

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

Jahresübersicht 1997 zum Forschungsprogramm UAW

Ausführliche Fassung

ausgearbeitet durch
Prof.Dr.Martin Zogg
Kirchstutz 3, 3414 Oberburg

im Auftrag des
Bundesamtes für Energiewirtschaft

Inhaltsverzeichnis

1	PROGRAMMÜBERSICHT UND PROGRAMMZIELE	4
2	DURCHGEFÜHRTE FORSCHUNGSARBEITEN UND ERGEBNISSE	8
	2.1 Wärmequellen	8
	2.1.1..Umgebungsluft	9
	2.1.2..Erdwärme	10
	2.1.2.1 Berechnungsmodul EWS für Erdwärmesonden	10
	2.1.2.2 Geothermische Eigenschaften des Schweizer Molassebeckens	11
	2.1.2.3 Aufladung von Erdwärmesonden	11
	2.2 Wärmeübertragung	12
	2.3 Wärmepumpen	13
	2.3.1..Kompressionswärmepumpen mit natürlichem Kältemittel	14
	2.3.1.1 Grosswärmepumpe mit Ammoniak	14
	2.3.1.2 Kleinwärmepumpen mit Ammoniak	15
	2.3.2..Zweistufige Kleinwärmepumpe	17
	2.3.3..Wärmepumpe für den Sanierungsmarkt	19
	2.3.4..Absorptionswärmepumpen	21
	2.3.4.1 AWP-Kessel	21
	2.3.4.2 Potentialabschätzung für konventionelle Absorptionswärmepumpen	22
	2.4 Blockheizkraftwerke	23
	2.4.1..Betriebsemissionsüberwachung von BHKW-Motoren	23
	2.4.2..Entwicklung eines emissionsarmen Gasmotors (<i>Swiss-Motor</i>)	26
	2.4.3..Kleinblockheizkraftwerke	27
	2.4.3.1 Neuer Motor mit äusserer Verbrennung	27
	2.4.3.2 Stirling-Freikolben-Energiemodul	27
	2.5 Systemoptimierung	28
	2.5.1..Raumheizung mit Wärmepumpen	28
	2.5.1.1 Dynamischer Wärmepumpentest	29
	2.5.1.2 Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen	29
	2.5.1.3 Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe	32
	2.5.2..Integration verfahrens- und energietechnischer Prozesse	34
	2.5.2.1 Energetische Integration bei Batch-Prozessen	34
	2.5.2.2 Umsetzung der Pinch-Methode	35
3	ZUSAMMENARBEIT	36
	3.1 Nationale Zusammenarbeit	36
	3.2 Internationale Zusammenarbeit	37
	3.2.1..Bilaterale Kooperation mit Nachbarländern	37
	3.2.2..Beteiligung am IEA Wärmepumpenprogramm	37
	3.2.2.1 Heat Pump Centre (Annex 16)	38
	3.2.2.2 Compression Systems with Natural Working Fluids (Annex 22)	38
	3.2.2.3 Heat pumps for single room applications (Annex 23)	39
	3.2.2.4 Low-Temperature Low-Cost Heat Pump Heating System (Annex 25)	39
	3.2.3..EU-Projekte	40
	3.2.4..International Institute of Refrigeration (IIR)	40

	3.2.5. Beteiligung am IEA Programm zur Prozessintegration	41
	3.2.5.1 Erfassen der Bedürfnisse der Anwender - Benutzerübersicht	41
	3.2.5.2 Katalog zur Prozessintegration	43
	3.2.5.3 Künftige Aktivitäten	43
4	TRANSFER IN DIE PRAXIS	43
5	AUSBLICK AUF 1998	46
6	QUELLEN	48
	6.1 Forschungsprojekte im Jahr 1997	49
	6.2 Weitere Referenzen	50
	6.3 Internet-Links	52
7	ANHANG 1: PFLICHTENHEFT <i>SWISS RETROFIT HEAT PUMP</i>	53
8	ANHANG 2: IIR-WÄRMEPUMPENKONFERENZ 1997	55

1 PROGRAMMÜBERSICHT UND PROGRAMMZIELE

Das Forschungsprogramm „Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung UAW“ befasst sich mit der Nutzung der Umgebungswärme (Luft, Erdboden, Grund- und Oberflächenwasser) und von Abwärme (Gebäude, industrielle Prozesse) für die Raumheizung, zur Warmwasserbereitung und für industrielle Prozesse. Über 50 % des gesamten Endenergiebedarfs der Schweiz werden für diese Wärmeanwendungen benötigt. Dieses Forschungsprogramm möchte die Wissenslücken schliessen, um in Zukunft einen wesentlich **höheren Anteil der Niedertemperaturwärme aus Umgebungswärme oder aus Abwärme gewinnen** zu können. 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-Emissionen** entsprechend **reduzieren**.

Im allgemeinen werden zur Anhebung des Temperaturniveaus von Umgebungs- und Abwärmequellen auf Nutztemperaturen Wärmepumpen benötigt. Elektrisch angetriebene Kompressionswärmepumpen haben sich dazu als Standardlösung etabliert. Die für den Antrieb neuer Elektrowärmepumpen benötigte elektrische Energie kann durch Einsparungen beim Ersatz vorhandener Elektrowiderstandsheizungen mit Wärmepumpen, durch vermehrte Elektrizitätsproduktion in Kehrlichtverbrennungsanlagen (zu rund 50% erneuerbare Energie!) und durch **Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK)** gewonnen werden. Als WKK-Anlagen kommen dezentrale Blockheizkraftwerke¹ (BHKW), grössere Kombi-Heizkraftwerke² (K-HKW) und in absehbarer Zukunft auch Brennstoffzellen in Frage. Dank ihrem hohen elektrischen Wirkungsgrad von gegen 60% sind aber auch zentrale Kombikraftwerke³ (K-KW) ohne Abwärmenutzung in Verbindung mit Elektrowärmepumpen durchaus eine sinnvolle Alternative für die Produktion von Wärme für die Raumheizung. Für den CO₂-freien Betrieb steht natürlich auch die politisch allerdings umstrittene nukleare Option offen.

