 Wärmequellen

Bei der Nutzung der Umgebungsluft als wichtigste Wärmequelle für Wärmepumpen wird die Machbarkeit eines Verdampfers mit luftseitig freier Konvektion angegangen. Die Auslegung von Erdwärmesonden wird von den noch üblichen groben Faustformeln zu fundierteren Methoden vorangetrieben.

2.1.1 Umgebungsluft

Wärmepumpen mit Umgebungsluft als Wärmequelle sind im allgemeinen mit Ventilatoren zur Zwangsumwälzung ausgerüstet. Diese weisen einen erheblichen Bedarf an elektrischer Antriebsleistung (Größenordnung 10% jener des Kompressors) auf. In diesem Projekt wurde deshalb untersucht, ob man mit Verdampfern, bei denen die Umgebungsluft nur durch freie Konvektion bewegt wird, ähnliche Jahresarbeitszahlen erreicht [5]. Solche „stillen Verdampfer“ benötigen zwar infolge des geringeren luftseitigen Wärmeübergangs eine deutlich grössere Oberfläche – sie arbeiten aber völlig geräuschlos.

Für diese Untersuchung wurde eine Versuchswärmepumpe mit stillem Verdampfer (R134a, Heizleistung von 6 kW bei einer Aussentemperatur von $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$) gebaut und ausgemessen. Die Wärmeabgabeseite wurde über einen Wärmeübertrager und Kühlwasser simuliert. Dabei wurde der „Heizkreislauf“ so reguliert, dass die gleichen Heizkurven wie in der in einem Einfamilienhaus in Erschwil eingebauten und ausgemessenen Wärmepumpenanlage gefahren werden konnten. Diese konventionelle Vergleichswärmepumpe ist mit Ausnahme des konventionellen Verdampfers mit Ventilator baugleich wie die Versuchswärmepumpe. Die mit der Versuchsanlage Susi („super silent“) erreichten Leistungszahlen sind wider dem allgemeinen Empfinden etwas höher ausgefallen als jene der konventionellen Ventilatorwärmepumpe Erschwil. Die Hochrechnung dieser Jahresergebnisse mit Meteodaten für Binningen und den im [Bild 3](#) dargestellten Leistungszahlen für stationären Betrieb ergab für die Versuchsanlage mit stillem Verdampfer eine Jahresarbeitszahl von 3.5

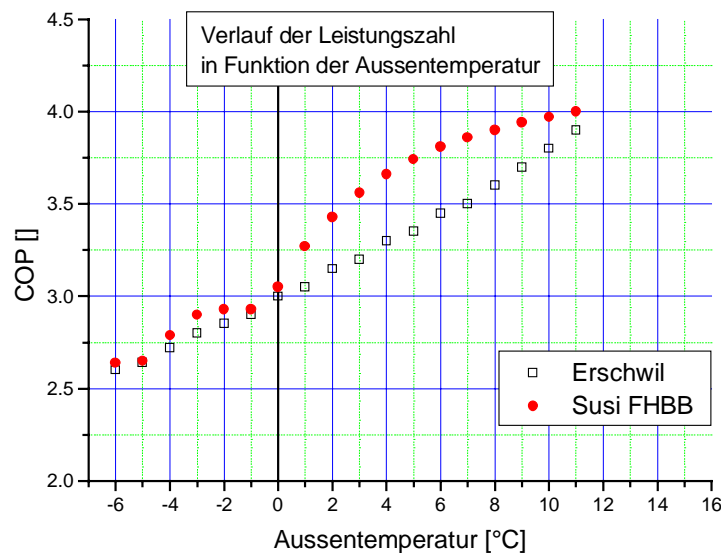


Bild 3: Vergleich der Leistungszahlen der Wärmepumpe mit stillem Verdampfer (Susi für „super silent“) mit den Werten bei konventionellem Ventilatorverdampfer (Erschwil, Ventilatorleistung berücksichtigt), aus [5].

Die entsprechend für die konventionelle LW-Wärmepumpe berechnete Jahresarbeitszahl beträgt nur 3.3. Da die Kompressoren in der Versuchsanlage und in Erschwil nicht ausgemessen wurden und weil die Anlage Erschwil nicht unbedingt mit optimaler Ventilatorleistung betrieben wird, lässt sich aus den vorliegenden Untersuchungen aller-

dings noch keine generelle Aussage einer Überlegenheit stiller Verdampfer postulieren. Das Projekt hat aber gezeigt, dass stille Verdampfer durchaus eine ernstzunehmende Variante zu denjenigen mit Ventilatoren darstellt.

Beide Wärmepumpen wurden mit variabler Drehzahl betrieben. Als Besonderheit wurde die Abtauung in der Versuchswärmepumpe über eine Gewichtsmessung mit Dehnmessstreifen ausgelöst und beendet. Dank einer speziellen Geräuschkämpfung für den Kompressor und dem Wegfall des Ventilators ist die Versuchswärmepumpe im Betrieb kaum zu hören. Im stillen Verdampfer wurden mit den handelsüblichen thermostatischen Expansionsventilen infolge längerer Verweilzeiten des Arbeitsmediums im Verdampfer erst bei Überhitzungen von 15 bis 20 °C ein stabiler Betrieb erreicht. Neue Lösungen für die Regelung sind hier noch zu finden. Weiter soll auch noch eine Splitlösung mit stillen Wandverdampfern untersucht werden.

Stille Verdampfer erwiesen sich somit auch bei modernen Wärmepumpen als **physikalisch durchaus interessant**. Sie führen aber zu grösseren Bauvolumen. Diese dürften von den Wärmepumpenkunden kaum geschätzt werden. Auch die vorgeschlagene Wandverdampfervariante dürfte mit Akzeptanzproblemen zu kämpfen haben.

2.1.2 Erdwärme

Erdwärme ist nach Umgebungsluft die wichtigste Wärmequelle für Wärmepumpen. Erdwärmesonden sind nur bei richtiger Dimensionierung langfristig erfolgreich. Zwischen zu geringen Sondenlängen (Unterdimensionierung) und unnötig hoher Pumpleistung (Überdimensionierung) ist sorgfältig zu optimieren. Zu diesem Zweck bedürfen die Auslegungsgrundlagen noch erheblicher Ergänzungen. Auch die immer wieder diskutierte Frage nach der Notwendigkeit einer aktiven Regeneration im Sommer wurde geklärt.

2.1.2.1 Geothermische Eigenschaften des Schweizer Molassebeckens

Die Ergebnisse von Auslegungsprogrammen für Wärmepumpenanlagen mit Erdwärmesonden als Wärmequellen sind nicht verlässlicher als die eingegebenen relevanten Stoffwerte des Erdbodens am Erdwärmesondenstandort. Hier liegt das schwächste Glied in der Auslegungskette. Mit dem Vorhaben **Geothermische Eigenschaften des Schweizer Molassebeckens** [8] wurde mit dem Schliessen dieser empfindlichen Lücke begonnen. Aus vorhandenen Gesteinsproben von früheren Bohrungen und zusätzlichen Labormessungen soll zunächst ein flächendeckender Datensatz der Wärmeleitfähigkeit, der spezifischen Wärmekapazität und der Dichte für das schweizerische Mittelland bis zu einer Tiefe von 500 m bereitgestellt werden: Bild 4.

Über 40 private und öffentliche Institutionen wirkten bei der Beschaffung der Daten mit. Zur Verwendung bei der Auslegung von Wärmepumpenheizanlagen mit Erdwärmesonden sollen Interpolationsmethoden für die Abhängigkeit dieser Stoffwerte und der Temperatur an der Erdoberfläche in Funktion der Region, der Tiefe, der geologischen Einheit und der Gesteinsart ausgearbeitet werden. Darauf aufbauend ist schliesslich ein einfach zu bedienendes **PC-Programm für Planer** von Erdwärmesondenanlagen zur Prognose der geothermischen Stoffwerte für einen beliebigen Standort im schweizerischen Mittelland zu entwickeln und zu testen.

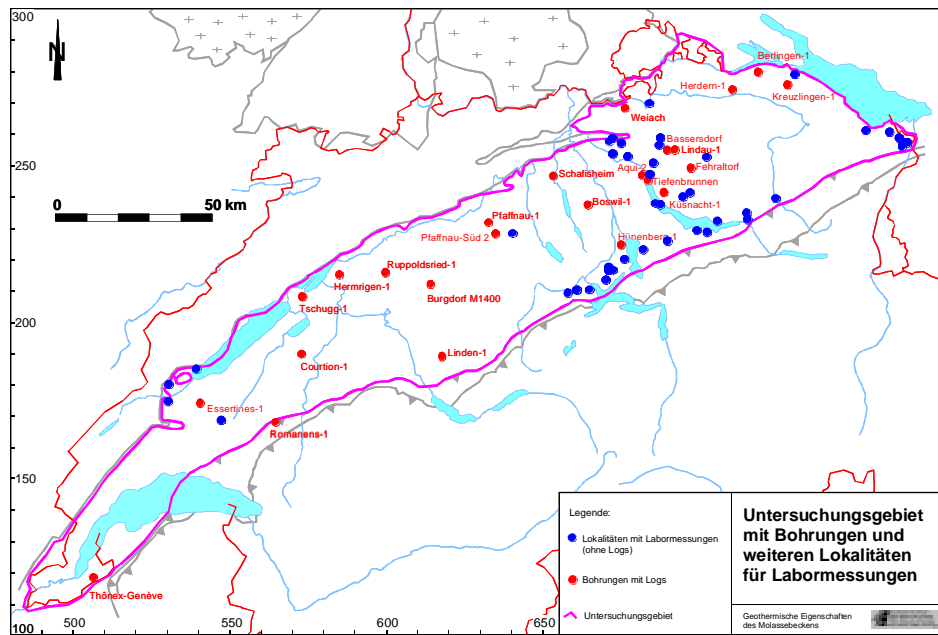


Bild 4: Untersuchungsgebiet mit Bohrungen und zusätzlichen Labormessungen, aus [8].

Im Berichtsjahr konnten Beziehungen zwischen der Wärmeleitfähigkeit und Sonic-Logwerten sowie zwischen der Wärmekapazität und der Gesteinsdichte für fünf Gesteinstypen gefunden werden. Damit können die geothermischen Stoffwerte bei fehlenden Borlogs (Probenmaterial aus Bohrungen) interpoliert werden. Erste Auswertungen des Probenmaterials zeigen, dass regionale und tiefenbezogene Trends in den geothermischen Eigenschaften des Molassebeckens bestehen.

Das Computerprogramm soll die Stoffwerte des Erdbodens in der mit Feuchtigkeit gesättigten Molasse für die vorkommenden 8 Gesteinstypen und 3 Molassegruppen aus zahlreichen Messungen im CH-Mittelland durch Interpolation berechnen. Für die darüber liegende Quartärschicht (Lockergestein) sind die Verhältnisse wesentlich schwieriger. Hier soll das Programm wenigstens für den Fall fehlender Wasserströme Eingabewerte vorschlagen. Das Programm soll weiter die Oberflächentemperatur aufgrund der mittleren Jahrestemperatur (Basis Meteoronorm) und einer empirischen Korrektur berechnen. Das in Access 97 geschriebene Programm funktioniert in einer Vorversion. Die Datenbankabfrage erfolgt über eine Eingabemaske. Nach verschiedenen internen Plausibilitätskontrollen werden für den abgefragten Standort tiefenbezogene geothermische Werte berechnet und in einer Graphik dargestellt.

Nach dem für das erste Quartal 1999 geplanten Abschluss der Arbeiten stehen für Berechnungen mit Computerprogrammen verlässlichere Daten für den Grenzfall ohne Grundwasserströme zur Verfügung. Eine bessere Auslegungssicherheit führt nicht nur zu wirtschaftlicheren Anlagen. Sie ermöglicht auch in vielen Fällen die Verwendung von reinem Wasser statt Ethylenglykol als Wärmeträger. Dies wirkt sich durch den besseren Wärmeübergang in Sonde und Verdampfer (geringere Temperaturdifferenz) und die geringere Pumpleistung sehr positiv auf die Jahresarbeitszahl aus.

2.1.2.2 Berechnungsmodul für Erdwärmesondenfelder

Über das für Computersimulationen entwickelte und validierte **Berechnungsmodul EWS für die Ermittlung der Soleaustrittstemperatur aus einzelnen Erdwärmesonden** wurde in [35] bereits berichtet. Dieses vermag das Verhalten von einzelnen Doppel-U-Sonden einschliesslich der Dynamik beim Anfahren und Takten über mehrere Jahre sehr gut wiederzugeben. Auch die Wiederauffüllung des Temperaturtrichters bei Unterbrüchen des Wärmebezugs wird korrekt erfasst. Als Vorteil gegenüber bestehenden Programmen mit vergleichbaren Fähigkeiten rechnet das neue Programmmodul *EWS* wesentlich rascher. Grund dafür ist eine geschickte Kombination einer numerischen Simulation (*Crank-Nicholson*) im "Erdbodenzyylinder" des Nahbereichs von 1 bis 2 m um die Sonde mit einer periodischen analytischen Erfassung (Linienquelle, „Trichterformel“) des ausserhalb liegenden Bodenbereichs.

Das bisherige Berechnungsmodul *EWS* beschränkte sich auf Einzelsonden. Oft werden aber mehrere benachbarte Erdwärmesonden verwendet. Dann beeinflussen sie sich gegenseitig. Das Programm *EWS* wird deshalb in einem neuen Projekt [11] zum **Erfassen von Erdwärmesondenfeldern** ausgebaut. Es ist vorgesehen, dazu eine bereits 1987 von Eskilson entwickelte Antwortfunktionenmethode einzusetzen und die Resultate des neuen Programms mit jenen der dreidimensional rechnenden Simulationsprogramme *SBM / TRNSBM* für Doppelsonden sowie Sondenfelder von 3x6, 10x5 und 10x10 Sonden zu vergleichen. Der Abschluss des Projekts ist für 1999 geplant.

2.1.2.3 Aufladung von Erdwärmesonden

Die **solare Aufladung von Erdwärmesonden** mit Überschusswärme von Solaranlagen im Sommerhalbjahr steht immer wieder zur Diskussion. Ein gewisses Interesse an einer Wiederaufladung besteht insbesondere bei höher belasteten Erdwärmesondenfeldern von Mehrfamilienhäusern. Eine interessantere Variante für eine aktive Sommerregenerierung ist die "**sanfte Raumkühlung**" (Sommerkühlbetrieb mit Soleumwälzung mit - im einfachsten Fall - Raumkühlung über das Heizungssystem), da diese Form der Wiederaufladung eine willkommene Komfortsteigerung bringt.

In einer **Potentialstudie** 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 [1]. Die rechnerischen Abschätzungen wurden für ein Mehrfamilienhaus (geringer Sommerkühlbedarf) und für ein Bürogebäude (grosser Sommerkühlbedarf) durchgeführt. Dabei wurde das Gebäude mit dem Programm *HELIOS* und die Erdwärmesonden mit dem Programm *EED* erfasst. Beim *EWS*-Feld wurde der für eine Regeneration optimale Fall eines vernachlässigbaren Wärmetransports durch Wasserströme angenommen. Der Kühlbetrieb wurde ab Raumtemperaturen über 26°C, der Heizbetrieb für Raumtemperaturen unter 20°C angenommen.

Das Mehrfamilienhaus wurde für reine Sommerkühlung sowie einen geringen und einen hohen Eintrag an solarer Überschusswärme untersucht. Beim Bürogebäude erfolgte die Regeneration ausschliesslich durch eine hohe Kühlleistung im Sommer: Bild 5. Als Sondenfelder wurden einfache und doppelte Reihenanordnungen mit Doppel-U-Sonden, unterschiedlichen Sondenabständen (5..18 m), Wärmestromdichten (Sondenbelastung, 35..75 W/mK) und Sondenlängen (65..200 m) untersucht.

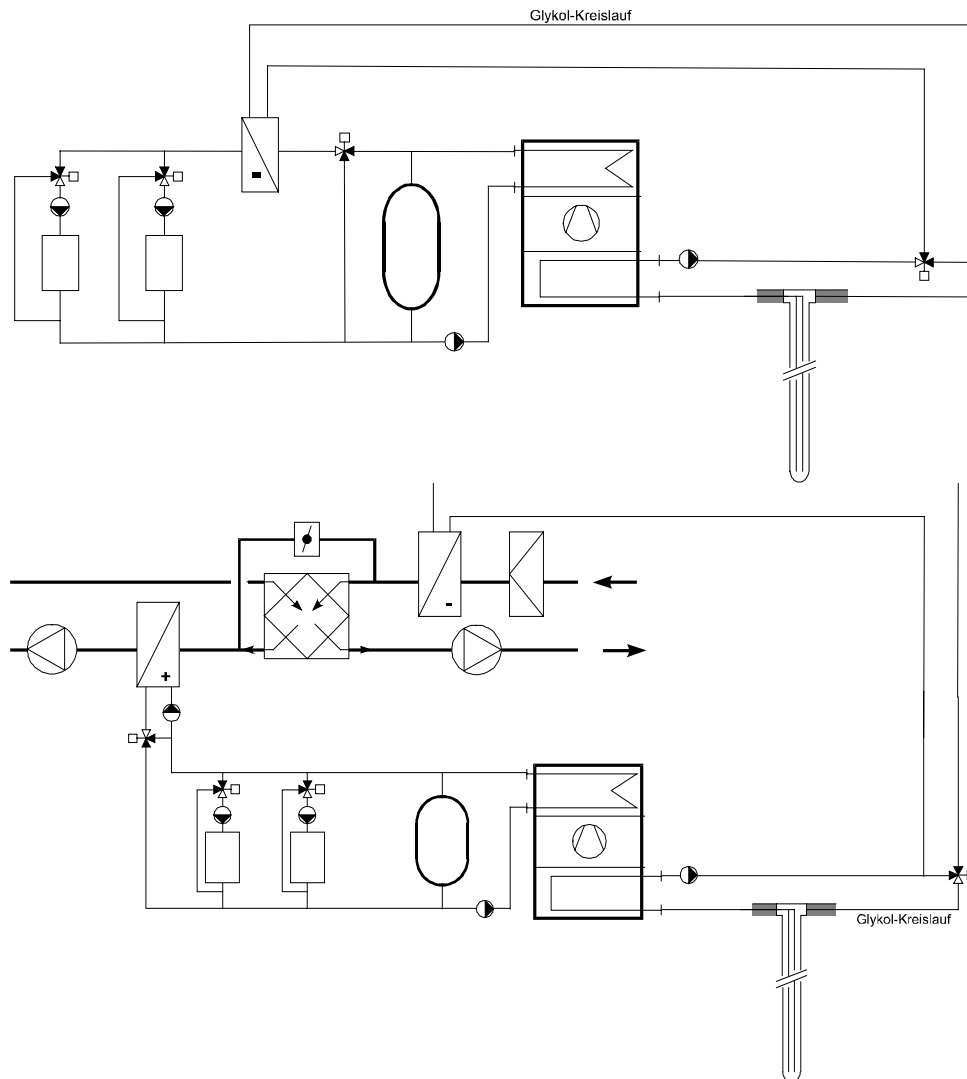


Bild 5: Gebäudekühlung im Sommer als interessantester Regenerationsfall. Oben Kühlung mit Fussbodenheizung, unten Kühlung mit Lüftungsanlage [1].

Beim untersuchten **Mehrfamilienhaus** zeigte sich klar, dass sich eine **Regeneration** des Edwärmesondenfeldes **weder energetisch noch wirtschaftlich lohnt**. Der Aufwand zur Soleumwälzung übertrifft die leichte Erhöhung der mittleren Leistungszahl. Die mit Berücksichtigung der Soleumwälzung bei der Regeneration des EWS-Feldes errechneten Jahresarbeitszahlen sind ohne und mit solarer Regeneration des EWS-Feldes etwa gleich gross.

Beim Bürogebäude mit Raumkühlung lag die dem EWS-Feld beim Wärmepumpenbetrieb entzogene Wärme in der gleichen Grössenordnung wie die im Sommer durch die Raumkühlung zugeführte. Hier ergab sich nach der Verrechnung der für die Umwälzung des Wärmeträgers (Wasser/Ethylenglykolgemisch und reines Wasser) benötigten Energie noch eine geringfügige Erhöhung der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe, wenn die **Raumkühlung ausschliesslich über das EWS-Feld** erfolgt. Weil dann auf eine Kältemaschine mit entsprechendem Wartungsaufwand verzichtet werden kann, ergab sich im untersuchten Fall eine Reduktion der Gesamtkosten um 12% gegenüber der konventionellen Raumkühlung durch eine Kälteanlage. Dank der Auslegung auf den Kühlfall und dem Wärmeeintrag durch die sanfte Kühlung ergibt sich eine höhere Wärmeträgertemperatur. Im Sondenkreislauf kann als Folge reines Wasser statt dem

üblichen Wasser/Ethylenglykolvermischung verwendet werden. Ein energetischer und ein ökologischer Gewinn!