Das Bild 1 zeigt den nach [41], Anhang 1 errechneten **Gesamtnutzungsgrad** für die Wärmeproduktion bei der **Kombination von Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen mit Elektrowärmepumpen**. Dabei wird davon ausgegangen, dass die gesamte Stromproduktion der in der Tabelle 1 aufgeführten WKK-Anlagen zum Antrieb von Elektrowärmepumpen dient. Zum Vergleich enthält die Tabelle 1 auch Anhaltswerte für ein gros-

¹ Blockheizkraftwerke mit Verbrennungsmotoren oder Gasturbinen produzieren am Ort geeigneter Wärmeverbraucher gleichzeitig Wärme und elektrische Energie.

² Kombi-Heizkraftwerke erzeugen mit einer Kombination von Gas- und Dampfturbinen elektrischen Strom. Die Abwärme wird über eine Fernwärmeversorgung zur Raumheizung genutzt.

³ Kombikraftwerke erreichen durch eine Kombination von Gas- und Dampfturbinen derzeit elektrische Wirkungsgrade gegen 60%. Die Abwärme wird nicht genutzt (Kühltrum, Flusskühlung).

ses Kombikraftwerk ohne Abwärmenutzung. Die Jahresarbeitszahlen (über ein Jahr gemittelte Leistungszahl⁴ heute installierter Wärmepumpen liegen zwischen 2.75 und 4.00. In einzelnen Fällen werden insbesondere bei Grossanlagen Werte bis 5.00 erreicht: Abschnitt 2.3.1.1.

WKK-Anlage	Gesamt-Wirkungs-grad h_{tot}	elektrischer Wirkungs-grad h_{el}	Wirkungs-grad der Wärme-vertei-lung $h_{üQ}$	Wirkungs-grad der Stromüber-tragung $h_{üel}$
BHKW über 75 kW _{el}	90%	35%	100%	95%
K-HKW	90%	45%	90%	92%
K-KW	58%	58%		92%

Tabelle 1: Anhaltswerte zum Stand der Technik für Kombinationen von Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen mit Elektrowärmepumpen zur Raumheizung. Bezug auf den unteren Heizwert der eingesetzten Brennstoffe.

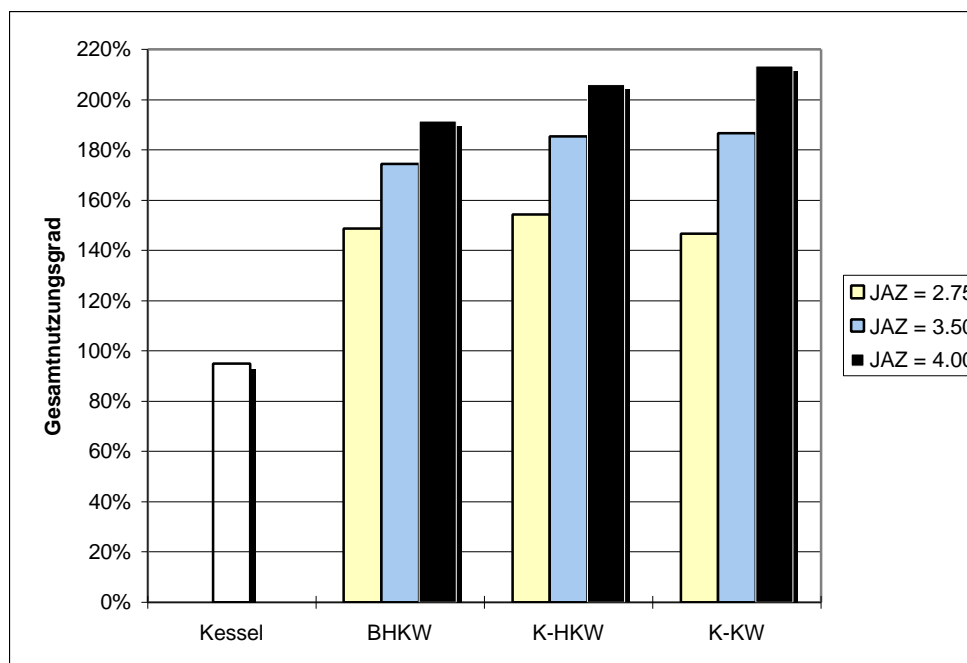


Bild 1: Heute erreichbare Gesamtnutzungsgrade mit den in der Tabelle 1 aufgeführten WKK-WP-Kombinationen für Aussenluft, Erdwärme und Grund- oder Seewasser als Wärmequelle. Anhaltswert von 95% für Kesselheizungen zum Vergleich. BHKW: grösseres Blockheizkraftwerk, K-HKW: grösseres Kombi-Heizkraftwerk, K-KW: grösseres Kombikraftwerk ohne Abwärmenutzung. Bezug auf den unteren Heizwert der eingesetzten Brennstoffe.

⁴ Leistungszahl einer Elektrowärmepumpe: Verhältnis der abgegebenen Nutzwärme zur benötigten elektrischen Energie.

Während der Nutzungsgrad⁵ konventioneller Heizungssysteme mit Öl- oder Gaskesseln knapp 100% beträgt, erreicht man mit dem Verbund von Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen oder Kombikraftwerken mit modernen Elektrowärmepumpenanlagen **wesentlich höhere Nutzungsgrade von 140 bis 220%**. Durch Steigern des elektrischen Wirkungsgrads auf der WKK-Seite wie auch durch das Entwickeln von Wärmepumpen mit höheren Leistungszahlen auf der Wärmepumpenseite lassen sich **noch erhebliche Verbesserungen erreichen**. Während sich die Wirkungsgradsteigerungen bei der Wärme-Kraft-Kopplung zumindest vorläufig⁶ an technische Grenzen nähert, sind höhere Jahresarbeitszahlen bei den Heizungsanlagen mit Wärmepumpen durchaus noch möglich. Darauf legen wir im Forschungsprogramm *Umgebungswärme, Abwärme und Wärme-Kraft-Kopplung* deshalb höchstes Gewicht.

Das Bild 1 verdeutlicht im weiteren, dass die Diskussion um die Frage „Dezentrale Blockheizkraftwerke oder zentrale Kombikraftwerke (mit und ohne Abwärmenutzung)?“ aus der Sicht einer guten Primärenergienutzung durchaus offen bleibt. Mit effizienten Wärmepumpen ergeben Kombikraftwerke auch ohne Abwärmenutzung höhere Gesamtnutzungsgrade als gute BHKWs. Die Installation von BHKWs mit elektrischen Wirkungsgraden unter 35% ist aus der Sicht einer guten Primärenergienutzung jedenfalls fraglich. Dies erklärt unser bescheidenes Engagement bei den Mini-Blockheizkraftwerken.

Mit der dargelegten Kombination von WKK-Anlagen mit Elektrowärmepumpen aber auch mit fortgeschrittenen Absorptionswärmepumpen lassen sich gegenüber den üblichen Öl- und Gasheizkesseln **schon heute 30 bis 50% an Brennstoffen zur Raumheizung einsparen** und damit die **CO₂-Emission entsprechend reduzieren**. Die genannten Systeme können hinsichtlich Wirkungsgrad, Betriebssicherheit und Kosten noch wesentlich verbessert werden. Der Ersatz der bisher in Kompressionswärmepumpen üblichen Arbeitsmittel durch umweltverträglichere fordert auch konstruktiv neue Lösungen (z.B. Brennbarkeit beherrschen).

Bei den Wärmepumpen wurden in den letzten Jahren insbesondere dank verbesserter Kompressor- und Wärmeübertragerkonstruktionen erhebliche Fortschritte erzielt. Der **hohe technische Stand der besten kommerziellen Wärmepumpen** zeigt sich in einem hohen exergetischen Wirkungsgrad (Gütegrad), der sich mit rund 38% bei Luft/Wasser - 50% bei Sole/Wasser - und 55% bei Wasser/Wasser-Wärmepumpen den Spitzenwerten von rund 75% sehr aufwendiger Versuchsmaschinen schon beachtlich nähert. Durchaus noch mögliche Verbesserungen insbesondere bei Luft/Wasser-Wärmepumpen bilden einen Schwerpunkt dieses Forschungs- und Entwicklungsprogramms.

Im Bereich der **Abwärmenutzung** legten wir den Schwerpunkt auf Verbreitung und Weiterentwicklung von Methoden der Prozessintegration für die Prozesstechnik, die Energietechnik und die komplexe Haustechnik. Leider sind die Vorteile dieser Methoden in der Praxis der erwähnten Bereiche nicht bekannt.

⁵ Nutzungsgrad = produzierte nutzbare Wärme / benötigte Brennstoffenergie (Basis: unterer Heizwert).

⁶ Oxidkeramische Brennstoffzelle mit Abwärmenutzung in thermischen Turbomaschinen dürften hier in einigen Jahren nochmals eine erhebliche Verbesserungsschub bringen.

Die **Methoden der Prozessintegration** führen zu einem systematischen Vorgehen für die optimale Konzeption neuer und die Verbesserung bestehender Produktionsanlagen der Verfahrens-, Energie und 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 bereits mit Erfolg eingesetzt. Sie erlaubt, den Energiehaushalt komplexer Prozesse und ganzer Anlagen mit nur zwei Kurven darzustellen (Bild 2) und energetisch optimale Lösungen systematisch zu konzipieren. Diese Methode lässt sich auch für Stoffströme (beispielsweise zur Reduktion des Kühlwasserbedarfs, der Emissionen und des Abwasseranfalls einer Anlage) anwenden. Näheres in [36].