Die an den erwähnten Beispielen gewonnenen Erkenntnisse werden aufgrund dimensionsloser Sprungantwortfunktionen (g-function von Eskilson) verallgemeinert. Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass eine Regeneration nur sinnvoll ist, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

1. Die im Jahr eingetragene Wärme muss die Größenordnung der durch die Wärmepumpe entzogenen Wärme erreichen.
2. Das EWS-Feld muss durch den WP-Betrieb stark belastet sein und aus vielen Sonden bestehen (-> Anordnung in Richtung eines saisonalen Erdspeichers).
3. Die Regeneration muss wie bei der Raumkühlung zu einer Komfortsteigerung und/oder zu einem Wegfall anderer Geräte und Maschinen führen.

Solaranlagen zur Warmwasserbereitung tragen durch Vermeidung des Wärmeentzugs aus den Sonden im Sommer zur natürlichen Regeneration bei. Eine direkte Sommeraufladung von Erdwärmesonden über normal dimensionierte Warmwasser-Solaranlagen mit Deckungsgraden von 30% bis 60% ist dagegen energetisch und wirtschaftlich nicht sinnvoll. Nur bei sehr gross dimensionierten Solaranlagen und Gebieten mit hoher Sondendichte lohnt sich eine fallweise Überprüfung eines Regenerationsnutzens.

2.2 Wärmeübertragung

Zur Auslegung von Verdampfern für Wärmepumpen und Kälteanlagen ist man auf eine hinreichend genaue Vorausberechenbarkeit des Wärmeübergangskoeffizienten und des Druckverlusts beim Verdampfen angewiesen. Nach dem Ersatz der ozonschichtschädigenden FCKW-Kältemittel (Fluorchlorkohlenwasserstoffe) durch die alternativen synthetischen Kältemittel FKW (Fluorkohlenwasserstoffe) stehen auch diese wegen ihrer Langlebigkeit und toxischer Abbauprodukte (Trifluoressigsäure) zur Diskussion. Deshalb beginnt auch bei immer kleineren Wärmepumpen trotz ihrer Brennbarkeit ein Zurück zu den alten, natürlichen Kältemitteln. Unter diesen nimmt Ammoniak infolge seiner für Kaldampfprozesse hervorragenden Stoffwerte, der leichten Erkennbarkeit geringster Lecks und der Möglichkeit, einer einfachen Adsorption oder Absorption im Leckagefall eine besondere Stellung ein.

Wissenslücken bestehen hier insbesondere noch beim Wärmeübergang beim Verdampfen von Gemischen aus Ammoniak und löslichen Schmierölen. Die Untersuchungen wurden deshalb auf die Verdampfung von Ammoniak-Öl-Gemischen in glatten und strukturierten Rohren ausgedehnt.

Nach diversen Verzögerungen beim Umbau (Ersatz gegen Ammoniak nicht beständiger Komponenten, diverse messtechnische Verbesserungen) der bereits früher beschriebenen Versuchsanlage [35] konnten Messungen des Wärmeübergangs und des Druckverlusts bei der Verdampfung von reinem Ammoniak und von Ammoniak-Öl-Gemischen mit Öl-Massenanteilen von 1% und von 3% in einem Massenstromdichtenbe-

reich von 20 bis 140 kg/m² s und einem Heizflächenbelastungsbereich von 5 bis 70 kW/m²s in glatten und strukturierten Rohren durchgeführt werden [20]. Aufgrund der Messergebnisse wurde die an diversen synthetischen Kältemitteln getestete Zweiphasenströmungskarte für die Abgrenzung zwischen geschichteter und geschichtet-welliger Zweiphasenströmung modifiziert. Die bisher nur an synthetischen Kältemitteln getestete Korrelation zur Berechnung des örtlichen Wärmeübergangskoeffizienten bei der Verdampfung in glatten Rohren wurde aufgrund der zusätzlichen Messungen mit Ammoniak ebenfalls verbessert.

Wie bereits bei den synthetischen Kältemitteln, zeigte sich auch beim Gemisch Ammoniak-Öl bei höheren Durchsätzen (Messungen mit 50 und 80 kg/m²s) und kleinem Dampfmassengehalt nur ein geringer Einfluss des löslichen Schmieröls. Ab einem Dampfmassengehalt über 70% wurde dagegen ein starker Abfall des Wärmeübergangskoeffizienten beobachtet. Bei strukturierten Rohren und kleinem Durchsatz (20 kg/m²s) wurde eine Ölansammlung an der Rohroberfläche beobachtet. Diese führt bei einem Dampfmassengehalt über 40% zu äusserst geringen Wärmeübergangskoeffizienten. Strukturierte Rohre sollen demzufolge für Ammoniak-Öl-Gemische bei kleinen Massenstromdichten nicht eingesetzt werden! Eine weitere Erkenntnis ist von praktischem Interesse: Strukturierte Rohre erreichen bei reinem Ammoniak und grossen Durchsätzen (Bereich der Ringströmung) keine höheren Wärmeübergangskoeffizienten als glatte Rohre. Erstaunlicherweise wurden mit Schmieröl leicht geringere Druckverluste gemessen als ohne. Eine Begründung dafür konnte noch nicht gegeben werden. Die neuen Berechnungsgleichungen für den Wärmeübergang und den Druckverlust sind an den experimentellen Ergebnissen zu testen und gegebenenfalls zu verbessern. Dies ist von besonderem Interesse, weil Ammoniak gegenüber den FKW chemisch verschieden ist.

2.3 Wärmepumpen

Bei den Wärmepumpen konzentrierten sich die Forschungsarbeiten auf die Erhöhung der Effizienz beim Einsatz im Sanierungsmarkt mit Luft als Wärmequelle. Dabei sind für einen monovalenten Betrieb bei tiefen Aussentemperaturen eine hohe Wärmeleistung und eine gute Leistungszahl von besonderer Bedeutung.

2.3.1 Swiss Retrofit Heat Pump - Wärmepumpe für den Sanierungsmarkt

Um die 400'000 Kesselheizungen sind in der Schweiz in den kommenden Jahren zu ersetzen. Im **Sanierungsmarkt** liegt deshalb ein grosses Marktpotential für den Einsatz von Wärmepumpen. Die Wärmepumpe kann sich an diesem Markt nur einen wesentlichen Anteil sichern, wenn es möglich wird, eine effizientere Wärmepumpe zu einem gegenüber heutigen Aggregaten um 30% bis 50% günstigeren Preis anzubieten. Dieses Ziel ist nur erreichbar, wenn es gelingt, möglichst viele „**Wärmepumpenkräfte**“ in unserem Land für die gemeinsame Entwicklung und Produktion einer neuen Wärmepumpe, der **Swiss Retrofit Heat Pump**, zu vereinen. Die neue SRHP soll gegenüber den heutigen Wärmepumpen

- eine **höhere Jahresarbeitszahl** bei **kleinerem Speichervolumen** erreichen,

- den Betrieb mit **Vorlauftemperaturen bis 60°C** ermöglichen,
- umweltverträgliche **Kältemittel** verwenden und
- dank **modularem Aufbau** und **Serieproduktion** kostengünstiger werden.

Zur Entwicklung einer entsprechenden Wärmepumpe mit intelligenter Regelung hat das Bundesamt für Energie ein detailliertes **Pflichtenheft** aufgestellt. Dieses kann von [WWW 1] heruntergeladen werden. Da sich im Anschluss an eine erste Ausschreibung im Jahre 1997 mehrere Schweizer Hersteller unabhängig um die Realisierung einer SRHP bemühen, musste die ursprüngliche Idee der Konzentration auf eine gemeinsame Entwicklung fallen gelassen werden.

Neues Vorgehen

An der Entwicklung der *Swiss Retrofit Heat Pump* kann sich jede Firma beteiligen, die bereit ist, in der Schweiz zu entwickeln und zu produzieren. Das Bundesamt für Energie will die Ergebnisse der Firmenentwicklungen in der Form von Prototypen anstelle von Offerten vergleichen. Es möchte deshalb künftige wegweisende Entwicklungen verschiedener Firmen fallweise unterstützen. Dazu schlägt das Bundesamt für Energie für die Entwicklung der *Swiss Retrofit Heat Pump* das folgende neue Vorgehen vor:

1. Jeder Wärmepumpenhersteller **kann bis zum 30. März 2000 einen Prototypen einer Retrofit-Wärmepumpe** nach dem BFE-Pflichtenheft mit eigenen Mitteln in einer Art Wettbewerb entwickeln. Falls dabei neue Vorhaben verfolgt werden, können dem BFE entsprechende **Forschungsofferten** eingereicht werden. Das Bundesamt für Energie wird diese Offerten nach den üblichen Kriterien für Forschungsprojekte beurteilen und gute Vorhaben von allgemeinem Interesse im Rahmen seiner finanziellen Möglichkeiten unterstützen. Die Ergebnisse dieser unterstützten Vorhaben müssen über einen Bericht öffentlich zugänglich werden. Sie sind dann durch jedermann nutzbar. Eine Patentanmeldung ist vor der Publikation der entsprechenden Berichte im Rahmen der üblichen BFE-Vertragsbestimmungen möglich. (Download dieser Bestimmungen über [WWW 1]).
2. Im **April/Mai 2000** werden die für den Vergleich bereitstehenden Prototypen durch das Bundesamt für Energie im Hinblick auf die Tauglichkeit als Sanierungswärmepumpe **vorgeprüft**. Dazu müssen eine vollständige technische Dokumentation inklusive eigener Messergebnisse eingereicht werden. Diese Dokumentation muss entsprechend dem Pflichtenheft der SRHP (Download über [WWW 1]) gegliedert sein und ist dem Bundesamt für Energie bis spätestens am 31. März 2000 zuzustellen (Datum des Poststempels).
3. Die Prototypen, welche die oben erwähnte Vorprüfung durch das Bundesamt für Energie bestanden haben, werden anschliessend auf Kosten des BFE der **üblichen Messung nach EN 255 an einer neutralen Prüfstelle** unterzogen. Parallel dazu wird unter Kostenbeteiligung des Bundesamts für Energie eine **Analyse der mutmasslichen Kosten des Serieprodukts** durchgeführt.
4. Im Winter 2000/01 werden zwei bis drei **Prototypen mit dem besten Leistungs-/Preisverhältnis**, welche die Forderungen des SRHP-Pflichtenhefts erfüllen, einem Feldtest unterzogen und dabei im Rahmen eines BFE-P+D-Projekts kritisch beglei-

tet.

5. Aufgrund der Ergebnisse des Labor- und des Feldtests sowie der Kostenanalyse wird **der beste Prototyp im Frühjahr 2001** mit einer BFE-Publikation der Öffentlichkeit vorgestellt. Die erfolgreiche Firma muss für ihre Entwicklung gleichzeitig einen schweizerischen Hersteller von Serieprodukten und einen Marketingspezialisten auf eigene Kosten gewinnen.
6. Das Bundesamt für Energie empfiehlt diesen Prototypen der KTI (Kommission für Technologie und Innovation) zur **Entwicklung bis zur Seriereife von 2001 bis 2002**. In dieser Phase müssen nebst dem Entwickler des besten Prototypen der künftige schweizerische Hersteller und ein Marketingspezialist mitwirken.

2.3.2 Kleinwärmepumpen mit Ammoniak

Ammoniak hat sich als natürliches Kältemittel dank seiner **hervorragenden thermodynamischen Eigenschaft** bei Grossmaschinen bereits klar durchgesetzt. Die alternativen Fluorkohlenwasserstoff-Kältemittel (FKW) sind zwar keine Gefahr mehr für die Ozonschicht. Es sind aber naturfremde Stoffe, die schlecht abgebaut werden und ein hohes Treibhauspotential aufweisen. Befürchtungen über schädliche Auswirkungen toxischer Abbauprodukte (Trifluoressigsäure) lassen einen raschen Übergang zu natürlichen Kältemitteln ratsam erscheinen. Für Kleinwärmepumpen wird deshalb im nord-europäischen Ausland mehr und mehr Propan als Kältemittel eingesetzt. Thermodynamisch noch günstiger wäre das bei Grosswärmepumpen bereits übliche Ammoniak. Auch die **leichte Absorption oder Adsorption** im Falle eines Lecks spricht für Ammoniak. Vorab infolge seiner Giftigkeit, seiner Brennbarkeit des für den Wärmepumpenbetrieb hohen Druckverhältnisses und der Notwendigkeit der Verwendung von kupferfreien Werkstoffen wurde es aber für Kleinwärmepumpen bisher nicht eingesetzt.

Da Ammoniak auch für Kleinwärmepumpen trotzdem immer wieder zur Diskussion steht, wurden die **thermodynamischen Eigenschaften** einer NH₃-Wärmepumpe im **Wärmeleistungsbereich von 6 bis 25 kW** gegenüber entsprechenden Wärmepumpen mit Propan, R407C und R22 (als Vergleichsbasis) im Rahmen des Forschungsprojektes „Kleinwärmepumpe mit Ammoniak“ [4] untersucht. Dabei wurde auch ein neues Adsorptionsmittel als „Ammoniakfalle“ für den Leckagefall getestet.

Vergleichsrechnungen mit fiktiven hermetischen Kleinkompressoren für Ammoniak ergaben für Luft/Wasser-Wärmepumpen mit einer Heizleistung von 6 bis 25 kW mit Ammoniak gegenüber R22, Propan und R407C **um rund 15% höhere Leistungszahlen**. Diese Vergleichsrechnungen wurden mit Messergebnissen in Töss validiert. Falls aus Sicherheitsgründen im Luftkühler mit einem Wasser-Ethylenglykol-Gemisch und einem indirekten Verdampfer gefahren würde, verlöre man allerdings den Vorteil einer höheren Leistungszahl.

Für Kleinverdichter mit Antriebsleistungen unter 50 kW sind heute nur offene Kompressoren erhältlich. Diese weisen infolge zusätzlicher Wärmeverluste einen geringeren Wirkungsgrad auf. Der beschriebene thermodynamische Vorteil für Ammoniak als Kältemittel verschwindet damit leider weitgehend. Nur bei kleinen Temperaturhuben ergibt die Vergleichsrechnung bei Ammoniak noch etwas höhere Leistungszahlen.

Beim Verdichtungsverhältnis hat Propan „die Nase vorn“. Es liegt hier auch für die im Sanierungsmarkt nötigen Temperaturhübe unter 10. Damit lassen sich auch bei hohen Temperaturhüben Wärmepumpen mit einem Kompressor realisieren. Beim R407C stösst man damit im Sanierungsmarkt an Grenzen. Mit Ammoniak ergeben sich **mit einem Kompressor sehr hohe Verdichtungsverhältnisse** (Grössenordnung 15). Damit verbunden sind ohne Gegenmassnahmen entsprechend unzulässig hohe Überhitzungen. Abhilfe schaffen hier eine Zwischenkühlung, eine Kühlung durch einen starken Ölstrom oder ein zweistufiger Kreisprozess. Im Projekt wurde die Zwischeneinspritzung von bis zu 15% des Kondensats untersucht. Sie ergab praktisch keine Änderung der Leistungszahl – jedoch eine starke Reduktion der Verdichteraustrittstemperatur. Diese Lösung könnte nur über eine entsprechende Kompressorentwicklung realisiert werden. Als vielversprechende Massnahme soll in einer zweiten Projektphase [6] die Kühlung im Kompressor durch einen starken Ölstrom theoretisch und praktisch untersucht werden. Es besteht reale Aussicht, dass sich dazu ein im Handel erhältlicher Flügelzellenverdichter eignet. Bei Nutzung der im Ölstrom abgeführten Wärme (Warmwasserbereitung!) und der Motorenabwärme sollten gegenüber Propan höhere Jahresarbeitszahlen erreichbar sein.

Erste Tests mit einer neuen „**Ammoniakfalle**“ aus Kupfersulfat sind vielversprechend. Bei höheren Leckageraten bleibt allerdings die Abfuhr der hohen Reaktionswärme auf tiefem Temperaturniveau noch zu lösen. Auch die Wirksamkeit bei Verschmutzung muss noch untersucht werden. Die Auslegung von Kleinwärmepumpen mit Ammoniak ergaben ohne Rohrleitungen Füllmengen an Ammoniak von 0.9 bis 2.2 kg bei 6 kW und von 2 bis 8 kg bei 25 kW. Die für den Abtaubetrieb nötigen Füllmengen müssen allerdings noch untersucht werden.

In einer ersten Etappe einer zweiten Projektphase sollen der neue Kompressor ausgemessen und die Vergleichsrechnungen mit den dabei ermittelten Kompressorkennwerten präzisiert werden. Falls die Ergebnisse überzeugend ausfallen, wird der Kompressor einem „Stresstest“ für die hohen erforderlichen Druckverhältnisse über 4000 Betriebsstunden unterzogen. Wenn auch dies erfolgreich verläuft, ist der Bau und der Test einer Versuchsanlage geplant. Dabei soll auch die inzwischen patentierte Ammoniakfalle mit Kupfersulfat praktisch erprobt werden. Der Optimismus wurde durch Schwierigkeiten mit dem Ölkreislauf und der Ölabscheidung, undichte Ventile und Lieferverzögerungen des Kompressorherstellers allerdings etwas getrübt. Wir hoffen aber, im kommenden Jahr einen entscheidenden Schritt weiterzukommen.

2.3.3 Zweistufige Kleinwärmepumpe

Im **Sanierungsmarkt** kommt für Wärmepumpen meistens nur Luft als Wärmequelle in Frage. Zudem sind hier für die Raumheizung in der Regel höhere Vorlauftemperaturen erforderlich als in Neubauten. Weiter sollte auch die Warmwasserbereitung durch die Wärmepumpe übernommen werden können. Dies ergibt **grosse Temperaturunterschiede** zwischen der Wärmequelle und den Wärmebezügern und damit bei der üblichen einstufigen Bauweise einen erheblichen Abfall der Wärmeleistung. Zweistufige Kreisprozesse mit zwei Kompressoren ergeben bei grossen Temperaturhüben eine wesentliche Steigerung der Wärmeleistung und eine Verbesserung der Leistungszahl. Sie gehören bei Kältemaschinen und Wärmepumpen grösserer Leistung zum Stand der Technik.

Nachdem in der ersten Phase des Vorhabens **Effiziente zweistufige Wärmepumpe für Luft als Wärmequelle** mit einer noch nicht voll optimierten Versuchswärmepumpe bei $-7/50^{\circ}\text{C}$ gegenüber dem einstufigen Betrieb eine um ca. 14% höhere Leistungszahl und eine um ca. 70% höhere Wärmeleistung erzielt wurden (Näheres in [35]), werden in einer zweiten Phase [19] die theoretischen und experimentellen Untersuchungen auf eine **exergetisch optimale Enteisung** und die Verwendung eines FKW-Gemisches mit kleinem Temperaturgleit (wie **R410A**) sowie die Verwendung eines **natürlichen Kältemittels** (wie Propan) ausgedehnt.

Anstelle der üblichen Enteisung mit Kreislaufumkehr wurde die Enteisung mit der im Kältemittelreservoir zwischen den beiden Kompressoren (Zwischenbehälter, Economiser) gespeicherte Wärme rechnerisch und experimentell untersucht. Erste Versuche wurden durchgeführt - ein Vergleich mit der konventionellen Lösung ist aber noch nicht möglich.

2.3.4 Wärmepumpe mit separatem Kreislauf zur Kondensatunterkühlung

Im Rahmen der Entwicklung einer Wärmepumpe für den Sanierungsmarkt mit hohen Vorlauftemperaturen wurde ein Kreisprozess mit separatem Kreislauf für die Kondensatunterkühlung vorgeschlagen: Bild 6.

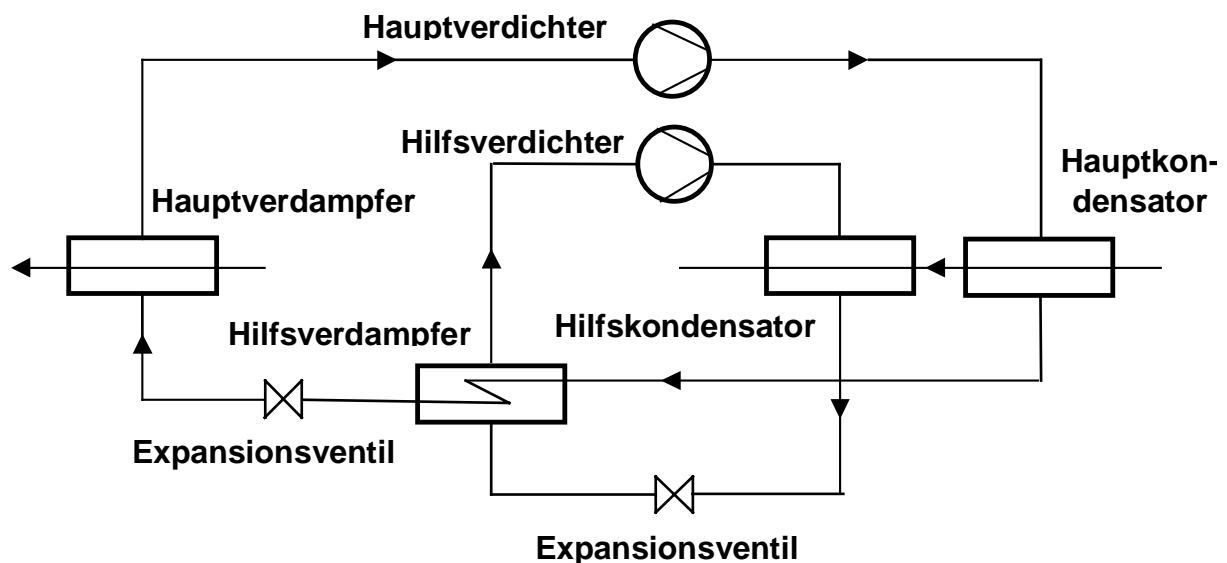


Bild 6: Kreisprozess für Wärmepumpen mit separatem Kreislauf für die Kondensatunterkühlung, aus [22].

Zur Beurteilung seiner Eignung für den Sanierungsmarkt wurden in einer Potentialstudie mit Hilfe einer Computersimulation folgende Kreisprozesse verglichen [21]:

- konventionelle einstufige Wärmepumpe (als Referenzfall),
- einstufige Wärmepumpe mit Sauggasüberhitzung,
- Wärmepumpe mit Hilfskreislauf zur Kondensatunterkühlung,
- zweistufige Kaskade,
- zweistufig mit Mitteldruckbehälter (Phasentrennung),

- mit Nassdampfzwischenansaugung.

Als Arbeitsmittel wurden die natürlichen Kältemittel Propan (R290) und ein Gemisch aus Propan/Isobutan (R290/R600a) sowie die Fluorkohlenwasserstoffe R134a und R407C eingesetzt.

Zunächst wurden für fiktive Verdichter mit einem isentropen Wirkungsgrad von 70% und einem Liefergrad von 90% Vergleichsrechnungen durchgeführt. Dabei wurde mit den folgenden minimalen Temperaturdifferenzen gerechnet: Kondensator 2 K, Verdampfer 4 K, übrige Wärmeübertrager 4 K. Weiter wurde eine Überhitzung nach der Verdampfung von 6 K (bzw. von 0 K bei nachgeschaltetem Sauggasüberhitzer) angenommen. Als Wärmequelle wurde Umgebungsluft mit Temperaturen von -12°C bis $+12^{\circ}\text{C}$ angenommen. Die Heizungsvorlauftemperatur, die Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur und die Heizleistung wurden nach SIA 384/2 und 380/1 in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur ermittelt. Dabei wurde bei -12°C von einer Vorlauftemperatur 60°C , einer Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur von 10 K, einer Heizleistung von 10 kW und einer Abkühlung der Umgebungsluft um 4K ausgegangen. Die Abtauverluste wurden durch lineare Interpolation zwischen den Maximalwerten bei -2°C (COP – 3%, Heizleistung –5%) und den Abtaugrenzen bei -7°C bzw. $+4^{\circ}\text{C}$ angenähert.

Der Prozess mit Sauggasüberhitzer zeigte gegenüber dem Referenzprozess nur bei den Gemischen R290/R600a und R407C deutliche Verbesserungen der Leistungszahl von 5% (tiefe Aussentemperaturen) bis 15% (hohe Aussentemperaturen). Das [Bild 7](#) zeigt einen Vergleich der oben erwähnten Kreisprozesse mit einem einstufigen Prozess für Propan als Kältemittel.

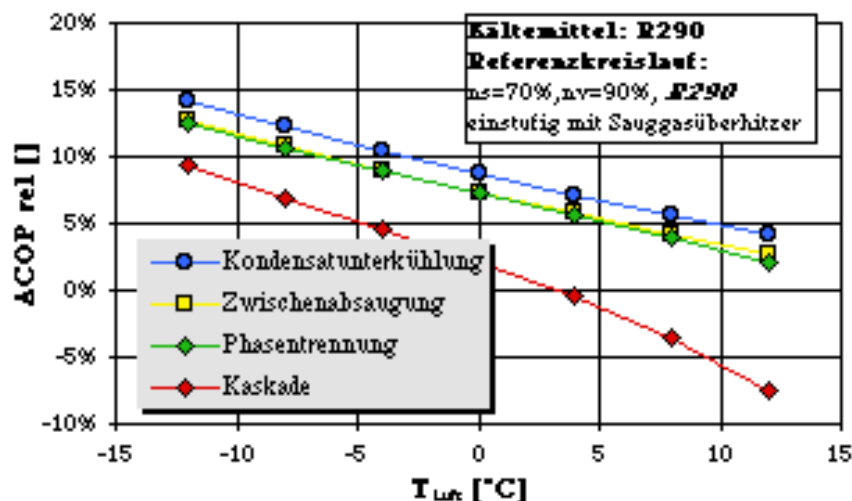


Bild 7: Verbesserung der Leistungszahl (COP) gegenüber einem einstufigen Prozess mit Sauggasüberhitzer für fiktive Kompressoren (70%/90%) und Propan als Kältemittel, aus [21].

Man erkennt daraus, dass mit **dem Kreisprozess mit separatem Hilfskreislauf für die Kondensatunterkühlung** etwa gleiche Verbesserungen der Leistungszahl erzielt werden können wie mit Phasentrennung und Zwischeneinspritzung. Der Kaskadenkreislauf schneidet dagegen infolge der Temperaturdifferenz zwischen den beiden Kreisläufen deutlich schlechter ab.

Bei der Heizleistung ergeben sich mit dem Kreisprozess mit separatem Hilfskreislauf für die Kondensatunterkühlung gegenüber dem einstufigen Prozess ebenfalls deutliche Verbesserungen. Die Werte der Prozesse Kaskade, der Zwischenansaugung und der Phasentrennung werden allerdings nicht ganz erreicht: Bild 8.

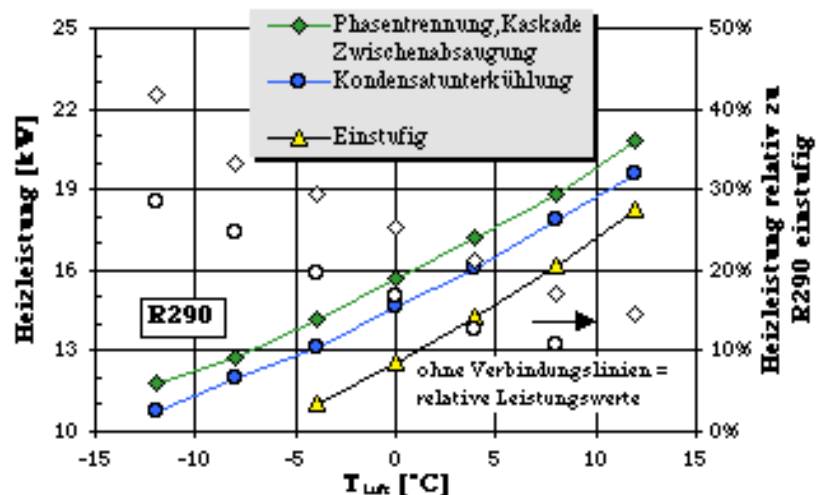


Bild 8: Vergleich der Heizleistung verschiedener Kreisprozesse mit den Werten für den einstufigen Prozess für fiktive Kompressoren (70%/90%) und Propan als Kältemittel (aus [21]).

In einem zweiten Teil werden Vergleichsrechnungen mit den Daten im Handel erhältlicher realer Kompressoren verglichen. Hier ergeben sich bei hohen Temperaturhuben (tiefe Lufttemperaturen) mit den zweistufigen Prozessen deutlich höhere Leistungszahlen. Ab etwa 0°C werden einstufige Prozesse besser. In diesem Bereich müssen zweistufige Prozesse auf einen Kreislauf umgeschaltet werden. Der grosse Vorteil zweistufiger Prozesse zeigt sich in einer wesentlich höheren Heizleistung bei tiefen Aussentemperaturen. Dies ist für einen monovalenten Wärmepumpenbetrieb von grosser Bedeutung. Der neue Kreislauf mit separater Kondensatunterkühlung schneidet auch mit realen Kompressoren etwa gleich gut ab wie die bekannten zweistufigen Kreisläufe.

Der neue Kreislauf erwies sich in diesen Vergleichsrechnungen als vielversprechend. In einer zweiten Projektphase wird deshalb ein Funktionsmuster einer entsprechenden Wärmepumpe gebaut und in Betrieb genommen [22]. Dabei wird mit einer druckgeführten elektronischen Expansionsregelung auch ein neues Regelkonzept verfolgt. Dieses soll eine geringere Überhitzung des Arbeitsmittels nach der Verdampfung ermöglichen. Für den Hauptverdichter wurde ein Scrollverdichter, für den Hilfskreislauf ein Kolbenverdichter gewählt. Im kommenden Jahr sind Versuche mit diesem Funktionsmuster sowie ein Vergleich mit den in der Phase 1 untersuchten Kreisprozessen geplant.

2.4 Blockheizkraftwerke

Bei den Blockheizkraftwerken stand die Forschungstätigkeit im Zeichen der Emissionsminderung und der Erhöhung der oft viel zu geringen Betriebszeit. Diese Ziele wer-

den durch die Entwicklung eines schadstoffarmen Motors und einer Betriebsoptimierung verfolgt.

2.4.1 Entwicklung eines emissionsarmen Gasmotors (*Swiss-Motor*)

In einem grösseren Vorhaben wird ein **emissionsarmer Gasmotor** eines schweizerischen Herstellers so weiterentwickelt, dass er die strenge schweizerische Luftreinhalteverordnung ohne nachgeschalteten Katalysator zu erreichen vermag. Dieses Projekt, an dem zwei Hochschulen und zwei Industriefirmen beteiligt sind, wird aus Zeitgründen in zwei Richtungen parallel vorangetrieben. Während an der EPFL an Verbesserungen des **Magermotorkonzepts** gearbeitet wird (Bild 9), verfolgt die ETHZ das **Konzept einer massiven Abgasrückführung**.

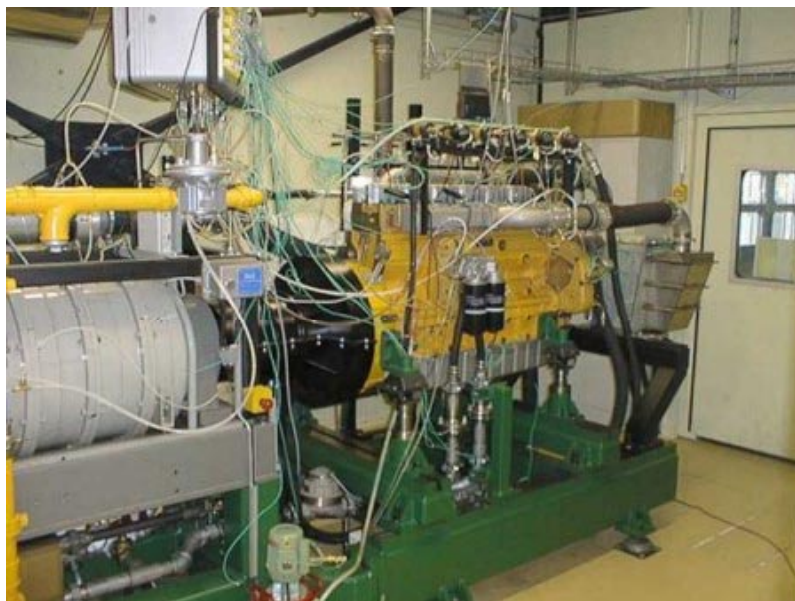


Bild 9: Versuchsstand für den Swiss-Motor an der EPFL, aus [18].

In der Vorstufe eines atmosphärischen Magerbetriebs wurde bisher bei einer Wellenleistung von rund 70 kW (gegenüber 106 kW bei stöchiometrischem Betrieb) und einem Wirkungsgrad von 35% eine NO_x -Emission im Bereich von 100 mg/m_N^3 erreicht [18] [34]. Ursprüngliches Ziel des Projektes war es, die sehr restriktiven Werte der LRV92 von 80 mg/m_N^3 zu erreichen. Inzwischen wurde diese Grenze mit der LRV98 auf 250 mg/m_N^3 gelockert. Ohne Oxidationskatalysator konnten die LRV-Grenzwerte für CO von 650 mg/m_N^3 jedoch noch nicht ganz erreicht werden. (Alle Emissionswerte sind auf 5% O_2 im Abgas bezogen.)

Im aufgeladenen Betrieb mit Turbokompressor und Zwischenkühlung konnte die Leistung des gleichen Motors auf rund 150 kW bei einem Wirkungsgrad von etwa 37% erhöht werden. Mit diesem aufgeladenen Motor wurden nach einer Optimierung der Kolben- und Kolbenringgeometrie NO_x -Emissionen von $125..150 \text{ mg/m}_N^3$ erreicht. Bei diesem Betrieb stiegen die CO-Emissionen allerdings auf $1000..1200 \text{ mg/m}_N^3$. Mit dem in dieser Betriebsweise noch nötigen Oxidationskatalysator werden die CO-Emissionen auf rund 100 mg/m_N^3 reduziert. Der Oxidationskatalysator reduziert auch die Kohlenwasserstoff-Emissionen – erhöht aber überraschenderweise die NO_x -Emissionen leicht.

Wie erwartet, haben die bisherigen Optimierungen noch nicht zu einem Gasmotor geführt, der ganz ohne Katalysator betrieben werden kann. Dieses Ziel wird in einer dritten Phase durch eine Verbesserung des Zündsystems angegangen. Bei NO_x -Emissionen kleiner als 150 mg/m_N^3 werden dabei CO-Emissionen unter 650 mg/m_N^3 und eine weitere Reduktion der Kohlenwasserstoffemissionen angestrebt. Diese dritte Phase wie auch die Variante einer massiven Abgasrückführung werden künftig im Forschungsbereich „Feuerung und Verbrennung“ weitergeführt.

2.4.2 Betriebsoptimierung von Blockheizkraftwerken

Viele BHKW-Anlagen erreichen die bei der Planung vorausgesetzte Jahresbetriebszeit nicht. Im Rahmen eines neuen Projekts zur Betriebsoptimierung von Blockheizkraftwerken [2] wurde als erster Schritt mit dem Programm *WKKCalc* eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Sie hat den dominierenden Einfluss des Wärmeleistungsbedarfs bestätigt: Die oft gemessenen 3000 oder weniger Jahresbetriebsstunden sind in erster Linie auf eine Überschätzung des Wärmeleistungsbedarfs bei der Planung zurückzuführen. Wesentlich für die Wirtschaftlichkeit einer BHKW-Anlage sind insbesondere hohe Laufzeiten in Hochtarifperioden. Eine Betriebsoptimierung soll deshalb den Laufzeitanteil in Hochtarifperioden entsprechend hoch halten. Dazu wird als Nächstes das Optimierungspotential einer geschickten Nachtabenkung untersucht.

2.5 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 grosse Fortschritte möglich. Das gilt auch für die meist weit komplexeren Anlagen der Prozesstechnik. Zwischen einer funktionierenden Anlage und einer bezüglich Energiebedarf, Rohstoffbedarf und Abfallprodukten optimalen Anlage gibt es oft zu grosse Unterschiede. Systematische Lösungsfindung ist hier besonders gefragt.

2.5.1 Raumheizung mit Wärmepumpen

Ein gutes Ergebnis bei den Messungen von Wärmepumpen im Wärmepumpentestzentrum in Töss ist noch keine Garantie für ein effizientes Wärmepumpenheizungssystem. Die Messungen in Töss liefern zwar ein sehr nützliches Bild des Verhaltens kommerzieller Wärmepumpen bei stationärem Betrieb. Im realen Einsatz findet nebst dem stationären Betrieb aber ein Anfahrbetrieb mit reduzierter Wärmeleistung statt. Weiter müssen das Wärmeverteilungssystem und die Regelung so ausgelegt sein, dass die Wärmepumpe die Wärme auf der jeweils nötigen Minimaltemperatur abgegeben werden kann. Das Verbesserungspotential von Wärmepumpenheizungen durch eine Optimierung des Gesamtsystems Wärmequelle - Wärmepumpe - Wärmespeicher - hydraulisches Wärmeverteilungssystem - Gebäude - Regelung ist beträchtlich. Dazu muss das reale Gesamtsystem mit möglichst geringem messtechnischen Aufwand im tatsächli-

chen Betrieb erfasst und eine der Wärmepumpe entsprechende neue Regelstrategie ausgearbeitet werden.

2.5.1.1 Auslegungsprogramme

Das im Auftrag des Bundesamts für Energie entwickelte und validierte Auslegungsprogramm für Wärmepumpenheizungsanlagen *WP-Calc* wurde aus dem Verkaufserlös der bisherigen Programmversion wie folgt verbessert:

- Verbesserung der **Programmstruktur**,
- **Sicherungen** gegen Absturz bei Fehleingaben (Nulldivisionen),
- korrekte Erfassung der **Rücklauftemperatur** (die Validierung zeigte unrealistische Ergebnisse),
- variable Zeitspanne für die **Absenkung der Vorlauftemperatur**,
- korrekte Berechnung der **Warmwasserbereitung**, wenn die Warmwassertemperatur grösser ist als die Speicherladetemperatur.

Die Lizenznehmer werden anfangs 1999 orientiert und mit entsprechenden Updates bedient.

2.5.1.2 Dynamischer Wärmepumpentest

Zur Anpassung der Wärmeleistung von Wärmepumpen an den variablen Wärmebedarf werden Wärmepumpen im allgemeinen mit konstanter Kompressordrehzahl taktend betrieben. Beim Wiedereinschalten der Wärmepumpen dauert es eine gewisse Zeit, bis diese den stationären Betrieb mit voller Leistung und Leistungszahl erreicht haben. Die **Leistungs- und Leistungszahleinbussen** können beim **Wiedereinschalten von Wärmepumpen** beträchtlich sein. Dieser Effekt wird bei der heutigen stationären Prüfstandmessung nach der EN 255 (wie z.B. in Töss) nicht erfasst.

Der Wärmepumpentest soll deshalb auf den instationären Wiederanfahrbereich ausgedehnt werden. Eine Modellierung des Anfahrverhaltens von Wärmepumpen [3] soll den dafür befürchteten hohen Messaufwand in Grenzen halten und zu wenigen Kenngrößen für das instationäre Verhalten von Wärmepumpen führen. Weiter soll das Modell über eine physikalische Interpretation der Taktverluste bei Wärmepumpen den Herstellern den Weg zur Minimierung dieser Verluste weisen.

In der Literatur werden die Leistungs- und Leistungszahleinbussen beim Taktbetrieb von Wärmepumpen auf mehrere Effekte zurückgeführt. Es sind dies die Abkühlung wärmerer Komponenten mit Kältemittelinhalt durch Wärmeverluste an die Umgebung, die Erwärmung kälterer Komponenten mit Kältemittelinhalt durch Wärmebezug aus der Umgebung, die Kältemittelmigration (beim Abstellen aus dem Verdampfer in den Kondensator, beim Wiederanfahren der Rücktransport des Kältemittels in den Kondensator) und die Absorption des Arbeitsmittels im Schmieröl. Die **Kältemittelmigration** trägt wesentlich zur Reduktion der Effizienz bei taktendem Betrieb bei. Bei dieser ist zu un-

terscheiden zwischen dem Rücklauf vom Kondensator durch das Expansionsventil und – von grösserem Einfluss - der Verdampfung im Kondensator mit anschliessendem Rücklauf durch den Kompressor.

Bei der **Wiederinbetriebnahme** ändern sich die Temperaturen der einzelnen Komponenten samt Kältemittelinhalt bis zum Erreichen der Werte bei stationärem Betrieb. Gleichzeitig findet eine Desorption des im Öl gelösten Kältemittels statt. Weiter treten im Kompressor beim Anlauf Druckspitzen auf.

Die Vorgänge nach dem Abstellen und beim Wiederanfahren unterscheiden sich grundlegend. Deshalb mussten dafür getrennte Modelle erarbeitet werden. Beim Modell für den **Vorgang nach dem Abstellen** wird zwischen den Komponenten Kondensator, Verdampfer und Kompressor ein rascher innerer Temperatenausgleich angenommen. In der folgenden Abkühlphase kühlen sich dann alle Komponenten samt Inhalt gleich ab. Die Annahme gleicher Temperaturen aller Hauptkomponenten der Wärmepumpe musste für den **Anfahrvorgang** fallen gelassen werden. Es wurde sogar eine Unterteilung der Wärmespeicherungseffekte der Hauptkomponenten nötig. So wurde der Kompressor unterteilt in Motor-Verdichterblock und Verdichtergehäuse-Oel, der Verdampfer in Kältemittelinhalt-leerer Apparat und der Kondensator in Kältemittelinhalt-leerer Apparat-Wasserinhalt (des Heizungssystems). Die Modelle sind entworfen und programmiert. Im kommenden Jahr werden sie getestet und nach Möglichkeit weiter vereinfacht. In der nächsten Projektphase wird ein neues Prüfverfahren entwickelt und erprobt. Später ist ein Einbau in Simulationsprogramme zur Auslegung von Wärmepumpen geplant.