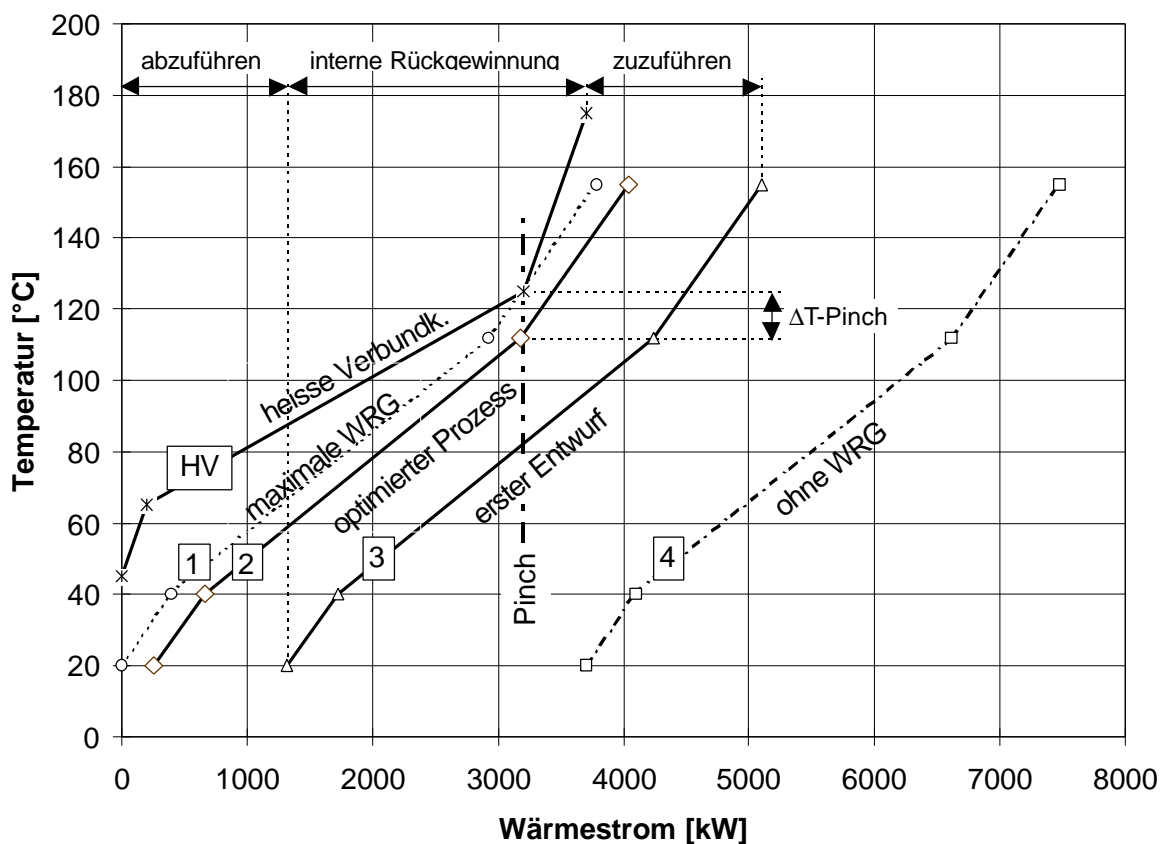


Bild 2: Verbundkurven zur Darstellung der Energieströme eines (bliebig komplexen) Prozesses. Verbundkurven (Kompositkurven) für das Beispiel in [38]. HV: Verbundkurve der heißen Ströme, 1 bis 4: Verbundkurven der kalten Ströme für Lösungen mit abnehmendem Wärmerückgewinnungsgrad (aus [38]).

Im Forschungsprogramm UAW wurden **im Jahr 1997 die nachstehend aufgeführten Hauptziele** verfolgt und im wesentlichen bis zu den geplanten Etappenzielen erreicht:

- **Wärmequellen:** Verbessern der Nutzung von Umgebungsluft und Erdwärme.
- **Wärmeübertragung:** Entwickeln verlässlicherer Grundlagen zur Dimensionierung von Verdampfern für alternative und insbesondere natürliche Arbeitsmittel.

- **Kompressionswärmepumpen mit natürlichen Arbeitsmitteln:** Erarbeiten der Grundlagen für Ammoniak-Kleinwärmepumpen.
- **Wärmepumpe für den Sanierungsmarkt:** Entwickeln einer zweistufigen Wärmepumpe hoher Effizienz mit Umgebungsluft als Wärmequelle. Durchführen und Bewerten einer Ausschreibung für eine neue Wärmepumpe für den Sanierungsmarkt.
- **Verbesserungen an Wärmepumpenheizungssystemen:** Entwickeln von Methoden für den dynamischen Wärmepumpentest sowie dem Test und der Optimierung von Wärmepumpenheizungssystemen im Betrieb. Entwickeln eines ökonomisch und ökologisch optimalen Wärmepumpenheizungssystems für Minienergiehäuser.
- **Blockheizkraftwerke:** Ausarbeiten und Erproben von Methoden zur Emissionsüberwachung bei BHKWs mit Dreiwegekatalysator im Betrieb, Entwickeln eines emissionsarmen Gasmotors und von Motoren mit äusserer Verbrennung (mit dem Fernziel eines Betriebs mit Biomasse).
- **Prozessintegration:** Weiterentwickeln der Methoden zur Reduktion des Energiebedarfs auch für Batch-Prozesse und Umsetzung der Methoden der Prozessintegration in die Praxis.

Leider musste die geplante Realisation eines **AWP-Kessels** (Heizkessel mit integrierter Absorptionswärmepumpe mit deutlich höherem Nutzungsgrad als bisherige Brennwärtekessel) infolge von Lizenzvergaben ins Ausland und mangelnder Beteiligung der Schweizerischen Kesselhersteller aufgegeben werden.

2 DURCHGEFÜHRTE FORSCHUNGSARBEITEN UND ERGEBNISSE

Nachfolgend werden die 1997 im Forschungsprogramm *Umgebungswärme, Abwärme und Wärme-Kraft-Kopplung (UAW)* durchgeführten Forschungsarbeiten und - soweit bereits verfügbar - ihre Hauptergebnisse zusammenfassend dargestellt. Die Gliederung erfolgt nach den Gebieten Wärmequellen, Wärmeübertragung, konventionelle Wärmepumpen, neue Wärmepumpenkonzepte, Blockheizkraftwerke, Auslegungs- und Optimierungswerkzeuge, Systemoptimierung und Diverse.

2.1 Wärmequellen

Bei der Nutzung der Umgebungsluft als wichtigste Wärmequelle für Wärmepumpen wird der hohe Energiebedarf für die Ventilatoren und die Enteisung angegangen. Für die Auslegung von Anlagen mit Erdwärmesonden gilt es, von den noch groben Faustformeln wegzukommen.

2.1.1 Umgebungsluft

Wärmepumpen mit Umgebungsluft als Wärmequelle werden zur Verbesserung des luftseitigen Wärmeübergangs im allgemeinen mit Gebläsen betrieben. Diese benötigen einen erheblichen Teil der an die Wärmepumpe zuzuführenden elektrischen Energie und erfordern Massnahmen zur Geräuschreduktion. Im neuen Projekt **Stille Verdampfer** für Luft-Wasser-Wärmepumpen wird deshalb versucht, ohne Gebläse auszukommen. Dabei werden die Lamellenrohrverdampfer an den Seitenflächen und an der Deckfläche der Wärmepumpe für Aussenaufstellung angeordnet: Bild 3. Mit Messungen an einer Versuchsanlage sollen die mit dieser Anordnung erreichbaren Jahresarbeitszahlen nachgewiesen und Auslegungsunterlagen für stille Verdampfer erarbeitet werden [1].



Bild 3: Funktionsmuster einer Luft-Wasser-Wärmepumpe mit stillem Verdampfer (aus [1]).