2.5.1.3 Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen

Heizungsanlagen mit Wärmepumpen nutzen ihr grosses Energiesparpotential nur bei optimalem Betrieb des Gesamtsystems aus Wärmepumpe, Wärmeverteilung, Wärmeabgabe und Gebäude. Zwischen der Abnahme nach der Inbetriebsetzung mit Ersteinstellungen aufgrund von Planungsdaten und der Schlussprüfung vor Ablauf der Garantiezeit ist der Betrieb der Wärmepumpenanlage zu optimieren. Besonderes Gewicht ist dabei aus Gründen der energetischen Effizienz und einer langen Lebensdauer der Wärmepumpe auf den Betrieb mit minimaler Vorlauftemperatur und maximaler unterbrechungsfreier Laufzeit der Wärmepumpe zu legen. In der wichtigen Phase der Betriebsoptimierung ist vor verbessernden Eingriffen die effektive Betriebsweise des Wärmepumpenheizungssystems zu erfassen. Dies ist mit konventionellen Methoden sehr aufwendig. Die Betriebsoptimierung kommt deshalb insbesondere bei Kleinanlagen oft zu kurz. Das Bundesamt für Energie hat deshalb einen Auftrag zur Entwicklung einer neuen Methode erteilt, welche es erlaubt,

- die Ermittlung der Abweichung der tatsächlichen Anlageparameter gegenüber den Planungsdaten,
- das Auffinden der häufigsten Fehlerquellen (Fehlerdetektion),
- die Auswirkungen allfälliger Fehler der Anlage auf das Jahresergebnis,

- die Betriebsoptimierung und
- die Betriebsüberwachung während der Lebensdauer der Wärmepumpenanlage

in kurzer Zeit und mit möglichst wenigen und möglichst preisgünstigen Messungen durchzuführen. Die neue Methode soll aber auch als Basis für das Fernziel einer neuen, modellbasierten Regelungsstrategie für Wärmepumpen dienen. Diese soll bei möglichst speicherfreiem Betrieb zu höheren Jahresarbeitszahlen der gesamten Wärmepumpenheizanlage und bestmöglicher Nutzung von Niedertarifzeiten führen.

Die Ergebnisse der bisherigen Phasen 1 bis 3 an diesem anspruchsvollen Projekt wurden in den folgenden Teilschritten erarbeitet [23]:

Physikalische Modellierung

Das Gesamtsystem Wärmepumpe-Wärmeverteilsystem-Wärmeabgabe-Gebäude wurde physikalisch modelliert: Bild 10.

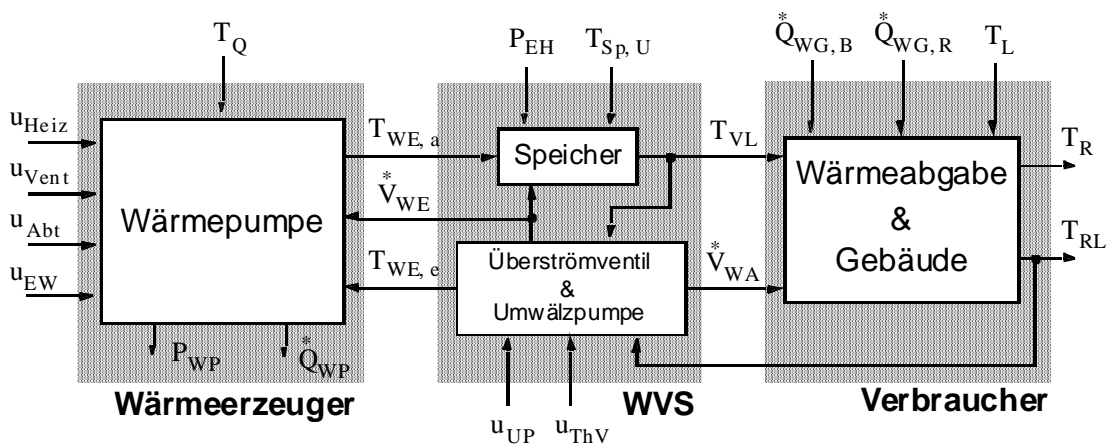


Bild 10: Signalflussbild des Gesamtsystems, aus [23].

Um den messtechnischen und rechnerischen Aufwand möglichst gering zu halten, erfolgte dies so einfach wie möglich – aber doch so, dass das wesentliche dynamische Verhalten der einzelnen Teilsysteme noch richtig wiedergegeben wird. So wird das Gebäude mit einem einfachen Einzonenmodell modelliert - für die Wärmepumpe ist dagegen eine wesentlich feinere physikalische Modellierung nötig:

Bild 11. Das Modell für den Wärmeverbraucher (Wärmeabgabe und Gebäude) enthält 6 physikalische Parameter. Das Wärmepumpenmodell deren 11. Der Seriespeicher im Wärmeverteilsystem wird zur Erfassung der thermischen Schichtung aus 6 Zonen mit homogenen Temperaturen modelliert.

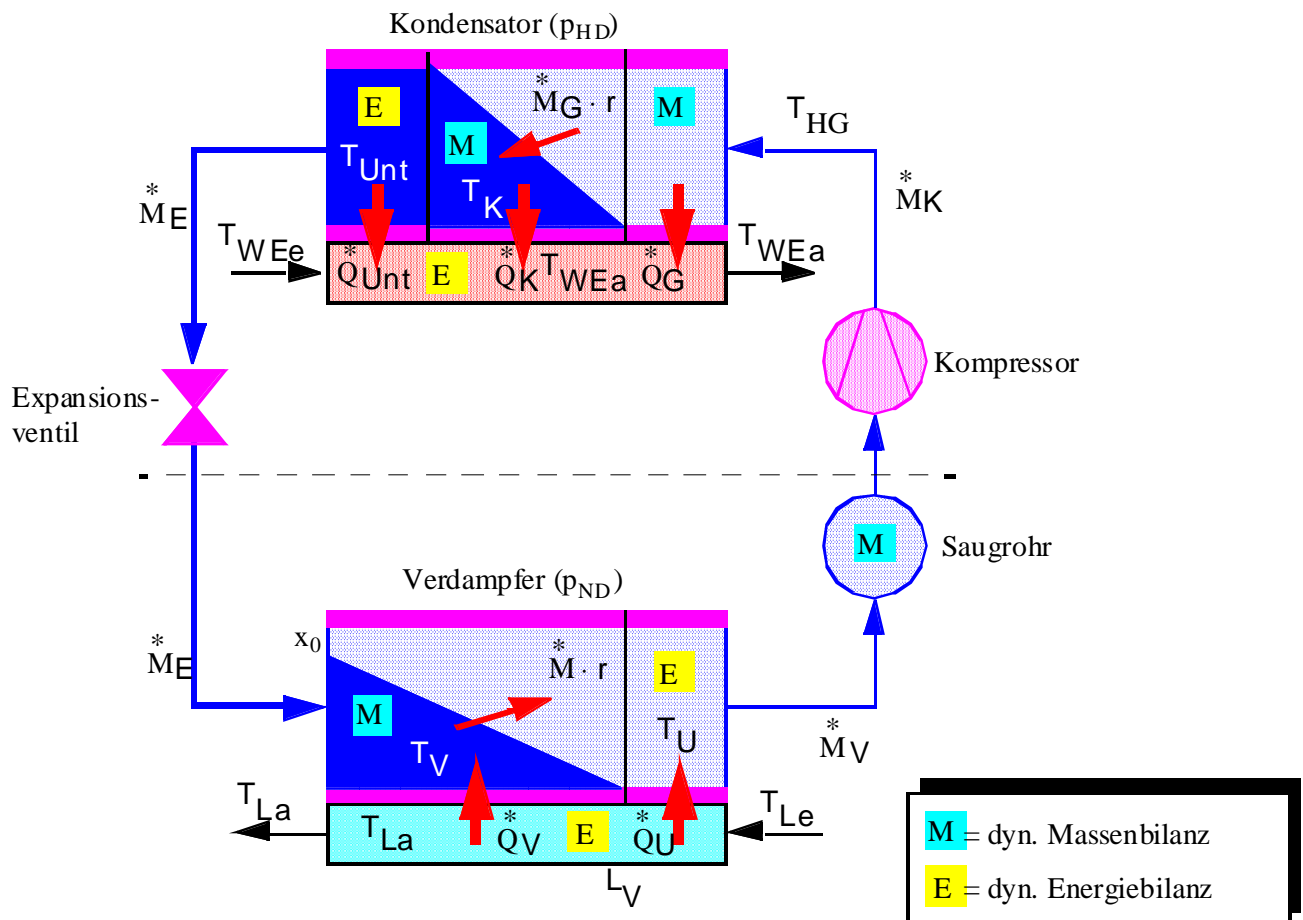


Bild 11: Zur Modellierung der Wärmepumpe, aus [23].

Parameteridentifikation

Die Parameter der Modelle aller Teilsysteme werden durch Messungen im normalen Betrieb der Wärmepumpenanlage und anschließender rechnerischer Auswertung bestimmt (Parameteridentifikation). Geeignete Identifikationsverfahren wurden zunächst anhand von Computersimulationen und dann mit den an einer realen Referenzanlage aufgezeichneten Messwerten ausgewählt und erprobt.

Es ist bereits gelungen, die tatsächliche Energiekennlinie (Tagesheizleistungskennlinie) aus den folgenden Messgrößen zu errechnen: Ein- und Austrittstemperatur der Wärmepumpe, Vor- und Rücklauf­temperatur der Heizung, Aussentemperatur, Raumtemperatur und Druckverlust über der Umwälzpumpe. Als Messdauer reicht bei Witterung mit genügendem Wärmepumpenbetrieb eine Woche. Die tatsächliche Energiekennlinie lag wesentlich unter der Energiekennlinie nach den Erwartungen bei der Planung. Dies bedeutet, dass eine nach der Planung eingestellte Wärmepumpe mit zu hohen Kondensatortemperaturen arbeiten würde. Sie würde damit eine geringere Leistungszahl erreichen als bei der Regelung über die tatsächliche Energiekennlinie.

Auch für das Teilsystem Wärmepumpe ist es für ein vereinfachtes stationäres Modell bereits gelungen, die wesentlichen Parameter zu identifizieren. Die Arbeiten werden in der Phase 4 zur Erfassung dynamischer Größen auf den instationären Betrieb der Wärmepumpe erweitert. Die Grundlagen der entsprechenden Modelle sind im Schlussbericht ausführlich dargestellt.

Referenzanlage

Zur praktischen Erprobung und zur Validierung der Modellierung und der Parameteridentifikation wurden in der Heizsaison 97/98 an einem häufig vorkommenden Wärmepumpenheizsystem in einem EFH in Massivbauweise im Kanton Schaffhausen Messungen in Zeitabständen von 10 Sekunden bis 5 Minuten durchgeführt. Dieses Referenzhaus weist eine Energiekennzahl von 234 MJ/m²a auf. Die Wärmepumpe benutzt Umgebungsluft als Wärmequelle. Die Anlage ist mit einem in Serie geschalteten Speicher im Vorlauf mit einer elektrischen Notheizung ausgerüstet. Das Wärmeabgabesystem besteht aus einer Bodenheizung mit einigen zusätzlichen Radiatoren, Raumthermostaten und einem Überströmventil zur Aufrechterhaltung eines minimalen Durchflusses im Kondensator der Wärmepumpe. Die Wärmepumpe wird über einen aussentemperaturgeführten Zweipunkt-Rücklauf temperaturregler mit Zeitprogrammsteuerung betrieben.

Simulation

Durch Computersimulationen mit *Matlab/Simulink* wurden die bisher entwickelten Methoden validiert. Die Computersimulation umfasst nebst der Wärmepumpe auch das Wärmeverteilsystem mit Speicherbewirtschaftung, Umwälzpumpe und dem Bypass über das Überströmventil sowie die Fussbodenheizung und das Gebäude. Sie ermöglicht die Berechnung von Jahresergebnissen der Wärmepumpenheizanlage mit den aus den Messungen während einer Woche gewonnenen Identifikationsergebnissen. Diese Hochrechnung auf Jahresergebnisse erlaubt es, die Auswirkungen ermittelter Fehler zu beurteilen und die richtigen Optimierungsmassnahmen auszulösen.

Fehlerdiagnose

Die Fehlerdiagnose einer ausgeführten Anlage erfolgt zunächst für die ganze Wärmepumpenanlage mit groben Modellen. Bei gravierenden Abweichungen von den Sollwerten wird die Diagnose mit einem verfeinerten Modell für die Wärmepumpe vertieft. Der Schlussbericht enthält zahlreiche Fehlerbäume zur systematischen Fehlersuche.

Ausblick

Die detaillierte Diagnose der Wärmepumpe wird in der Phase 4 des Projekts angegangen. In der Phase 5 soll die Identifikation des Gesamtsystems durch Messungen an weiteren realen Anlagen erprobt und erweitert werden. Dabei sollen auch die Aspekte der Integration in die Wärmepumpensteuerung als „Einbauset“ und einer einfachen temporären Ankoppelung eines externen Rechners als „Diagnoseset“ bearbeitet werden.

Da in der Energiekennlinie auch der Einfluss der Solarstrahlung und die innere Wärmeproduktion durch Bewohner und elektrische Geräte enthalten ist, ergaben sich durch die Auswertung mehrerer Messungen in der Heizsaison 97/98 recht unterschiedliche Verläufe der Heizkurve: Bild 12. Die tatsächlichen Energiekennlinien weichen von der Planungsenergiekennlinie erheblich ab. Die Planungsenergiekennlinie deckt nur den schlechtesten Fall ab. Dies bedeutet, dass Wärmepumpen bei der üblichen aussen-

temperaturgeführten Rücklaufemperaturregelung mit fester Energiekennlinie im allgemeinen mit zu hohem Temperaturhub und damit nicht mit maximaler Effizienz arbeiten. Hier liegt ein **erhebliches Verbesserungspotential** für den Betrieb von Wärmepumpenheizungssystemen. Die tatsächliche Energiekennlinie ist für eine optimale Betriebsweise der Wärmepumpe laufend zu erfassen. Noch besser ist es, diese aufgrund der Situation während einiger vergangener Stunden auf die kommende Betriebsstunde vorauszusagen. Auf dem anspruchsvollen Weg in dieser Richtung sind die durchgeführten Arbeiten ein wichtiger Meilenstein.

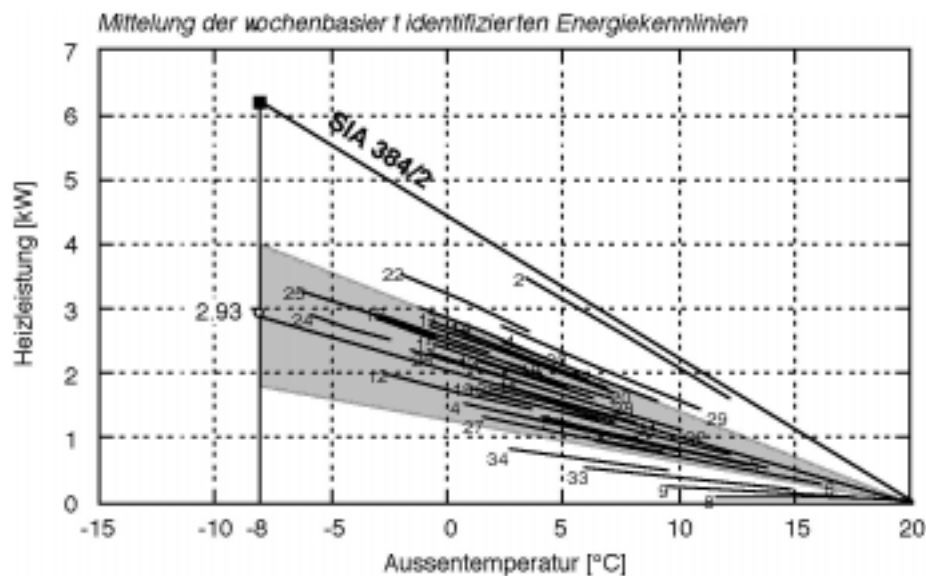


Bild 12: In der Heizsaison 97/98 bei Aussentemperaturen unter 5°C ermittelte Heizkurven aus der Auswertung der Messungen mehrerer Wochen, aus [23].

In einer weiteren Projektphase wird ein **Diagnoseverfahren** für das Erfassen der wesentlichen Kennwerte und von Fehlfunktionen der **Wärmepumpe** aus Messungen im Betrieb entwickelt [12],[31]. Dazu wurde ein detailliertes physikalische Modell einer einstufigen Wärmepumpe ausgearbeitet und zur Computersimulation in *MATLAB/SIMULINK* programmiert. Der modulare Aufbau des Programms ermöglicht die leichte spätere Anpassung an neue Komponenten. Mit dem physikalischen Modell wurden erste Parameteridentifikationsverfahren untersucht. Dabei wird in zwei Schritten vorgegangen. Zunächst erfolgt die Parameteridentifikation in den stationären oder quasistationären Phasen. Dann werden weitere Größen in der instationären Anlaufphase bestimmt. Zur Ermittlung der Modellparameter aus Messergebnissen wurde vor allem das Least-Squares-Verfahren eingesetzt. Dieses liefert eine geschlossene Lösung und lässt sich einfach implementieren. In [12] findet man erste Resultate der Parameteridentifikation für die stationäre Phase. Die experimentelle Überprüfung erfolgt an einer realen Wärmepumpenanlage in einem Einfamilienhaus. Im Simulationsmodell werden künstlich Fehler und Störungen eingebaut und somit die Empfindlichkeit und Robustheit der Fehlerdiagnoseverfahren analysiert. Für einen späteren Zeitpunkt ist die experimentelle Verifikation an einem Wärmepumpenprüfstand geplant.

2.5.1.4 Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen

Die konventionelle Zweipunktregelung von Wärmepumpen als durch die Aussentemperatur geführte Zweipunkt-Rücklaufemperaturregelung weist folgende Mängel auf [7]:

1. Die reale Heizkurve (Rücklauftemperatur als Funktion der Aussentemperatur) entspricht nicht der aufgrund der Heizungsauslegung eingestellten realen Abhängigkeit. Die reale Heizkurve verläuft im allgemeinen flacher und liegt tiefer als die eingestellte. Dies führt nicht nur zu einer schlechten Regelung, sondern dazu, dass die Wärmepumpe ab bestimmten Aussentemperaturen gar nicht mehr einschaltet.
2. Die konventionelle Regelung hat zu viele Ein-/Ausschaltungen der Wärmepumpe und damit eine vermeidbare Reduktion der Jahresarbeitszahl zur Folge.
3. Die konventionelle Regelung erfordert mindestens von Zeit zu Zeit ein Betreiben der Heizungsumwälzpumpe (sie läuft bei manchen Anlagen sogar dauernd!).

Die neu zu entwickelnde, modellbasierte **Pulsbreitenmodulation** soll diese Nachteile bei günstigem Preis sowie hoher Montage- und Bedienerfreundlichkeit beseitigen. Bei dieser ist nicht wie bei konventionellen Wärmepumpenreglern die Vor- oder Rücklauf-temperatur **Regelgrösse**, sondern die für einen längeren Zeitabschnitt (z.B. für 24 h) **benötigte Wärmemenge**. Diese wird zunächst aus dem Aussentemperaturverlauf während den vergangenen 24 Stunden unter Berücksichtigung der Gebäudedynamik und der Dynamik des Wärmepumpenheizungssystems errechnet. Die benötigte Wärmemenge wird dem Heizungssystem dann durch möglichst lange, unterbrechungsfreie Betriebsperioden der Wärmepumpe optimal zugeführt. Optimierungsziel ist eine möglichst hohe Jahresarbeitszahl des Wärmepumpenheizungssystems bei einem genügenden Komfort (Raumtemperaturschwankungen in engen Grenzen), einer möglichst weitgehenden Nutzung günstiger Stromtarifzeiten und einer Berücksichtigung von Sperrzeiten für den Wärmepumpenbetrieb. Die sich aus der Pulsbreitenmodulation für den Heizbetrieb ergebenden Betriebsunterbrüche sollen weiter für die Warmwasserbereitung optimal genutzt werden.

Um zu einer kostengünstigen Lösung zu kommen, sollen – mit Ausnahme der Aussentemperatur - alle benötigten Messgrößen in der Wärmepumpe erfasst werden. Die Verbesserung durch einen zusätzlichen Einbezug der Raumtemperatur als Option wird ebenfalls untersucht.

Für die bisherigen Untersuchungen wurden die Modellparameter nach den in [23] aus je einem realen Einfamilienhaus mit einer Luft/Wasser- Wärmepumpenanlage mit Serriespeicher⁶ und einer Sole/Wasser-Wärmepumpenanlage ohne Speicher⁷ gewonnen. Die Entwicklung der neuen Regelstrategie mit Pulsbreitenmodulation erfolgte in zwei Schritten:

- **Einfache Steuerung:** Berechnen des Wärmebedarfs aus einem Mittelwert der Aussentemperatur der vergangenen 24 Stunden. Heizung mit konstanter Periodendauer und konstanter Laufzeit: Bild 13.
- **Modellbasierte Optimierung:** Berechnen des Wärmebedarfs unter Berücksichtigung der Gebäudedynamik, dem Aussentemperaturverlauf der vergangenen 24 Stunden und der aktuellen Aussentemperatur. Der Temperaturverlauf der vergangenen 24 Stunden wird so angehoben oder abgesenkt, dass dieser mit der aktuel-

⁶ Fussbodenheizung mit Thermostatventilen und Bypass

⁷ Fussbodenheizung ohne Thermostatventile

len Aussentemperatur übereinstimmt. Erfassen der effektiv zugeführten Wärme aus Messungen der Vor-/Rücklaufemperatur in der Wärmepumpe.

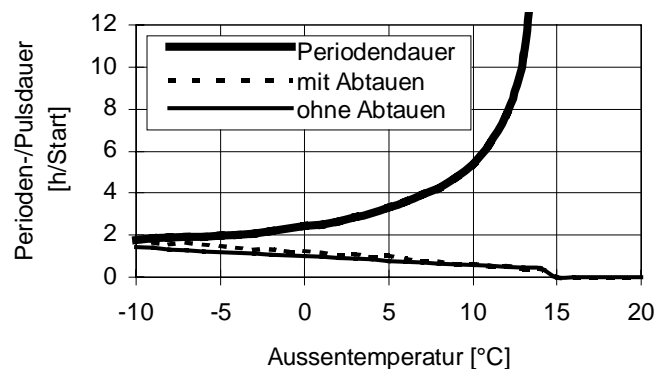


Bild 13: Perioden- und Pulsdauer der Wärmepumpe in Abhängigkeit der Aussentemperatur, aus [7].

Gemäss Computersimulationen für ein Einfamilienhaus erreichen beide Varianten etwa gleiche Jahresarbeitszahlen. Die modellbasierte Optimierung vermag aber die gewünschte Raumtemperatur wesentlich besser einzuhalten.

Die theoretischen Überlegungen werden während der Heizsaison 98/99 an einem realen Gebäude erprobt. Wenn sich die neue Regelstrategie als erfolgreich erweist, sollen in einer späteren zweiten Phase die gewonnenen Erkenntnisse verallgemeinert werden. **Fernziel** ist eine Regelung, welche die massgebenden Einflussgruppen nach einer Inbetriebnahmephase von z.B. 2 Wochen selbst identifiziert und dann die WP mit diesen Parametern optimal regelt. Auf diesem Weg sind aber noch viele Schritte zu bewältigen. Insbesondere die Identifikation kann vorerst nur offline erfolgen.

2.5.1.5 Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe

Niedrigenergiehäuser mit **Energiekennzahlen unter 160 MJ/m²a** stellen neue Anforderungen an die Heizsysteme. Der Heizleistungsbedarf von Gebäuden sinkt auf rund die Hälfte konventioneller Bauten. Damit steigt der Wärmebedarf für die Warmwasserbereitung auf 30% bis 40% des gesamten Wärmebedarfs. Auch grosse Fensterflächen gegen Süden zur Erhöhung der passiven Solarenergienutzung wirken sich stärker aus als bei konventionellen Bauten. Um das Ziel eines hohen Komforts kostengünstig und mit möglichst geringer Umweltbelastung zu erreichen, sind Wärmeerzeugung, Wärmeverteilung und Gebäude als **ganzes System** zu behandeln. Im Vordergrund der Untersuchung [13] steht die Wärmeerzeugung durch Wärmepumpen. Sie wird aber mit konventionellen Systemen verglichen.

Was wurde untersucht?

Das Gesamtsystem Gebäude-Heizung-Warmwasserbereitung wird mit realistischer Erfassung solarer Wärmegevinne durch eine dynamische Computersimulation mit dem Simulationsprogramm TRNSYS erfasst: Bild 14.

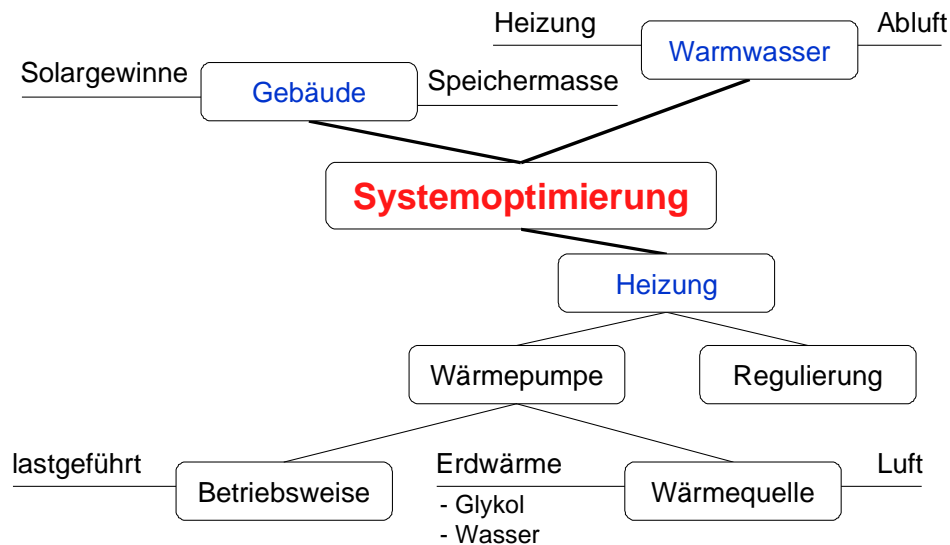


Bild 14: Optimierung des Gesamtsystems Gebäude-Heizung-Warmwasserbereitung durch dynamische Simulation, aus [13].

In der nun abgeschlossenen Phase 2 wurden Computersimulationen mit ergänzenden Laborversuchen zur Wärmepumpenregelung für die in der Tabelle 1 zusammengestellten Reiheneinfamilienhäuser durchgeführt. Eine mechanische Förderung der Abluft (Zuluft über Mauerventile) wurde nur bei der Variante L/W-Wärmepumpe mit Abluft-Wärmepumpe durchgeführt. Die teilweise natürliche Lüftung entspricht den hygienischen Anforderungen der Bewohner. Zum Vergleich mit herkömmlichen Gebäuden wurde ein „Grenzwerthaus“ in die Untersuchungen einbezogen. Auf eine aktive Solarenergienutzung wurde aus Kostengründen verzichtet. **Geringe Kosten** werden durch den direkten Anschluss der Wärmepumpe ohne Wärmespeicher und ohne Mischventile ans Wärmeverteilsystem erreicht. Dies stellt an die Regelung des Heizungssystems allerdings hohe Ansprüche.

Tabelle 1: Komponenten der untersuchten Gesamtsysteme. Grenzwerthaus: Derzeitige Vorschriften des Kantons Zürich für Neubauten werden gerade noch erfüllt. SIA2010: Für optimale passive Nutzung der Sonneneinstrahlung optimierte Niedrigenergiehäuser, Zielwert des Absenkpfeils nach SIA für das Jahr 2010. Erfüllt in Bezug auf den Heizenergiebedarf den Minergie-Standard.

Wärmepumpen	Gebäude
Luft/Wasser L/W-WP (mit einer und zwei Leistungsstufen) Warmwasserbereitung mit Abluft-Wärmepumpenboiler (Gebäude mit mechanischer Lüftung). Arbeitsmittel Propan, R407C gemessene Kennlinienfelder	Grenzwerthaus Energiekennzahl nach SIA 380/1 274 MJ/m ² a. Wärmeleistungsbedarf nach SIA 384/2: 4.8 kW. k-Werte: Aussenwand 0.55, Dach 0.40, Boden EG 0.46, Fenster 1.4 W/m ² K.
Sole/Wasser S/W-WP Warmwasserbereitung mit Beistellboiler über Wärmepumpe (Gebäude mit natürlicher Lüftung). Arbeitsmittel Propan, R407C gemessene Kennlinienfelder	Niedrigenergiehaus Energiekennzahl nach SIA 380/1: 174 MJ/m ² a. Wärmeleistungsbedarf nach SIA 384/2: 3.2 kW. k-Werte: Aussenwand 0.29, Dach 0.22, Boden EG 0.25, Fenster 1.1 W/m ² K.
Steuerung der Wärmepumpen	SIA2010-M in Massivbauweise

aussentemperaturgeführte Rücklauftemperaturregelung und modellbasierte Regelung. Berücksichtigung von EW-Sperren von 6..7, 11..12 und 22..24	Energiekennzahl nach SIA 380/1: 134 MJ/m ² a. Wärmeleistungsbedarf nach SIA 384/2: 3.2 kW. k-Werte: Aussenwand 0.20, Dach 0.15, Boden EG 0.20, Fenster 1.1 W/m ² K.
	SIA2010-L in Leichtbauweise Energiekennzahl nach SIA 380/1: 134 MJ/m ² a. Wärmeleistungsbedarf nach SIA 384/2: 3.2 kW. k-Werte: Aussenwand 0.20, Dach 0.15, Boden EG 0.20, Fenster 1.1 W/m ² K.
Wärmeverteilung: Fussbodenheizung mit Auslegungsbetriebstemperaturen von 30/25 °C (beim Grenzwerthaus 35/30 °C) bei einer Aussentemperatur von –11 °C, speicherfrei, Heizungsumwälzpumpe mit einer Leistungsaufnahme von 30 W. (Beim Unterschreiten der Heizkurve dauernd in Betrieb.)	
Benützerverhalten: Warmwasserbedarf für alle Gebäude 120 Liter pro Tag, normiertes Tagesverlaufsprofil mit Berücksichtigung von Ausstossverlusten.	
Wärmegewinn durch elektrische Apparate und Beleuchtung: 52 MJ/m ² a (8 MJ/m ² a unter dem Wert für den Minergiestandard).	

Ergebnisse der dynamischen Simulationen des Gesamtsystems

- Die **Behaglichkeit** nach dem PPD-Indikator wird bei guter Wärmepumpenregelung im speicherlosen Betrieb in allen untersuchten Fällen – ausser beim Gebäude SIA2010-L in Leichtbauweise – problemlos erreicht.
- Bei der Optimierung des Niedrigenergiehauses durch Vergrössern der südseitigen Fensterfläche **zur passiven Solarenergienutzung** wurde nur bei der Massivbauweise (Gebäude SIA2010-M) eine deutliche Reduktion des Heizenergiebedarfs erreicht. Sie betrug gegenüber dem „gewöhnlichen“ Niedrigenergiehaus 13%. Infolge häufiger Betätigung der Beschattungseinrichtungen wird der Solar-energiegewinn bei der Leichtbauweise (Gebäude SIA2010-L) eingeschränkt, weil die Überschusswärme nicht zwischengespeichert werden kann.
- Gegenüber dem Betrieb mit konstanter Leistung ergab die **L/W-Wärmepumpe** mit **zwei Leistungsstufen** (60%, 100%) eine Erhöhung der Jahresarbeitszahl von 3.4 bei konstanter Drehzahl um rund 18% auf 4.0 bei zwei Drehzahlen. Die höheren Wärmepumpenkosten für zwei Leistungsstufen lassen sich bei den derzeitigen Strompreisen beim geringen Heizenergiebedarf von Niedrigenergiehäusern leider kaum amortisieren.
- Der Einfluss der **Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs** auf die Soletemperatur und damit auf die Jahresarbeitszahl der **S/W-Wärmepumpe** wurde mit dem Erdsondenmodul *EWS* und dem Simulationsprogramm TRNSYS untersucht. Bei einer Änderung der Wärmeleitfähigkeit des Erdbodens um 1 W/mK ergaben die Simulationsrechnungen für eine Bezugswärmeleitfähigkeit von 2 W/mK eine erstaunlich geringe Änderung der Soletemperatur um rund 2 K und der Jahresarbeitszahl um rund 3.5%. Dabei wurde allerdings von einem laminaren Betrieb der Sonde ausgegangen.
- Bei richtiger Sondenbelastung lassen sich **Erdwärmesonden mit Wasser** als Wärmeträger betreiben. Der Energiebedarf der Umwälzpumpe lässt sich dann erheblich reduzieren. Entsprechende Sondenbelastungsgrenzkurven sind im Schlussbericht aufgezeichnet. Man kann damit in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs, der minimalen Verdampferaustrittstemperatur und der Temperaturdiffe-

renz des Wassers im Verdampfer die spezifische Sondenbelastung (Wärmestromdichte) bestimmen.

Neue Wärmepumpenregelung

Um zu kostengünstigen Lösungen zu kommen, sind Sensoren ausserhalb der Wärmepumpe möglichst zu vermeiden (hohe Installationskosten!). Fussbodenheizungssysteme weisen im allgemeinen Einzelraumthermostatventile und einen Bypass auf. Die Einzelraumthermostatventile reagieren auf die aktuelle Raumtemperatur. Sie werden deshalb in einem neuen Regelungskonzept als „Temperatursensoren“ benützt, indem in der Wärmepumpe der Druckabfall über der Umwälzpumpe erfasst wird. Gegenüber der üblichen Zweipunktregelung sind von einem neuen, modellbasierten Regelkonzept mit Pulsbreitenmodulation ein besseres „Verkräften“ von Sperrzeiten der EWs und eine bessere Nutzung von Niedertarifperioden trotz speicherlosem Betrieb zu erwarten. Die zusätzliche Installation eines Solarimeters zur Messung der einfallenden Sonnenstrahlung ergab in den bisherigen Simulationsrechnungen keine signifikanten Vorteile. Die neue Regelung wurde an einer Versuchsanlage mit einer realen Wärmepumpe und einem über eine PC-Regelung nachgebildeten künstlichen Wärmeverbraucher erfolgreich erprobt: Bild 15.

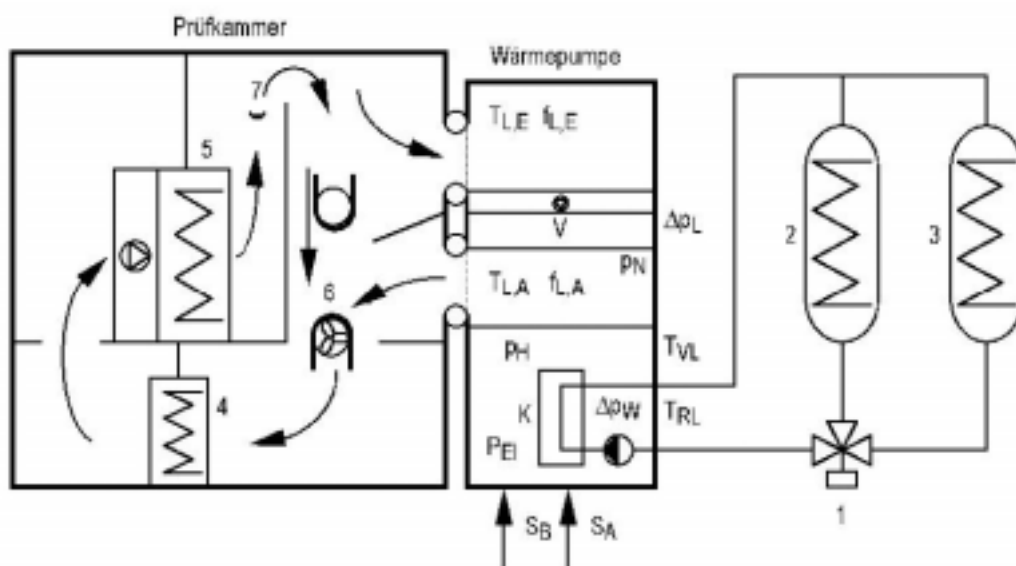


Bild 15: Versuchsanlage zum Erproben der neuen Wärmepumpenregelung mit emuliertem Wärmeverbraucher. 2: beheizter Behälter, 3: gekühlter Behälter (aus [13]).

Vergleich der Wärmepumpen mit konventionellen Wärmeerzeugungssystemen

Zum wirtschaftlichen und ökologischen Vergleich des Sole/Wasser-Wärmepumpenheizsystems mit Beistellboiler (S/W/4.9/B-B) und des Luft/Wasser-Wärmepumpenheizsystems mit Abluft-Wärmepumpenboiler (L/W/4.6/AWP) für Niedrigenergiehäuser wurde die Raumheizung und die Warmwasserbereitung mit modernen Kesselheizungen verglichen. Für die Ölheizung mit Beistellboiler wurde mit einem Jahresnutzungsgrad von 94% (Oel 16 kW – BB) und für die Gasheizung mit Beistellboiler (Gas – BB) mit einem Jahresnutzungsgrad von 97% gerechnet. Weiter wurde auch eine zentrale

Holzheizung mit Zu- und Abluftsystem (Holzofen – WT) und einer Luft/Luft-Wärmepumpe mit Wärmerückgewinnung (L/L-WRG) verglichen. Um die Vergleichbarkeit der Systeme zu ermöglichen, wurden bei den fossilen Heizungen und bei der Sole/Wasser-Wärmepumpe die Kosten für eine Lüftungsanlage hinzuaddiert, beim Abluft-WP-Boiler wurden lediglich die Kosten für die Luftführung extra ausgewiesen. Bei der Luft/Luft-Wärmepumpe mit WRG sind systembedingt die Kapitalkosten für die Lüftung in der Heizung enthalten. Die Auswertung von Offerten führte auf die im Bild 16 dargestellten Jahresgesamtkosten aus Investitions-, Betriebs- und Unterhaltskosten.

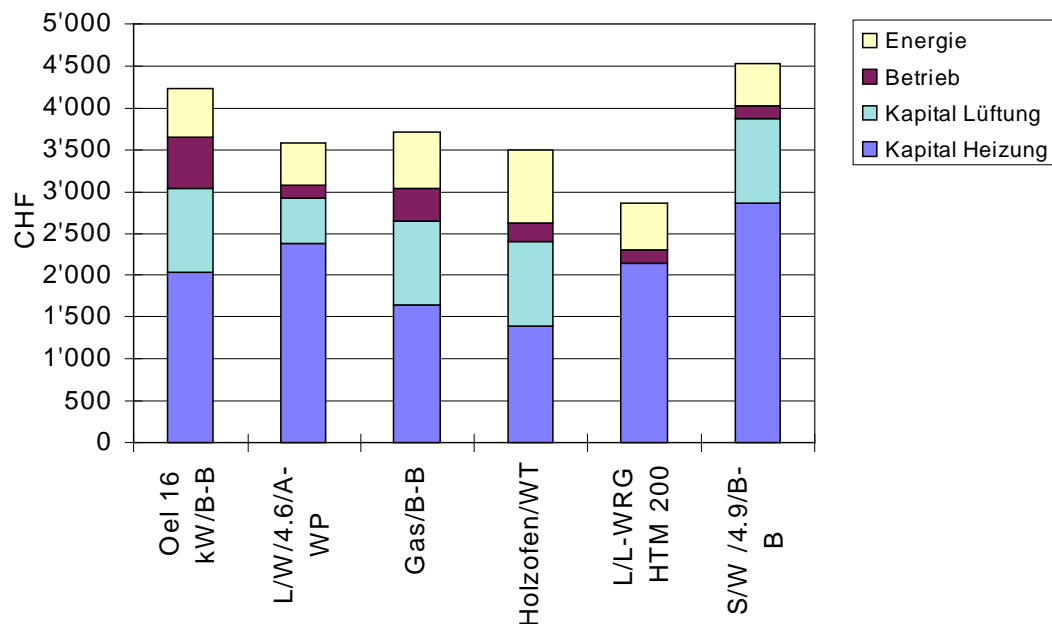


Bild 16: Vergleich der Jahresgesamtkosten verschiedener Heizsysteme für Niedrigenergiehäuser. Legende im Text, aus [13].

Das Bild verdeutlicht, dass die Luft/Luft-Wärmepumpe mit Abluftwärmerückgewinnung am kostengünstigsten ist. Diese speziell für Niedrigenergiehäuser geeignete Variante wird deshalb in der Phase 3 noch genauer untersucht. Die Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Abluft-Wärmepumpenboiler, der Holzofen und die Gasheizung mit Wohnungslüftung weisen rund 20% höhere Jahreskosten auf und sind ebenfalls noch kostengünstig. Der Ölkessel und die Sole/Wasser-Wärmepumpe in Kombination mit Wohnungslüftung erreichen die höchsten Jahreskosten. Hauptursache dafür sind die Kapitalkosten für die Wohnungslüftung. Liesse man diese weg, würde sich die Rangfolge entsprechend verschieben. Beim Vergleich wurde davon ausgegangen, dass die Zusatzkosten für den Betrieb der Ventilatoren durch Einsparungen bei den Lüftungsverlusten kompensiert werden.