Rechnerische Abschätzungen zeigten, dass mit Luft/Wasser-Wärmepumpen mit stillem Verdampfer durchaus auch hohe Jahresarbeitszahlen erbracht werden können. Zur Verifikation dieser Abschätzungen wurde eine Versuchsanlage mit zwei stillen Verdampfern ausgelegt, gebaut und in Betrieb genommen. Momentan werden die letzten Einstellungen und Kalibrierungen der Messeinrichtungen durchgeführt. Erste Vorver-

suche verliefen vielversprechend. Im nächsten Jahr wird mit den Messungen begonnen und auch eine Wandanordnung des Verdampfers untersucht.

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.

2.1.2.1 Berechnungsmodul EWS für Erdwärmesonden

Zur späteren Verwendung in Auslegungsprogrammen und für dynamische Simulationen im Projekt *Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe* [18] wurde ein neues Berechnungsmodul EWS für **die Ermittlung der Soleaustrittstemperatur aus Erdwärmesonden** entwickelt [2]. Es 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. Dies wurde durch experimentelle Validierungen am Erdwärmesondenfeld der Ingenieurschule Burgdorf an einer Anlage für ein Einfamilienhaus ([Bild 4](#)) und durch Vergleichsrechnungen mit dem Programm SBM der Universität Lund bestätigt.

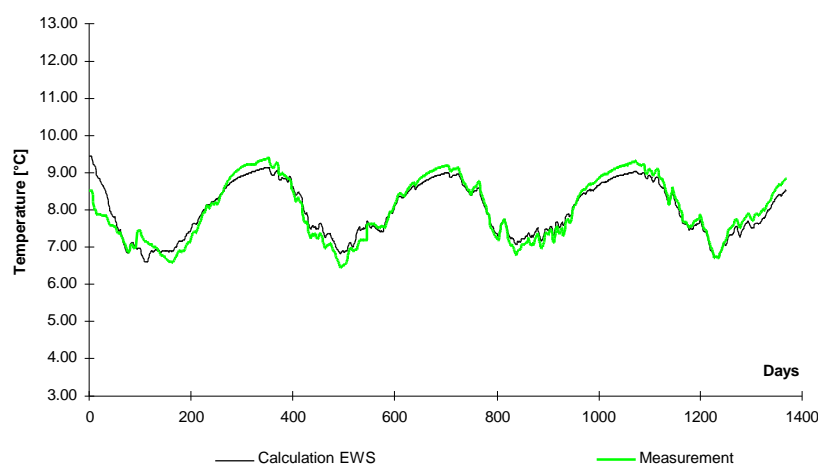


Bild 4: Vergleich zwischen Messung im Erdreich und Rechnung mit dem Programm EWS an einer Erdsondenanlage eines Einfamilienhauses in Elgg vom Oktober 87 bis zum Juni 91. Tiefe 50 m, Abstand von der Sonde 1 m (aus [2]).

Als Vorteil gegenüber bestehenden Programmen mit vergleichbaren Fähigkeiten **rechnet** das neue Programmmodul EWS **wesentlich rascher**. Es wird damit für die Computersimulation von Wärmepumpenanlagen auf modernen Personal Computern verwendbar. Da das neue Programmmodul auch die Quelltemperaturabsenkungen bei

starker Belastung gut vorherzusagen vermag, wird es in die nächste Version des weitverbreiteten BEW-Berechnungsprogramms WP-Calc implementiert werden. Wie ein Vergleich mit dem jetzigen Berechnungsteil des WP-Calc für Erdwärmesonden zeigte, wird dies zu realistischeren Voraussagen über die Leistungszahl der Wärmepumpe und damit der Jahresarbeitszahl führen.

Die kurze Rechenzeit wurde durch 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 erreicht. Wie die Validierung zeigte, genügt eine wöchentliche analytische Berechnung des ausserhalb dieser Nahzone liegenden Erdbodenbereichs. Die Randbedingungen für die numerische Simulation werden damit alle Wochen aus dem in der Periode total entzogenen Wärme neu errechnet.

Im Schlussbericht findet man nebst einer ausführlichen Beschreibung der Berechnungsmodelle das Listing der in Pascal geschriebenen Berechnungsprozeduren.

2.1.2.2 Geothermische Eigenschaften des Schweizer Molassebeckens

Die Ergebnisse von Auslegungsprogrammen wie das eben beschriebene sind nur verlässlich, wenn die einzugebenden relevanten Stoffwerte des Erdbodens am Erdwärmesondenstandort hinreichend genau bekannt sind. Hier liegt das schwächste Glied in der Auslegungskette für Wärmepumpenanlagen mit Erdwärmesonden. Mit dem Vorhaben **Geothermische Eigenschaften des Schweizer Molassebeckens** [3] wird mit dem Schliessen dieser empfindlichen Lücke begonnen. Aus vorhandenen Gesteinsproben aus früheren Bohrungen 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. 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 soll schliesslich ein einfach zu bedienendes PC-Programm für Planer von Erdwärmesondenanlagen zur Prognose der geothermischen Stoffwerte für einen beliebigen Standort im schweizerischen Mittelland entwickelt und getestet werden.

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. Hier ist aber auch eine "**sanfte Raumkühlung**" (Sommerkühlbetrieb mit Soleumwälzung mit - im einfachsten Fall - Raumkühlung über das Heizungssystem) zur Wiederaufladung zu betrachten. Diese Form der Wiederaufladung brächte zudem eine Komfortsteigerung. Zur Abschätzung des Einflusses von

Wärmeeinträgen in Erdwärmesondenfelder von Sole/Luft-Wärmepumpenanlagen typischer Mehrfamilienhäuser auf die Jahresarbeitszahl, die Wirtschaftlichkeit und die Komfortsteigerung (durch sanfte Kühlung im Sommer) wurde ein neues Projekt gestartet [4].