Beim ökologischen Vergleich der Heizungssysteme wurde von den folgenden für die Wärmepumpe extrem **ungünstigen Annahmen** ausgegangen:

1. Der ganze importierte Strom wird in der Schweiz verbraucht (CH-Strommix mit 0% Transitanteil). Ein Transitanteil von Null trifft in der Realität sicher nicht zu. Zudem geht dieser Strommix von **Bezugsrechten** und nicht von tatsächlich aus dem Ausland bezogener elektrischer Energie aus.

2. Es wird mit 100% Leckage des Kältemittels während der ganzen Lebensdauer gerechnet. Tatsächlich liegt der **Leckageanteil** heute bei etwa **20%** und wird laufend kleiner

Unter diesen Annahmen ergaben sich folgende Ergebnisse:

- Wärmepumpenheizungen sind den Ölkesselheizungen oder elektrischen Widerstandsheizungen ökologisch klar überlegen. Wie das Bild 17 illustriert, ist die Wärmepumpenheizung in Bezug auf den Treibhauseffekt auch besser als die Gaskesselheizung. Der Unterschied zu den Kesselheizungen wird noch wesentlich grösser, wenn vom anderen Grenzfall mit 100% Transit des importierten Stroms ausgegangen wird. Der Treibhauseffekt sinkt dann bei den Wärmepumpen auf etwa die Hälfte der Werte nach Bild 17.
- Im Rahmen der mit Ökobilanzen erreichbaren Genauigkeiten (Abweichungen von $\pm 20\%$ bei den einzelnen Umwelteffekten sind nicht signifikant) sind Gaskesselheizungen und Wärmepumpen in Bezug auf die Gesamtwirkung der übrigen Umwelteffekte etwa gleichwertig. Weitere Informationen zur Schadstoffreduktion durch Wärmepumpen findet man in [29],[30].
- Die Ökobilanz des Gesamtsystems Wärmeerzeuger-Gebäude zeigte, dass die Belastung des Ökosystems durch den Bau der Niedrigenergiehäuser in die gleiche Grössenordnung kommt, wie diejenige der lebenslangen Beheizung. Dies wird im Bild 4 auch für den Treibhauseffekt bestätigt. Dies deutet darauf hin, dass sich der Aufwand für eine noch weitergehende Einsparung an Heizenergie als bei den SIA2010-Häusern (bzw. Minergiehäusern) nicht mehr von vornherein lohnt. Insbesondere bei Wärmepumpenheizungen kann die höhere Belastung durch den bau-seitigen Zusatzaufwand die geringere Belastung durch die Beheizung auch überwiegen!

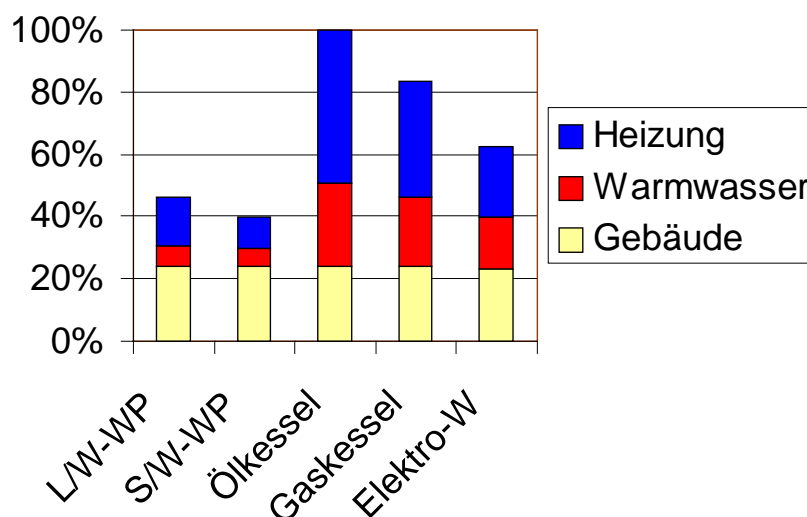


Bild 17: Vergleich des Treibhauseffekts von Heizung, Warmwasserbereitung und Gebäude (graue Energie) für das Gebäude 2010-L und unterschiedliche Wärmeerzeugungssysteme. Berechnung mit dem für die Wärmepumpe ungünstigsten Grenzfall des schweizerischen Strommixes mit vollständigem Verbrauch des Stromimports in der Schweiz (0% Transitanteil).

Die bisherigen Untersuchungen stützten sich grösstenteils auf Computersimulationen. Bei diesen bleiben Modellungenauigkeiten und vor allem das reale Benützerverhalten unerkannt. Deshalb werden in einer dritten Projektphase drei reale Gebäude mit Wärmepumpenheizungen experimentell untersucht [14]. Dabei kommen drei Arten von Wärmepumpenheizungen zum Einsatz, nämlich:

1. eine Sole/Wasser-Wärmepumpe mit Beistellboiler,
2. eine Luft/Wasser-Wärmepumpe mit separatem Abluftwärmepumpenboiler und
3. eine Wärmepumpen-Luftheizung mit Wärmerückgewinnung aus der Abluft.

Die dritte Variante wurde nachträglich in dieses Vorhaben aufgenommen, um einen Vergleich zwischen Fussbodenheizung und Luftheizung für Niedrigenergiehäuser zu ermöglichen. Mit den drei Anlagen sollen restliche Wissenslücken bei den Heizkonzepten und der optimalen Regelung von Niedrigenergiehäusern mit Wärmepumpen geschlossen werden. Von besonderem Interesse sind auch die Einflüsse des Benützerverhaltens und der mechanischen Wohnungslüftung auf den nach dem SIA-Regelwerk berechneten Wärmeleistungs- bzw. Heizenergiebedarf.

Die für die Planung von Wärmepumpenheizanlagen wesentlichen Erkenntnisse aus den Phasen 1 bis 3 werden in der Phase 4 in einem **Handbuch** [15] zusammengefasst. Das Handbuch wird das Vorgehen zur Auslegung von Wärmepumpenheizanlagen für Niedrigenergiehäuser aufzeigen und anhand eines Beispiels illustrieren. Es wird zeitlich parallel zur Phase 3 erarbeitet. Später wird ein durch die FWS⁸ auszuarbeitendes Marketinghandbuch helfen, die technischen Erkenntnisse in möglichst viele Wärmepumpenheizungen für Niedrigenergiehäuser umzusetzen.

2.5.2 Integration verfahrens- und energietechnischer Prozesse

Unsere Forschungsbemühungen konzentrierten sich auf die **Prozessintegration**⁹(Einführungen zu diesem Thema in [32], [WWW 2], [WWW 3], [WWW 4]). Schwerpunkte waren dabei die Suche nach praktikablen Methoden zur Optimierung von Batch-Prozessen und das Aufzeigen der Möglichkeiten und Grenzen der Pinch-Methode in der komplexen Haustechnik. Im Bereich der Prozessintegration besteht in der technischen Praxis noch ein erheblicher Nachholbedarf. Wir haben deshalb der Umsetzung der Pinch-Methode in die Praxis wiederum grosses Gewicht beigemessen.

2.5.2.1 Pinch-Methode in der Haustechnik

Auch in der komplexeren Haustechnik (z.B. Spital, Einkaufszentrum, Laborgebäude, Verwaltungsgebäude) lassen sich mit den Methoden der Prozessintegration systematisch optimale Systemlösungen finden. Als besondere Schwierigkeit sind hier allerdings oft stark instationäre und stochastische Vorgänge zu meistern. An einem Fallbeispiel eines Laborgebäudes wurde das in solchen Fällen zweckmässige Vorgehen erarbeitet [9]. Als Ergebnis des Projekts wird im ersten Quartal 1999 ein Handbuch mit einem ausführlich bearbeiteten Fallbeispiel als Wegleitung zur Verwendung der Pinch-Me-

⁸ Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz

⁹ Einführungen zur Prozessintegration [32],[WWW 2], [WWW 3], [WWW 4]

thode in der Haustechnik erwartet. Das Projekt soll nebst den Möglichkeiten auch die Grenzen der Pinch-Methode in der komplexen Haustechnik aufzeigen.

2.5.2.2 Energetische Integration bei Batch-Prozessen

In der Schweiz wird sowohl im Chemie- wie auch im Lebensmittelbereich häufig mit **diskontinuierlichen Prozessen** (Batch-Prozessen) produziert. Deshalb wird im Einklang mit weltweiten Bemühungen versucht, ein systematisches Vorgehen zur optimalen energetischen Gestaltung diskontinuierlicher Prozesse zu entwickeln. Das ist eine schwierige Aufgabe, weil die einzelnen Teilprozesse im allgemeinen nicht gleichzeitig ablaufen und diese zudem instationär sind.

Als Lösungen stehen kombinatorische Methoden bereits in der Form von Anwenderprogrammen zur Verfügung. Diese erreichen aber das energetische Minimum nicht unbedingt. Deshalb wird am Prinzip der Pinch-Methode für mehrere Zeitabschnitte weitergearbeitet [16]. Dabei wird versucht, den noch erheblichen Aufwand für den Planer durch automatische oder halbautomatische Vorgehensweisen zu reduzieren. Momentan wird an der automatischen Konzeption und Optimierung von Wärmeübertragernetzwerken und von Wärmespeichersystemen von Batch-Prozessen mit mathematischen Methoden gearbeitet. Parallel dazu wird als Werkzeug für den Planer das Programm *PinchLENI* in der Programmiersprache *Java* neu geschrieben. In dieses Programm werden auch die bisher entwickelten Methoden für Batch-Prozesse implementiert.

2.5.2.3 Umsetzung der Pinch-Methode

Die Computersimulation verfahrens- und energietechnischer Prozesse gehört zum Stand der Technik. Schon einfache energie- und verfahrenstechnische Anlagen wie auch komplexere haustechnische Anlagen lassen aber eine verwirrende Zahl von Kombinationen der einzelnen Anlageelemente zu. Im Bereich der Prozessintegration wurden in den letzten 15 Jahren Methoden für ein rasches, systematisches Auffinden optimaler Anlagekonfigurationen vor der Prozesssimulation und Detailauslegung entwickelt. Sie sind auch ein hervorragendes Werkzeug zur Abschätzung des Verbesserungspotentials bestehender Anlagen. Leider sind diese Methoden bei uns - nicht zuletzt mangels einer geeigneten deutschsprachigen Einführung - noch wenig bekannt.

Die energetische Prozessintegration hat als Ziel, die Energiezufuhr von aussen durch die Versorgung möglichst vieler Energiebezüger durch Überschussenergie anderer Anlageelemente minimal zu halten. Dies kann durch einfache Wärmeübertragung oder über Wärme-Kraft-Kopplungsprozesse (Brüdenkompression, Wärmepumpen, thermische Arbeitsmaschinen) erfolgen. Die Methoden der Prozessintegration zeigen systematische Wege zu einer wirtschaftlich optimalen Schaltung komplizierterer thermischer Systeme. Mit dieser richtigen Weichenstellung in einem frühen Zeitpunkt kann der grosse Aufwand für die folgende Detailauslegung wesentlich reduziert werden. Auch die möglichen Energieeinsparungen für unterschiedliche Lösungsvarianten lassen sich sofort erkennen. Generell fördert die Anwendung der Prozessintegration das noch in den Anfängen steckende Systemdenken und dient den Zielen einer nachhaltigen Entwicklung.

Als effizientes Werkzeug für ein systematisches Optimieren verfahrens- und energie-technischer Anlagen entwickelte B.Linnhoff die Pinch-Methode (pinch technology, pinch design method und in einem modernen, erweiterten Sinne die „Pinch-Analyse“). Diese interaktive Methode beruht auf der Überlagerung der sich erwärmenden und der sich abkühlenden Energieströme (oder Stoffströme). Damit lassen sich auch komplexe Prozesse in grösstmöglicher Vereinfachung durch nur zwei Kurven darstellen: Bild 18. Die *Pinch-Methode* ermöglicht eine laufende Beurteilung der Lösungsschritte durch den Ingenieur und wurde ursprünglich für Wärmeübertragernetzwerke konzipiert. Sie wird seither in aller Welt weiterentwickelt. Für den Einsatz der *Pinch-Methode* in der Praxis sind zahlreiche Computerprogramme verfügbar [WWW 5].

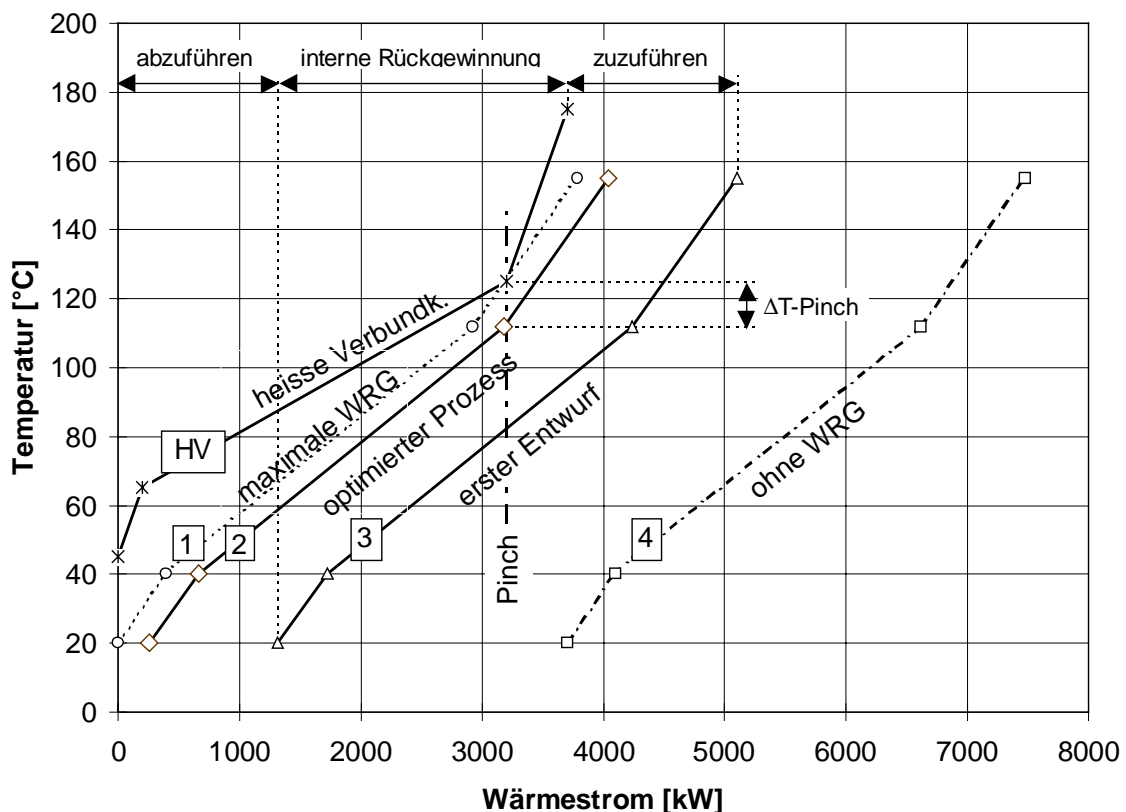


Bild 18: Verbundkurven zur Darstellung der Energieströme eines beliebig komplexen Prozesses. Verbundkurven (Kompositkurven) für das Beispiel in [32]. HV: Verbundkurve der heissen Ströme, 1 bis 4: Verbundkurven der kalten Ströme für Lösungen mit abnehmendem Wärmerückgewinnungsgrad; aus [35].

Während in angelsächsischen Ländern die *Pinch-Methode* längst zum Standardwerkzeug des Planers gehört, ist sie bei uns leider noch viel zu wenig bekannt. Das Bundesamt für Energie liess deshalb ein deutschsprachiges Handbuch als Einführung zur *Pinch-Methode* ausarbeiten und in drei sehr gut besuchten Kursen für Energie- und Verfahreningenieure laufend verbessern [10]. Die nun vorliegende Fassung führt anhand von Fallbeispielen auf leicht verständliche Weise in die *Pinch-Methode* ein. Sie ist auch zum Selbststudium geeignet und führt über die optimale Konzeption von Wärmeübertragernetzwerken bis zur systematischen Anordnung der Energieversorgung von aussen. Auch auf die Anwendung der Methode in der komplexen Haustechnik wird eingegangen.

3 ZUSAMMENARBEIT

Unsere Bestrebungen zur Reduktion des Primärenergiebedarfs durch Umgebungs- und Abwärmenutzung wurden durch eine intensive nationale und internationale Zusammenarbeit ergänzt und unterstützt.

3.1 Nationale Zusammenarbeit

Die Forschungsaktivitäten des BFE-Forschungsprogramms *Umgebungswärme, Abwärme und Wärme-Kraft-Kopplung* wurden auch 1998 mit dem Energieforschungsfonds der schweizerischen Gasindustrie **FOGA** koordiniert. Verständlicherweise hat sich der **FOGA** vor allem im Bereich der Wärme-Kraft-Kopplung von kleinsten WKK-Einheiten (Brennstoffzelle, Thermophotovoltaik, Freikolbenstirlinggenerator, Mikor-BHKW mit Verbrennungsmotor) bis zu Entwicklungsvorhaben im Bereich von Gasturbinen und Kombikraftwerken engagiert [WWW 6], [WWW 7]. Auch der Forschungsfonds der Erdöl-Vereinigung **FEV** förderte Vorhaben im Bereich der Wärme-Kraft-Kopplung, nämlich die Entwicklungen eines kleinen Freikolbenstirlinggenerators für Heizölbetrieb und eines Heizölreformers für den Betrieb von keramischen Brennstoffzellen mit Heizöl [WWW 8]. Der Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft **PSEL** [WWW 9] unterstützte die Bestrebungen zur Qualitätssicherung bei Wärmepumpen durch namhafte Beiträge an das **Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum Töss** [WWW 10]. Er war ebenfalls an der Brennstoffzellenentwicklung und an der Entwicklung eines kleinen Freikolben-Stirlinggenerators sowie an Marktuntersuchungen für Grosswärmepumpen beteiligt. Nebst dem BFE und dem **PSEL** tragen auch die Nordostschweizerischen Kraftwerke (**NOK**, [WWW 11]) und das Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (**EWZ**, [WWW 12]) weiterhin zum Betrieb des Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum Töss bei.

Im Rahmen der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz (**FWS**, [WWW 13]) arbeiten das Bundesamt für Energie, Branchenverbände von Planern und Installateuren, Hersteller von Wärmepumpen, Elektrizitätswerke und Dienststellen von Kantonen zur Verbreitung zuverlässiger und effizienter Wärmepumpenheizungsanlagen mit einem guten Preis-/Leistungsverhältnis zusammen. Die Aktivitäten der FWS waren im 1998: Tage der offenen Tür mit Besichtigungsmöglichkeiten von installierten LW- S/W und W/W-Anlagen durch interessierte Bauherren, Durchführen der sehr gut besuchten Wärmepumpen-Expo 98 mit über 60 Ausstellern vom 5./7. Nov. 98 in Bern sowie Teilnahme an kleineren Messen, Betreuen von Installationsfirmen und Elektrizitätsversorgungsunternehmen, Durchführen von Ausbildungskursen für Installateure und Planer, Bearbeiten und Lösen von rund 35 Problemfällen durch den „Wärmepumpen-Doktor“, Beantworten einer grossen Zahl von Anfragen aus der Bauherrschaft durch die Informationsstellen in Bern und Lausanne, Durchführen von Marktanalysen und Erarbeiten eines Offertformulars für Wärmepumpenheizungen sowie eines Merkblattes für die Sanierung alter Heizungen. Als Meilenstein ist die Verabschiedung des mit Österreich und Deutschland gemeinsam erarbeiteten **Gütesiegels für Wärmepumpen** hervorzuheben: Tabelle 2.

Seriegerät gemäss Anforderungen des Prüfzentrums Töss
Gemessene Leistungen nach EN255
Minimaler, gemessener COP für: - Luft/Wasser: 3.0 (bei A2/W35) - Sole/Wasser: 3.5 (bei B0/W35) - Wasser/Wasser: 4.1 (bei W10/W35)
Elektrische Sicherheitsprüfung (CE/SEV)
Gemessene Schallemission (gemäss Prüfreglement Töss)
Einhaltung der EW-Anschlussbedingungen
Mindestanforderungen an die Planungsunterlagen
Vollständige Einbau- und Bedienungsanleitung
Flächendeckendes Kundendienstnetz
2-jährige Vollgarantie / 10-jährige Ersatzteilkhaltung

Tabelle 2: Anforderungen zur Erteilung des Wärmepumpen-Gütesiegels

Im Bereich der **Prozessintegration** (Abschnitt 2.5.2) fand die nationale Zusammenarbeit im Rahmen mehrerer Sitzungen des *Swiss National Teams* des *IEA Implementing Agreement on Process Integration Technologies* (Abschnitt 3.2.5) statt [17]. Unter anderem konnte ein Vorschlag für ein internationales Projekt zur Ausarbeitung und Erprobung von Methoden für eine bessere Erfassung ökologischer Aspekte bei der Prozessintegration erarbeitet werden. Leider war die Industriebeteiligung trotz der weiteren Unterstützung durch die SIA-Fachgruppe für Verfahrens- und Chemieingenieurwesen (**FVC**) bisher unbefriedigend. Es ist zu hoffen, dass sich dies mit dem Start eines für das Jahr 1999 geplanten Projekts mit bereits zugesagter namhafter Industriebeteiligung bessern wird.