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. Die rasche Einführung alternativer Kältemittel als Ersatz für die chlorhaltigen Kältemittel erfordert das Bereitstellen entsprechender Berechnungsgrundlagen. Als Besonderheit wird in der Versuchsanlage der EPF-Lausanne die Wärme durch gegenströmendes Wasser zugeführt. Damit kommt man dem physikalischen Vorgang in realen Verdampfern näher als mit den üblicherweise benützten Elektroheizungen mit konstantem Wärmestrom. Im Auftrag des Bundesamts für Energiewirtschaft wurden experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Verdampfen der alternativen Kältemittel R134a, R402A, R404A und des Kältemittelgemischs R407C in glatten und strukturierten Rohren durchgeführt. Die Messergebnisse konnten durch neue Berechnungsgleichungen für den Wärmeübergang und den Druckverlust bei der Verdampfung in Rohren verallgemeinert werden [23],[24].

Die bisher untersuchten synthetischen Fluorkohlenwasserstoffverbindungen (FKW) sind zwar bezüglich des Abbaus der Ozonschicht unbedenklich. Sie weisen aber ein hohes Treibhauspotential auf. Befürchtungen über schädliche Auswirkungen toxischer Abbauprodukte (Trifluoressigsäure) lassen einen möglichst raschen Übergang zu natürlichen Kältemitteln ratsam erscheinen. Aus diesem Grund finden natürliche Kältemittel wie Ammoniak und Alkane (z.B. Propan) trotz den Nachteilen der Brennbarkeit und der Toxizität bei Ammoniak wieder grosses Interesse. Aus thermodynamischer Sicht ist Ammoniak ein besonders interessantes Kältemittel. Wissenslücken bestehen

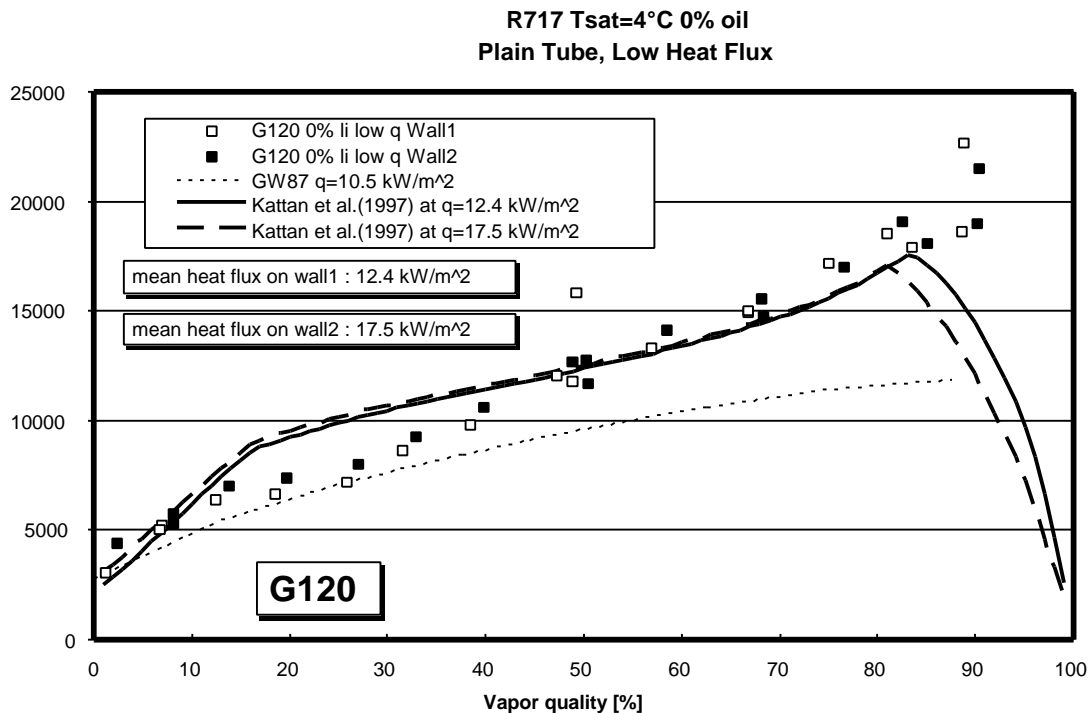


Bild 5: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Wärmeübergangskoeffizienten bei der Verdampfung von reinem Ammoniak in Abhängigkeit des Gasphasenanteils. Einzelheiten in [25].

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 [5]. 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 verschiedenen ist. Nach diversen Verzögerungen beim Umbau der Versuchsanlage (Ersatz gegen Ammoniak nicht beständiger Komponenten, diverse messtechnische Verbesserungen) konnten die Versuche mit reinem Ammoniak gefahren werden (Bild 5, [25]). Im nächsten Jahr werden die experimentellen und theoretischen Untersuchungen auf das Gemisch Ammoniak-Öl ausgedehnt.

2.3 Wärmepumpen

Bei den Wärmepumpen konzentrierten sich die Forschungsarbeiten auf natürliche Kältemittel sowie auf die Erhöhung der Effizienz und Leistungsfähigkeit beim Einsatz im Sanierungsmarkt mit Luft als Wärmequelle.

2.3.1 Kompressionswärmepumpen mit natürlichem Kältemittel

Immer mehr Hersteller von Wärmepumpen – insbesondere in Deutschland und Skandinavien - wechseln auf natürliche Kältemittel wie Ammoniak und Alkane (Kohlenwasserstoffe). Die Gründe dafür wurden im Abschnitt 2.2 bereits erörtert. Mit den erwähnten natürlichen Kältemitteln lassen sich hohe Leistungszahlen und (z.B. mit Propan) einstufig Temperaturen bis 65°C erreichen. Ammoniak als Arbeitsmittel für Wärmepumpen und Kältemaschinen weist grosse thermodynamische und ökologische Vorzüge auf. Während es sich bei Grossanlagen durchgesetzt hat, sind bei kleinen Aggregaten noch erhebliche Hindernisse zu überwinden.