3.2 Internationale Zusammenarbeit

Nachfolgend werden die wesentlichen institutionalisierten Kooperationen mit ausländischen Projektpartnern im Bereich des BFE-Forschungsprogramms *Umgebungswärme, Abwärme und Wärme-Kraft-Kopplung* erörtert.

3.2.1 Bilaterale Kooperation mit Nachbarländern

Über das Ergebnis eines gemeinsamen **Gütesiegels für Wärmepumpen** aus der Zusammenarbeit zwischen der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz FWS und den entsprechenden Organisationen in **Deutschland und Österreich** wurde oben bereits berichtet. Nur Serienprodukte können das internationale Gütesiegel erlangen. Dies verlangt das Vorhandensein von verbindlichen Stücklisten mit entsprechenden Konstruktionszeichnungen. Zum Test in Töss kann der Hersteller aus einer Baureihe eine Baugrösse wählen. Mindestens eine weitere Baugrösse wird durch das Testzentrum ausgewählt und ebenfalls getestet. In Töss werden auch die zum Erlangen des internationalen Gütesiegels erforderlichen elektrischen Sicherheitsprüfungen durchgeführt.

Im Bereich des Richtlinienwerks des Vereins Deutscher Ingenieure konnte die Schweiz durch einen Delegierten den Entwurf der **VDI-Richtlinie 4640 zur thermischen Nutzung des Untergrundes** mitgestalten. Bisher sind die Blätter 1 und 2 dieses Entwurfs erschienen [33].

Die **Electricité de France EdF** wünscht einen Ersatz der in Frankreich weitverbreiteten Elektrowiderstandsheizungen durch Wärmepumpen. Die *EdF* zeigt sich bei bilateralen Treffen an unserer Wärmepumpentechnologie und an unseren Planungswerkzeugen weiterhin sehr interessiert. Die *EdF* lässt eine für Frankreich geeignete Variante des BFE-Planungsprogramms *WP-Calc* ausarbeiten (vergleiche Abschnitt 2.5.1.1). Hier eröffnet sich für unsere Wärmepumpenhersteller ein grosser Markt!

3.2.2 Beteiligung am IEA Wärmepumpenprogramm

Die internationale Zusammenarbeit erfolgte im Wärmepumpenbereich auch dieses Jahr in erster Linie über die schweizerische Beteiligung am *Implementing Agreement for a Programme of Research, Development, Demonstration and Promotion of Heat Pumping Technologies der IEA*¹⁰ (**IEA Heat Pump Programme HPP**, [WWW 16]).

3.2.2.1 Heat Pump Centre (Annex16)

Das **Heat Pump Centre** des *HPP* (Annex¹¹ 16) informiert über internationale Fortschritte der Wärmepumpentechnologie, Ergebnisse der *HPP*-Projekte und über Marktentwicklungen in den Mitgliedländern Niederlande, Norwegen, Österreich, Schweiz, USA und Japan. Das *Heat Pump Centre* gab uns auch Gelegenheit, unsere Entwicklungen und Standpunkte einem breiten internationalen Fachpublikum bekanntzugeben. Innerhalb des *Swiss National Teams* fand wiederum ein reger Informations- und Gedankenaustausch zwischen verschiedenen schweizerischen Institutionen und Gruppierungen zur Förderung der Wärmepumpentechnologie in Forschung, Entwicklung, Markt und Betrieb der Wärmepumpentechnik statt. Nähere Auskünfte über die Tätigkeit des *Heat Pump Centre* und über die im Rahmen der einzelnen *HPP*-Projekte (Forschungs- und Entwicklungsprogramme) erarbeiteten Berichte findet man im *Internet* unter [WWW 18]. Hier können auch Berichte aus dem *HPP*-Programm der IEA bestellt werden. Das *Swiss National Team* ist mit aktuellen Informationen zur Wärmepumpentechnik über [WWW 17] erreichbar. Die Aufgaben des *Heat Pump Centre* werden zur Zeit neu definiert. Ein dieser Neudefinition gewidmetes Treffen der Mitgliedländer fand im Juni 98 in Zürich statt. Die **Teilung der Aktivitäten des Heat Pump Centre** in einen für alle Länder obligatorischen Basisteil und einen auf die Bedürfnisse einzelner Länder zugeschnittenen fakultativen Teil ist leider nicht nach unseren Vorstellungen gelungen. Die nun vorliegende Lösung bringt uns keine finanzielle Entlastung, sie wird keine weiteren Länder anziehen, und die Schweiz muss sich 1999 einen Austritt aus dem *Heat Pump Centre* ernsthaft überlegen. Das *Swiss National Team* wird neu mit der Begleitgruppe des BFE-Bereichs „Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung“ vereint.

¹⁰ International Energy Agency

¹¹ Die einzelnen Projekte eines IEA Implementing Agreement werden als *Annex* bezeichnet

3.2.2.2 Thermophysical Properties of Refrigerants (Annex 18)

Die Schweiz hat an diesem im Mai 1999 abzuschliessenden Projekt *Thermophysical Properties of Environmentally Acceptable Refrigerants* zwar nicht teilgenommen. An dieser Stelle sei aber doch auf den auch für Nichtmitgliedländer offenen Zugang zu den Resultaten über [WWW 19] hingewiesen. Die sehr wertvolle Stoffwertdatenbank enthält auch Stoffwerte diverser FKW-Mischungen, von R32/Propan und von Propan/Iso-butan.

3.2.2.3 Compression Systems with Natural Working Fluids (Annex 22)

Im HPP-Projektes 22 *Compression Systems with Natural Working Fluids* erarbeiten Kanada, die USA, Japan, Dänemark, Frankreich, England, Norwegen, die Niederlande und die Schweiz gemeinsam Planungsgrundlagen für die Anwendung natürlicher Kältemittel wie Ammoniak, Kohlenwasserstoffe, CO₂ oder Luft in Wärmepumpen und Kompressionskälteanlagen. Der Schlussbericht mit den in [35] bereits beschriebenen Schweizer Beiträgen wird anfangs 1999 unter dem Titel „Guidelines for Design and Operation of Heat Pump, AC and Refrigeration Systems with Natural Working Fluids“ erscheinen. Als Folgeprojekt ist eine Konzentration auf Wärmepumpenprozesse mit CO₂ als Arbeitsmittel geplant. Näheres in [WWW 20].

3.2.2.4 Heat pumps for single room applications (Annex 23)

Eine internationale Kooperation im Bereich *Entwicklung und Vermarktung von Einzelraumwärmepumpen* zwischen Kanada, Spanien, Frankreich, Schweden, den USA und der Schweiz erfolgt als HPP-Projekt 23 *Heat pumps for single room applications*. In diesem Vorhaben ging es um die Klärung der Anforderungen von Markt und Ökologie, einen Erfahrungsaustausch im Bereich der elektrischen Wärmepumpeneinzelraumheizung, eine Dokumentation laufender Forschungsarbeiten und um das Erfassen von Systemen, welche auch bei kalter Witterung eine hohe Jahresarbeitszahl ergeben und welche nicht zu Spitzenlastproblemen führen. Der Schlussbericht zu diesem Projekt wird anfangs 1999 erscheinen.

3.2.2.5 Advanced Supermarket Refrigeration, Heat Recovery Systems (Annex 26)

Die **Ziele** eines neuen, durch die USA angeregten Projekts für die Kühlung in Einkaufszentren sind:

- Reduktion der Kältemittelfüllung gegenüber heute auf 50%.
- Reduktion des Gesamtenergiebedarfs von Einkaufszentren für Kühlung und Raumklimatisierung (Heizung und Kühlung) um 15%.

Es sollen **vergleichend untersucht** werden:

- Systeme mit Sekundärkreislauf (Sole, Eissuspension, CO₂);
- Systeme mit dezentralen kleine Kompressoren;
- selbständige Einzelkühlgeräte mit vollständigem Kältekreislauf (Inselbetrieb).

Das Vorhaben wird auf den 1. Januar 1999 gestartet. Momentan laufen die Verhandlungen mit interessierten Firmen und Institutionen zur Klärung des Nutzens eines allfäll-

ligen Beitritts der Schweiz. Unsere Technik zur Kühlung von Einkaufszentren mit Ammoniak-Kältemaschinen und CO₂ als Kälteüberträger eilt der Praxis in vielen Ländern voraus. Eine Beteiligung der Schweiz wäre interessant, wenn unsere einschlägigen Firmen an einem Export unserer Technologie beispielsweise in die USA interessiert sind.

3.2.3 EU-Projekte

Das fünfte Forschungsrahmenprogramm der **Europäischen Union** wurde verabschiedet. Zusammen mit dem positiven Abschluss der Verhandlungen über die bilateralen Verträge mit der EU sind gute Voraussetzungen für eine Beteiligung an EU-Forschungsprojekten auch im Forschungsbereich UAW gegeben. Diese gilt es nun zu nutzen. Forschern und Entwicklern wird deshalb dringend geraten, sich über laufende Vorhaben und Ausschreibungen der EU zu informieren und mögliche Projekte mit dem Leiter des Forschungsprogramms UAW zu besprechen. Halten Sie sich auf dem Laufenden über die EU-Kanäle [WWW 21], [WWW 22] oder die schweizerischen Informationsquellen wie die Koordinationsstelle für die schweizerische Beteiligung an internationalen Forschungsprojekten (KBF, [WWW 23]), das Bundesamt für Bildung und Wissenschaft (BBW, [WWW 24]), das Schweizer Informationsnetz für die europäische Forschungszusammenarbeit [WWW 25] oder – wenn es zu einer Partnersuche kommt - über [WWW 26].

3.2.4 International Institute of Refrigeration (IIR)

Das *International Institute of Refrigeration (IIR)* ist auch für die Forschung und Entwicklung in der Wärmepumpentechnik ein bedeutendes Forum. Besonders wertvoll sind aus seinem Tätigkeitsbereich die Literaturübersichten im *IIR-Bulletin*, das *International Journal of Refrigeration*, der Literatursuchdienst und die internationalen Veranstaltungen. Näheres über [WWW 27]. Das Bundesamt für Energie hat deshalb die Kosten für die Mitgliedschaft der Schweiz übernommen.

3.2.5 Beteiligung am IEA Programm zur Prozessintegration

Im Bereich der **Prozessintegration** fand die internationale Zusammenarbeit im Rahmen des **IEA-Implementing Agreement on Process Integration** statt [WWW 28]. Der **Annex 1** als erstes Vorhaben dieses Programms wird durch die skandinavischen Länder, England, Portugal und der Schweiz getragen. Seine Themen sind: Erfassen der Bedürfnisse der Anwender, Übersicht über die vorhandenen und die sich in Entwicklung befindenden Methoden sowie Ausarbeitung einer Strategie zur weiteren Entwicklung der Methoden der Prozessintegration. An den Arbeiten beteiligte sich auch eine Arbeitsgruppe in der Schweiz. Dieses **Swiss National Team** pflegte nebst den internationalen Tätigkeiten auch einen regen nationalen Gedankenaustausch zu dem in der Schweiz auch durch die *Fachgruppe für Verfahrens- und Chemieingenieurtechnik* unterstützten Thema der Prozessintegration [17]. Eine Zusammenfassung des im Rahmen des Annex 1 erarbeiteten Katalogs zur Prozessintegration ist über [WWW 29] abrufbar. Der Übersichtsbericht (Survey) als wesentliches Produkt liegt nun als Entwurf vor. Er wird im Laufe des Jahres 1999 als Schlussbericht erscheinen. Der Annex 1 wurde bis zum Oktober 1999 in der Form eines Projektsekretariats verlängert. Neu ist

auch Kanada beigetreten.

Als weiteres Vorhaben wurde auf den 1. Dezember 1998 der Annex 3 **Process Integration in the Pulb and Paper industry** gestartet. Der Abschluss ist auf den 31. Mai 2001 vorgesehen. An diesem Projekt werden sich Norwegen, Schweden, Finnland und eventuell Kanada beteiligen.

Im Berichtsjahr wurde von der *EPFL* und dem *Swiss National Team* der Projektvorschlag **Process Integration Methodologies accounting for Sustainability Factors** zur Berücksichtigung von Aspekten der Ökobilanz bei der Prozessintegration ausgearbeitet. Dieser ist auf grosses internationales Interesse gestossen und dürfte im Jahr 1999 als Annex 4 zur Ausführung kommen. Ein entsprechender nationaler Projektvorschlag der ETHZ hat bereits eine hohe Industriebeteiligung gefunden.

Vom 7. bis 10. Mai 1999 findet in Kopenhagen eine **internationale Konferenz zur Prozessintegration** statt. An dieser werden Methoden, Computerprogramme und industrielle Anwendungen vorgestellt. Definitives Programm in [WWW 28].

4 TRANSFER IN DIE PRAXIS

Die sehr anwendungsnahen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten werden zu einem grossen Teil gemeinsam durch Privatfirmen und Hochschulen bearbeitet. Dadurch ist die direkte Zusammenarbeit mit der Privatwirtschaft sehr eng. Die im Jahr 1998 **bearbeiteten Forschungsarbeiten**

- sind **gute Grundlagen für eine industrielle Weiterentwicklung zu neuen Produkten** für Wärmepumpenheizungssysteme (Stiller Verdampfer für Luft/Wasser-Wärmepumpen [5], Entwicklung von Wärmepumpen mit Ammoniak als Arbeitsmittel [4], [6], zweistufige Wärmepumpen [19] und Wärmepumpen mit Hilfskreislauf zur Kondensatunterkühlung [21], [22]);
- dienen einer **besseren Auslegung** und damit einer Effizienzsteigerung und Kostenreduktion von Wärmepumpenheizungssystemen (Geothermische Eigenschaften des Schweizer Molassebeckens [8], Sommer-Regeneration von Erdwärmesonden [1], Erweiterung des Berechnungsmoduls für Erdwärmesonden [11], Verdampfung von Ammoniak-Ölgemischen [19], Handbuch zu Wärmepumpenheizungsanlagen für Niedrigenergiehäuser [15]);
- dienen einem **optimaleren Betrieb** und damit ebenfalls einer Verbesserung des Nutzen-/Kostenverhältnisses von Wärmepumpenheizungssystemen (dynamischer Wärmepumpentest [3], Pulsbreitenmodulation für Wärmepumpen [7], Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen [23], [12] und Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpen [13], [14]);
- tragen bei zu einem **ökonomischeren und ökologischeren Betrieb** von **Blockheizkraftwerken** (Betriebsoptimierung von Blockheizkraftwerken [2], Entwicklung eines emissionsarmen BHKW-Motors [18]) und

- ermöglichen die **Reduktion des Energiebedarfs verfahrenstechnischer Prozesse** und komplexer haustechnischer Anlagen durch eine systematische Konzeption mit den Methoden der Prozessintegration (Prozessintegration für Batch-Prozesse) [16], Handbuch zur Prozessintegration [10] und Einsatz der Pinch-Methode in der Haustechnik [9].

Mit den in der Fachpresse und im Internet [WWW 1] publizierten **Kurzfassungen** des Programmleiters wird laufend auf die Resultate abgeschlossener Vorhaben hingewiesen. Die in den UAW-Projekten erarbeiteten Ergebnisse und Werkzeuge werden durch **Publikationen** der Projektleiter in den einschlägigen Fachzeitschriften verbreitet.

Unter dem Titel *Wärme-Kraft-Kopplung - heute und morgen* fand am 12. Mai 98 die **fünfte UAW-Tagung des Bundesamts für Energie** an der HTA Burgdorf statt [24]. Im Gegensatz zu den vorangegangenen vier Tagungen wurde diesmal der Schwerpunkt auf die Wärme-Kraft-Kopplung als Komponente des Systems Wärme-Kraft-Kopplung - Wärmepumpe gelegt. An der sehr gut besuchten Tagung wurde gezeigt, dass sich durch die **Kombination** von Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen **mit Wärmepumpen** im Stromgleichgewicht [26] - aber auch durch eine Kombination von GuD-Kraftwerken hoher Effizienz (ohne Abwärmenutzung) und Wärmepumpen gegenüber Öl- und Gaskesseln bereits mit vorhandener Technik **Reduktionen des Brennstoffbedarfs um 35% bis 50%** erreichen lassen. Das noch bedeutende Verbesserungspotential wurde aufgezeigt [27].

Von den heute viel diskutierten Lösungen für **Kleinst-Blockheizkraftwerke** vermag nur die Brennstoffzellentechnologie einen genügenden elektrischen Wirkungsgrad zu erzielen. Und dies erst noch mit sehr geringen Schadstoffemissionen. An der Tagung konnten über Erfolge bei laufenden Feldversuchen mit SOFC-Kleinbrennstoffzellenmodulen mit bisher über 2000 Betriebsstunden ohne merkliche Degradation berichtet werden. Die Markteinführung in wenigen Jahren wird vorbereitet.

Im Zuge einer Anpassung an europäische Normen wurden in der schweizerischen Luftreinhalteverordnung die bisher für BHKWs einmalig strengen **Grenzwerte für Stickoxide** bei Gasmotoren auf den dreifachen Wert gelockert. Gleichzeitig wurden sie aber für Dieselmotoren verschärft. Die Erhöhung bei den Gasmotoren zugunsten eines katalysatorfreien Magermotorbetriebs darf nur eine Übergangslösung bleiben. Die Tagung verdeutlichte, dass die moderne **Katalysatortechnik** sogar bei den Dieselmotoren wesentlich tiefere Emissionswerte ermöglicht! Der Kunde muss diese fordern und durch die vorgestellten Betriebsüberwachungsmethoden dauernd sichern lassen. Leider muss er dafür etwas mehr Geld ausgeben.

Eine Übersicht zur Verwendung von **Biomasse** (insbesondere Holz) für Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen zeigte, dass Biomasse auf absehbare Zukunft am ehesten bei Grossanlagen mit über 20 MW elektrischer Leistung interessant wird. Bei der dezentralen Nutzung wird der inzwischen ausgereifte Holzkessel noch lange Standard bleiben.

Schliesslich wurde die Erhöhung der für die Wirtschaftlichkeit entscheidenden Betriebszeit durch **stromgeführten Betrieb** und durch den thermischen **Antrieb von Absorptionskälteanlagen** erörtert. Aus der Sicht der Elektrizitätsnetzbetreiber wurde darauf hingewiesen, dass der enorme Aufwand für die Netzstabilität auch durch die BHKW-Betreiber mitgetragen werden müsse.

Unter dem Titel „Energieplanung in Industrie und Haustechnik mit zukunftsweisender Methode“ konnten an der HTA Burgdorf zwei weitere **BFE-Kurse zur Prozessintegration** durchgeführt werden. Anhand von Praxisbeispielen aus der Prozess- und Haustechnik und eines speziell für diesen Kurs ausgearbeiteten deutschsprachigen Handbuchs [10] wurden die Teilnehmer in die Anwendung der Pinch-Methode eingeführt. Dieser Kurs fand ein sehr gutes Echo und sollte in Zukunft wiederholt werden.

Das auch vom Bundesamt für Energie unterstützte **Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum Töss** leistet einen erheblichen Beitrag zur Sicherung der Wärmepumpenqualität und zur Erhöhung der Effizienz der im Handel angebotenen Wärmepumpen. Die im wesentlichen¹² nach der Euronorm EN 255 ermittelten Testergebnisse werden regelmässig im WPZ-Bulletin publiziert. Sie können auch über das Internet abgerufen werden [WWW 10]. Ab dem Berichtsjahr wird in Töss auch die elektrisch-sicherheitstechnische Prüfung durchgeführt. Über die Erteilung des neuen Gütesiegels für Wärmepumpen wurde im Abschnitt 3.2.1 bereits berichtet.

Die von der *Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz (FWS)* organisierte **Wärmepumpen Expo 98** in Bern bot erneut eine ausgezeichnete Gelegenheit, die Vorteile, Möglichkeiten und Fortschritte der Wärmepumpenheizung einer grossen Besucherzahl am Objekt zu zeigen. Fachleute wurden durch Workshops in den Bereichen Planung, Dimensionierung und Marketing informiert. Die Veranstaltung fand bei Bauherren, Architekten und Planern grosse Beachtung. Über die Aktivitäten des Ressorts Aus- und Weiterbildung der *FWS* wurde im Abschnitt 3.1 berichtet. Ziel ist eine Verbesserung der Installationsqualität. Die Einführung des Wärmepumpen-Gütesiegels (Abschnitt 3.2.1) wird die Qualität von Wärmepumpen positiv beeinflussen.