2.3.1.1 Grosswärmepumpe mit Ammoniak

Die EPF-Lausanne mit einer beheizten Gesamtfläche von 280'000 m² wird durch ein vollautomatisches Heizungssystem mit einer Kombination von Wärmepumpen und Wärme-Kraft-Kopplung beheizt. Dieses besteht aus zwei **Ammoniak-Grosswärmepumpen mit je 3.9 MW Heizleistung**, zwei elektrisch gekoppelten Gasturbinen mit Abwärmenutzung (je 3 MW_{el} / 6 MW_{th}) und drei 66 GJ Wärmespeichern.

Diese weltweit einzigartige *Sulzer-Anlage* (Bild 6) wurde nach 11 Betriebsjahren ausgemessen [6], [26]. Infolge von Verunreinigungen und Inertgasen im Wärmepumpenkreislauf sowie eines Leistungsrückgangs des Kompressors reduzierte sich die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe mit Seewasser als Wärmequelle von ursprünglich 5 auf immerhin noch beachtliche 4.4. Dies bei maximalen Vorlauftemperaturen von 52°C. Der auf den unteren Heizwert bezogene Nutzungsgrad der gesamten WKK-WP-Kombination beträgt nach 11 Betriebsjahren immer noch 160%! Diese Arbeit wurde im Rahmen der Schweizer Beiträge zum Annex 22 des IEA Wärmepumpenprogramms durchgeführt (siehe Abschnitt 3.2).

<<Bild Ord.JaBe>>

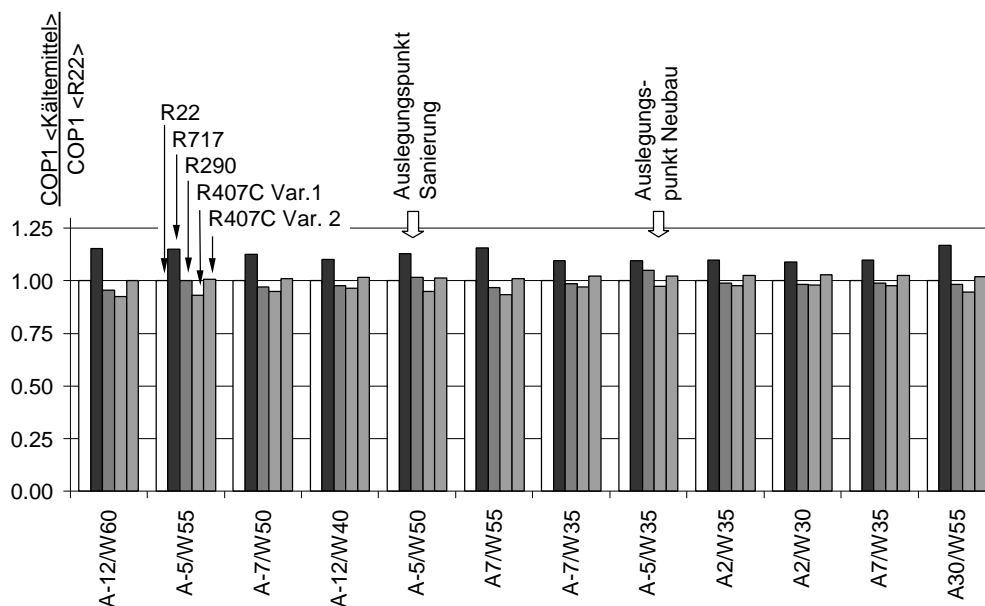
Bild 6: Schema der untersuchten Ammoniak-Wärmepumpe mit 3.9 MW Heizleistung (aus [6]).

2.3.1.2 Kleinwärmepumpen mit Ammoniak

Wie auch im oben beschriebenen Beispiel hat sich Ammoniak 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 möglichst raschen Übergang zu natürlichen Kältemitteln ratsam erscheinen. Für Kleinwärmepumpen wird deshalb im nordeuropäischen 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, werden die **thermodynamischen und wirtschaftlichen Vorteile** einer NH₃-Wärmepumpe im **Wärmeleistungsbereich von 6 bis 25 kW** gegenüber entsprechenden Wärmepumpen mit Propan und R407C im Rahmen des neuen Forschungsprojektes Kleinwärmepumpe mit Ammoniak untersucht [7], [8]. Dabei soll auch ein neues Adsorptionsmittel als „Ammoniakfalle“ für den Leckagefall getestet werden.

In einer ersten Projektphase wurden bisher Luft/Wasser-Wärmepumpen mit einer Heizleistung von 6 kW für Neubauzwecke (niedrige Vorlauftemperaturen um 35 °C) und für Sanierungszwecke (hohe Vorlauftemperaturen um 50 °C) für die erwähnten



Kältemittel und für R22 als Vergleichsbasis ausgelegt. Dabei ergaben sich mit Ammoniak gegenüber R22, Propan und R407C **um rund 15% höhere Leistungszahlen**: Bild 7. Falls aus Sicherheitsgründen im Luftkühler mit einem Wasser-Ethylenglykol-Gemisch und einem indirekten Verdampfer gefahren würde, verlöre man allerdings den Vorteil einer höheren Leistungszahl.

Bild 7: Berechnete Leistungszahlen für verschiedene Betriebsbedingungen im Verhältnis zu der mit R22 erreichten Leistungszahl (aus [7]).