5 AUSBLICK AUF 1999

Dank ihrem hohen **und kurzfristig realisierbaren Potential zur Reduktion der CO₂-Emission** und des Bedarfs an fossilen Brennstoffen [28], [29] hat die Wärmepumpentechnologie in Kombination mit der Wärme-Kraft-Kopplung nichts an Aktualität eingebüsst. Auch die für 1999 geplanten Forschungsarbeiten dienen in erster Linie dem Ziel, die **Effizienz** und die **Zuverlässigkeit** solcher Systeme zu erhöhen und deren **Preis** zu senken. Prioritär werden Entwicklungen für den **Sanierungsmarkt** behandelt, welche zu der bereits beschriebenen *Swiss Retrofit Heat Pump* führen. Im Einzelnen sind für 1999 die folgenden Beiträge vorgesehen:

- **Wärmepumpe für den Sanierungsmarkt:** Entwickeln eines Wärmepumpenmoduls hoher Effizienz und geringer Systemkosten mit möglichst natürlichem Arbeitsmittel für die im Sanierungsmarkt üblichen hohen Vorlauftemperaturen und Umgebungsluft als Wärmequelle gemäss den BFE-Spezifikationen (Abschnitt 2.3.1). Dieser Punkt erhält **höchste Priorität**. Im Sanierungsmarkt von EFH, Reihen-EFH sind rund 40'000 Heizungseinheiten pro Jahr zu ersetzen. Heute erreicht die Wärme-

¹²Verschärfend gegenüber der EN255 wird die maximale Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur auf 10 K begrenzt.

pumpe davon nur einen Anteil von ca. 2..3%. Ziel ist eine Steigerung des Wärmepumpenanteils am Sanierungsmarkt im Jahr 2000 auf 10%.

In diesem Zusammenhang sind folgende Projekte geplant:

- **Ammoniak-Kleinwärmepumpen:** Realisieren und Erproben eines Funktionsmusters einer kleinen Ammoniakwärmepumpe mit Ammoniakfalle (Abschnitt 2.3.2).
 - Weiterentwickeln der **Luft/Wasser-Elektrowärmepumpen** zu einem effizienten **monovalenten Betrieb ohne Wärmespeicher** im Heizungssystem (Abschnitte 2.3.3 und 2.3.4).
- **Systemoptimierung:** Optimierung ganzer **Wärmepumpenheizungssysteme** (Gesamtsystem Wärmequelle-Wärmepumpe-Wärmespeichersystem-Wärmeverteilsystem-Gebäude). In diesem Zusammenhang sind folgende Projekte geplant:
- Ausarbeiten und Erproben einer **Messmethode** zum Testen des dynamischen Verhaltens von Wärmepumpen (Abschnitt 2.5.1.2)].
 - Weiterentwickeln einer **Kurztestmethode** für die Betriebsoptimierung, die Betriebskontrolle und die Realisierung eines neuen Regelungskonzepts von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen gemäss dem Abschnitt 2.5.1.3 sowie Ausarbeiten und Erproben einer neuen Regelstrategie mit **Pulsbreitenmodulation** für Kleinwärmepumpen (Abschnitt 2.5.1.4).
 - Erproben kostengünstiger Wärmepumpenheizungssysteme für **Niedrigenergiehäuser** (Abschnitt 2.5.1.5).
- **Wärmequellen:** Computerprogramm zur einfachen Abschätzung der geothermischen Stoffwerte im Schweizer Molassebecken (Abschnitt 2.1.2.1), Erweitern des Berechnungsmoduls *EWS* auf Erdwärmesondenfelder (Abschnitt 2.1.2.2) und Implementieren des Berechnungsmoduls *EWS* in das Auslegungsprogramm *WP-Calc*.
- **Betriebsoptimierung** von Blockheizkraftwerken gemäss dem Abschnitt 2.4.2.
- Ausbauen und Verbessern der Werkzeuge zur Systemwahl, zur **Auslegung und zur Optimierung** von Heizungen mit Wärmepumpen oder Blockheizkraftwerken.
- **Abwärmennutzung:** Reduktion des Energiebedarfs industrieller Prozesse durch **Prozessintegration**. Anwendung der Methoden der Prozessintegration in der Haustechnik (Abschnitt 2.5.2.1), Entwickeln einer praktikableren Methode für Batch-Prozesse (Abschnitt 2.5.2.2), Einbringen ökologischer Aspekte in die Prozessintegration (CH-Fallbeispiel mit Industriebeteiligung, Übernahme der Leitung eines entsprechenden Projekts im Rahmen des *IEA Implementing Agreement on Process Integration* (Abschnitt 3.2.5).

Wie bereits erwähnt, erhalten Forschungsarbeiten im Zusammenhang mit der *Swiss Retrofit Heat Pump* erste Priorität. Im Rahmen dieser Ziele und unserer beschränkten finanziellen Mittel wird die Priorität bei den restlichen Themen auf jene Forschungsarbeiten gelegt, die zu einer verbesserten Planung und Qualitätssicherung, einer besse-

ren Systemoptimierung oder mit grosser Wahrscheinlichkeit zu **vermarktbareren Produkten mit hohem Energiesparpotential** führen. Dabei werden wir im Sinne guter Umsetzungschancen weiterhin versuchen, private Hersteller in einem möglichst frühen Stadium der Entwicklung zur Mitwirkung zu gewinnen.

Ebenfalls im Interesse der Umsetzung führen wir am **4.Mai 1999** an der HTA Burgdorf **die sechste öffentliche UAW-Tagung** mit dem Thema „Feldanalyse von Wärmepumpen“ durch.

Das Programm mit Anmeldeformular ist bei ENET zu beziehen.

6 QUELLEN

6.1 Forschungsprojekte im Jahr 1998

Die aufgeführten Zwischen- und Schlussberichte sowie die Referenzen mit ENET-Nummer können unter Angabe der entsprechenden Nummer bei ENET bestellt werden:

*ENET, Administration und Versand, Postfach 130, 3000 Bern 16
031-350-00-05 n+1@email.ch Fax 031-352-77-56.*

Die aufgeführten Jahresberichte sind in einem separaten Anhang zusammengestellt.

- [1] W.Hässig, D.Sutter, BASLER & HOFMANN, Zürich & Bigler,R, WERNER + PARTNER AG, Burgdorf & A.Huber, HUBER ENERGIETECHNIK, Zürich: **Regeneration von Erdwärmesonden, Phase 1** (SB, ENET-Nr. 9722601/1)
- [2] M.Erb, DR.EICHER + PAULI AG, Liestal: **Betriebsoptimierung von Blockheizkraftwerken, Phase 1: Betriebskenngrössen** (Jahresbericht im **Anhang**, ENET-Nr. 66400)
- [3] M. Ehrbar, FH-Buchs: **Dynamischer Wärmepumpentest** (Jahresbericht im **Anhang**, ENET-Nr. 9720132/1)
- [4] T.Boyman, Th.Schmid, FH-Horw & A.Flück, NEK UMWELTTECHNIK, Zürich: **Kleinwärmepumpen mit Ammoniak - Phase 1: Kleinwärmepumpen mit Ammoniak, Vergleich von Ammoniak mit Propan, R407C und R2** (SB, ENET-Nr. 9719746/2)
- [5] P.von Böckh, FH-Muttenz: **Stiller Verdampfer für Luft/Wasser-Wärmepumpen** (SB, ENET-Nr. 97/21060/1)

- [6] Th.Kopp, FH-Rapperswil, **Kleinwärmepumpen mit Ammoniak - Phase 2: Kompressor- und Ammoniakfallentest.** (Jahresbericht im **Anhang**, ENET-Nr. 9719746)
- [7] H.R. Gabathuler, H. Mayer, GABATHULER, *Diessenhofen* & E.Shafai, R.Wimmer, IMRT/ETH-Zürich.: **Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen, Phase I** (ZB, ENET-Nr. 9723972/1);
H.R. Gabathuler, GABATHULER, *Diessenhofen: Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen, Phase I* (Jahresbericht im **Anhang**, ENET-Nr. 9723972)
- [8] W. Leu, GEOFORM, *Winterthur: Geothermische Eigenschaften des Schweizer Molassebeckens.* (ZB, Jahresbericht im **Anhang**, ENET-Nr. 9723763)
- [9] R.Bendel, HELBLING INGENIEURUNTERNEHMUNG, *Zürich: Einsatz der Pinch-Methode in der Haustechnik* (Jahresbericht im **Anhang**, ENET-Nr. 9825230)
- [10] R.Morand, R.Bendel, HELBLING INGENIEURUNTERNEHMUNG, *Zürich*, & R.O. Brunner, BRUNNER + PARTNER, *Neuenhof* & Hp. Pfenninger, KONVEKTA AG, *St.Gallen: Prozessintegration mit der Pinch-Methode - Handbuch zum BFE-Kurs "Energieplanung in Industrie und Haustechnik"* (SB, ENET-Nr. 9658854/3)
- [11] A.Huber, HUBER ENERGIETECHNIK, *Zürich* & D.Pahud, LASEN / EPF-Lausanne: **Erweiterung des Programms EWS für Sondenfelder** (Jahresbericht im **Anhang**, ENET-Nr. 9819227)
- [12] E.Shafai, IMRT/ETH-Zürich: **Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen - Phase 4: Modellierung und Parameteridentifikation der Wärmepumpe** (Jahresbericht im **Anhang**, ENET-Nr. 9817822)
- [13] Th. Afjei, D. Wittwer, INFEL, *Zürich* & W. Betschart, A.Glass, M. Wetter, G. Zweifel, HTL-Horw & H.P. Geering, S. Ginsburg, E.Shafai, IMRT / ETH-Zürich & A.Huber, HUBER ENERGIETECHNIK, *Zürich* & R. Bircher, BIRCHER+KELLER, *Sissach* & G.Doka, INGENIEURBÜRO DOKA, *Zürich: Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe - Phase 2: Ökologischer und ökonomischer Vergleich, Systemoptimierung, intelligente Regelung, Versuche* (SB, ENET-Nr.9655701)
- [14] Th.Afjei, INFEL, *Zürich: Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe - Phase 3: Test an Funktionsmustern* (Jahresbericht im **Anhang**, ENET-Nr. 9816187)
- [15] Th.Afjei, INFEL, *Zürich: Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe - Phase 4: Handbuch* (Jahresbericht im **Anhang**, ENET-Nr. 9816187)
- [16] P. Krummenacher, LENI/EPF-Lausanne: **Intégration énergétique de procédés industriels discontinus** (Jahresbericht im **Anhang**, ENET-Nr. 9655360)
{<http://lenipc8.epfl.ch/scripts/olecgi.exe/Lookup?TableName%3DProjects%26FieldName%3DTitle%26Value%3DPinchBATCH>}
- [17] P.Krummenacher, LENI/EPFL-Lausanne: **Direction du NT Suisse pour l'annexe 1 de l'IEA-IA on Process Integration** (Jahresbericht im **Anhang**, ENET-Nr. 9554740)

- [18] R.Röthlisberger, D.Favrat, G.Leyland, C.-A. Paschoud, LENI/EPF-Lausanne: *Swiss Motor: Modification d'un moteur diesel pour le fonctionnement au gaz naturel en cogénération* (SB, ENET 9553707/2)
- [19] M. Zehnder, LENI/EPFL-Lausanne: *Pompe à chaleur biétagée à haute performance, phase 2* (Jahresbericht im **Anhang**, ENET-Nr. 9710478)
- [20] O. Zürcher, D.Favrat, J.R.Thome, LENI/EPF-Lausanne: *Evaporation de mélanges d'ammoniac et d'huile dans des tubes* (SB, ENET-Nr. 9656540/1)
{<http://lenipc8.epfl.ch/scripts/olecgi.exe/Lookup?TableName%3DProjects%26FieldName%3DTitle%26Value%3DHeat%20Transfer%20and%20Flow>}
- [21] M.Zehnder, D.Favrat, LENI/EPF-Lausanne & G.Reiner, SULZER FRIOTHERM, *Rothenburg* & C.Brugnoli, CRYOTHERM, *Toffen: Wärmepumpe mit Hilfskreislauf zur Kondensatunterkühlung, Phase 1: Potentialstudie* (SB, ENET 9824787/1)
- [22] G.Reiner, SULZER FRIOTHERM, *Rothenburg: Wärmepumpe mit Hilfskreislauf zur Kondensatunterkühlung, Phase 2: Funktionsmuster* (Jahresbericht im **Anhang**, ENET 9824787)
- [23] G.Reiner, SULZER FRIOTHERM, *Rothenburg* & E.Shafai, R.Wimmer, D.Zogg, *IMRT / ETH-Zürich* & H.R.Gabathuler, H.Mayer, GABATHULER, *Diessenhofen* & H.U.Bruderer, SATAG THERMOTECNIK, *Arbon: Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen - Phase 3: Messung, Modellierung und Erprobung der Parameteridentifikation* (SB, ENET-Nr. 9657407/3)

ZB	Zwischenbericht, Bundesamt für Energie 1998
SB	Schlussbericht, Bundesamt für Energie 1998

6.2 Weitere Referenzen

- [24] M.Zogg (Hrsg.): *Wärme-Kraft-Kopplung – heute und morgen*, Tagungsband zur 5.UAW-Tagung, Bundesamt für Energie 1998, ENET-Artikel 30743
- [25] M.Zogg: *Bessere Primärenergienutzung – ein Gebot der Stunde*, [24]. S.5/6, Gratisdownload aus [WWW 1] möglich.
- [26] M.Zogg: *Wann sind Kleinstblockheizkraftwerke energetisch sinnvoll?*, Gas, Wasser, Abwasser 78(1998)12, 959/966, Gratisdownload aus [WWW 1] möglich.
- [27] M.Zogg: *Wärme-Kraft-Kopplung in Kombination mit Kompressionswärmepumpen*, [24]. S.7/14 und Heizung Klima 25(1998)7, 60/63, Gratisdownload aus [WWW 1] möglich.
- [28] M.Zogg: *Maximale Primärenergienutzung und CO₂-Reduktion mit Wärmepumpenheizsystemen*, Bundesamt für Energie 1998, ENET-Art.30876, Gratisdownload aus [WWW 1] möglich.

- [29] F.Rognon: *50% weniger CO₂ durch Nutzung erneuerbarer Energie mit Wärmepumpen*, SSES (1998)5, 4/9, Gratisdownload aus [WWW 18] möglich.
- [30] P.Suter: *Schadstoffreduktion durch Wärmepumpen in der Schweiz*, Bulletin SEV/VSE 89(1998)24, 19/21
- [31] D.Zogg, E.Shafai: *Modellbasierte Fehlerdiagnose an Wärmepumpen*, Bulletin SEV/VSE 89(1998)24, 33/37
- [32] M.Zogg, R.Morand: *Mit der Pinch-Methode zu optimalen Prozessen*, Gas, Wasser, Abwasser 78(1998)2, 104/111. (ENET-Nr. 9658854/1)
- [33] *VDI-Richtlinie 4640: Thermische Nutzung des Untergrundes, Blatt 1: Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte, Blatt 2: Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen*. Bezugsquelle: [WWW 14].
- [34] R.P.Roethlisberger, G.Leyland, D.Favrat, R.R.Raine: *Study of a Small Size Cogeneration Gas Engine in Stoichiometric and Lean Burn Modes*: Experimentation and Simulation, SAE Technical Paper Series 982451, International Fall Fuels and Lubricants Meeting and Exposition, San Francisco, California, October 19-22, 1998
- [35] M.Zogg: *Jahresübersicht 1997 zum Forschungsprogramm „Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW)“* - ausführliche Fassung, Bundesamt für Energie 1998, ENET-Artikel 30792 (auf [WWW 1] abrufbar).

6.3 Internet-Adressen

6.3.1 Referenzen

- [WWW 1] www.waermepumpe.ch/fe
BFE-Forschungsprogramm *Umgebungswärme, Abwärme und Wärme-Kraft-Kopplung*
- [WWW 2] www.mech.canterbury.ac.nz/docs/assignment/pinch.htm
Einführung in die Pinch-Methode.
- [WWW 3] <http://telemann.ltt.rwth-aachen.de/~roosen/papers/chemeng-96/node4.html>
Einführung in die Pinch-Methode.
- [WWW 4] www.exergy.se/mei/papers/exergy-pinch/index.html
Einführung in die Prozessintegration – Vergleich mit der exergetischen Analyse
- [WWW 5] www.interduct.tudelft.nl/PItools/tools.html
Umfassende Übersicht zur Software für die Prozessintegration
- [WWW 6] www.svgw.ch/
Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches (SVGW)

- [WWW 7] www.erdgas.ch
Verband der Schweizerischen Gasindustrie VSG
- [WWW 8] www.erdoel.ch/ube_ind.htm
Forschungsfonds der Erdöl-Vereinigung, FEV
- [WWW 9] www.psel.ch
Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft PSEL
- [WWW 10] www.wpz.ch
Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum Winterthur-Töss (mit detaillierten Prüfungsergebnissen von Wärmepumpen)
- [WWW 11] www.nok.ch
Nordostschweizerische Kraftwerke (NOK)
- [WWW 12] www.ekz.ch
Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (EWZ)
- [WWW 13] www.fws.ch
Förderungsgemeinschaft Wärmepumpen Schweiz (FWS)
- [WWW 14] www.beuth.de
Beuth-Verlag: Auslieferung von VDI-Richtlinien
- [WWW 15] www.edf.fr/der
EdF Forschung und Entwicklung
- [WWW 16] www.iea.org/techno.htm
International Energy Agency, technische Projekte
- [WWW 17] www.heatpumpcentre.org
Heat Pump Centre (Informationszentrum des IEA-Wärmepumpenprogramms)
- [WWW 18] www.waermepumpe.ch/hpc
Swiss National Team des Heat Pump Centre: Informationen über Wärmepumpen, Markt und Technik, Links zu weiteren Wärmepumpen-Informationen
- [WWW 19] www.itt.uni-stuttgart.de/~krauss/welcome.htm
Datenbank des Annex 18 „Thermophysical Properties of Environmentally Acceptable Refrigerants“. Einstieg in die Datenbank mit Klicken auf "MIDAS Database".
- [WWW 20] www.maskin.ntnu.no/kkt/annex22
Annex 22 „Compression Systems with Natural Working Fluids“
- [WWW 21] www.cordis.lu/
Übersicht zu den europäischen Forschungsprogrammen
- [WWW 22] www.cordis.lu/fifth/home.html

Übersicht zum 5.Rahmenprogramm

- [WWW 23] www.kbf.ch
Laufende Orientierung durch die Koordinationsstelle für die schweizerische Beteiligung an internationalen Forschungsprojekten.
- [WWW 24] www.admin.ch/bbw/d/forschint/auswahl.html
Bundesamt für Bildung und Wissenschaft – internationale Forschung
- [WWW 25] www.rektorat.unizh.ch/international/
Schweizer Informationsnetz für die europäische Forschungszusammenarbeit
- [WWW 26] www.euratin.net
Hilfe für Partnersuche
- [WWW 27] www.iifir.org
International Institute of Refrigeration
- [WWW 28] www.maskin.ntnu.no/tev/iea/pi/
IEA Implementing agreement on process integration
- [WWW 29] www.maskin.ntnu.no/tev/iea/pi/catalogue.html
Katalog zur Prozessintegration

6.3.2 Weitere nützliche Adressen

www.admin.ch/bfe	Bundesamt für Energie Übersichtsberichte zu allen Energieforschungsprogrammen Informationen zu Energie 2000
www.waermepumpe.ch/pd	Bundesamt für Energie Homepage des Bereichs Umgebungswärme, WKK (Erscheint 1999)
www.infoenergie.ch/p_d/	Berichte zu Pilot- und Demonstrationsprojekten Übersicht und Bestellung
www.svk.ch	Schweizerischer Verein für Kältetechnik
www.jgp.ch/awp	Arbeitsgemeinschaft Wärmepumpen Schweiz
www.fiz-karlsruhe.de/peu/izw	IZW Informationszentrum Wärmepumpen+Kältetechnik, Fachinformationszentrum Karlsruhe: Aktivitäten in Deutschland und in der EU
www.eetic.org www.caddet-ee.org www.caddet.co.uk	Caddet , IEA Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies: allgemeine Information rationeller Energieeinsatz erneuerbare Energien
http://europa.eu.int/comm/dg12/joule1.html	EU-Forschungsprojekte im Bereich nicht-nuklearer Energien (4.Rahmenprogramm)
http://europa.eu.int/en/comm/dg17/thermie.htm	EU-Pilot- und Demonstrationsprojekte im Bereich nicht-nuklearer Energien (4.Rahmenprogramm)

7 ANHANG: JAHRESBERICHTE DER PROJEKTLER

Der separate Anhang enthält die im Abschnitt 6.1 aufgeführten Jahresberichte der Projektleiter. Er ist bei ENET zu beziehen (*Bitte ausdrücklich nur den Anhang zu diesem Schlussbericht, ENET-Art.30919 verlangen*).