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 ergäben sich **mit einem Kompressor unzulässig hohe Verdichtungsverhältnisse** (Größenordnung 15) mit entsprechend unzulässiger Überhitzung: Bild 8. Hier drängt sich eine Zwischenkühlung oder ein zweistufiger Kreisprozess auf. Im Projekt wurde als Zwischenkühlung die Variante einer Zwischeneinspritzung untersucht. Sie ergab praktisch keine

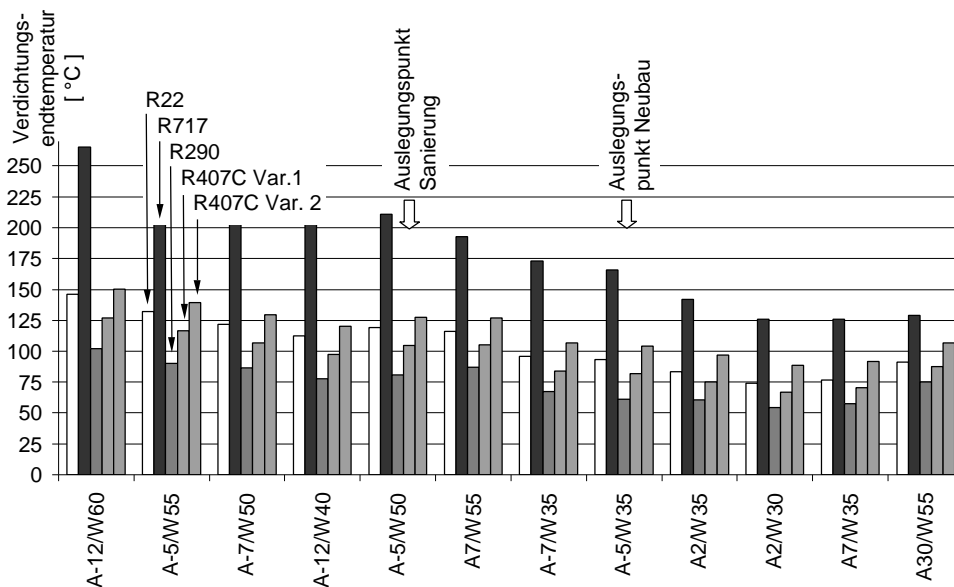


Bild 8: Verdichtungsendtemperaturen für verschiedene Betriebsbedingungen (aus [7]).

Reduktion der Leistungszahl. Die Zwischeneinspritzungslösung erfordert allerdings eine Kompressorentwicklung – die ausschliesslich für den gegenüber dem Kälteanlagenmarkt sehr kleinen Wärmepumpenmarkt nicht unproblematisch sein dürfte.

Erste Tests mit einer neuen „**Ammoniakfalle**“ aus Kupfersulfat ergaben bis nahe zur Sättigung (0.4 kg Ammoniak auf 1 kg Adsorptionsmittel) im Gleichgewicht Partialdrücke um Null. Bei höheren Leckageraten zeigte sich bei den Versuchen die Abfuhr der hohen Reaktionswärme als problematisch. An entsprechenden Lösungen zur Wärmeabfuhr auf tiefem Temperaturniveau wird zur Zeit gearbeitet. Auch die Wirksamkeit bei Verschmutzung muss noch untersucht werden.

Zusammenfassend ist beim derzeitigen Stand der Arbeiten festzuhalten, dass **Ammoniak** als natürliches Kältemittel für Kleinwärmepumpen **bei kleinen Temperaturhüben**, wie sie bei Neubauten mit Fussbodenheizung und Erdwärmesonden als Wärmequellen vorkommen, durchaus von Interesse ist. Für den Sanierungsmarkt mit hohen Temperaturhüben scheint dagegen Propan (oder andere Alkane) aus der Palette natürlicher Kältemittel bei einstufiger Bauweise geeigneter.

2.3.2 Zweistufige Kleinwärmepumpe

Im Heizungsbereich liegt das grösste Marktpotential im **Sanierungsmarkt**. Hier kommt für Wärmepumpen meistens nur Luft als Wärmequelle in Frage. Zudem sind 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 Wärmebezüglern 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. Mit Hilfe einer durch Computersimulationen gestützten experimentellen Untersuchung wurde die Anwendbarkeit dieses Prinzips im Vorhaben **Effiziente zweistufige Wärmepumpe für Luft als Wärmequelle** am Beispiel zweier Schaltungsvarianten auch für Kleinwärmepumpen untersucht [9], [28]. Die Hochrechnung der Messergebnisse an der Versuchswärmepumpe ergab für ein Heizsystem mit L-8/W50 und L12/W35 bei monovalentem Betrieb und den Meteodaten für Zürich eine Jahresarbeitszahl von 3.9.

Da beim Betrieb einer Wärmepumpe mit Luft als Wärmequelle starke Temperaturänderungen auftreten, muss eine Luft/Wasser-Wärmepumpe sowohl einstufig (für höhere Lufttemperaturen) wie auch zweistufig (für tiefere Lufttemperaturen) optimal betrieben werden können. Weiter sollte die Heizleistung einer Wärmepumpe zur Vermeidung unnötiger Speichervolumina, unnötiger An- und Abfahrverluste und für den Betrieb im optimalsten Temperaturbereich dem Bedarf angepasst werden können. Dies wird durch die Möglichkeit der **Umschaltung von Ein- auf Zweikompressorbetrieb** und **Drehzahlvariation** beim Kompressor der ersten Stufe gewährleistet.

Für den Feed des Scroll-Kompressors der zweiten Stufe wurden **zwei Schaltungsmöglichkeiten** untersucht: Das übliche und einfachere Ansaugen aus einem Kältemittelzwischenbehälter und eine neue, aufwendigere Zweiphaseneinspritzung. Die letztere verhindert eine destillative Entmischung von zeotropen Kältemittelgemischen in eine leichter flüchtige Fraktion in der zweiten Stufe und eine schwerer flüchtige in der ersten Stufe. Beide Lösungen wurde in je einem Funktionsmuster im Heizleistungsbereich von 10 kW realisiert und getestet. Spezifikationen, Besonderheiten, Auslegungsüberlegungen und Messergebnisse sind im Schlussbericht ausführlich erörtert.

Für die **Verteilung des Schmieröls** auf die beiden Kompressoren wurden zwei Lösungen untersucht. Erstens eine Kombination von Kompressoren mit gleichem Druck in beiden Cartergehäusen (Realisierung nicht erfolgreich) und zweitens eine Ölniveausteuerng mit Ölreservoir. Diese wird aufwendig, wenn die Ölansammlung, wie bei der Zweiphaseneinspritzung, nicht immer im gleichen Kompressor erfolgt.

Einige Daten des Funktionsmusters mit Zweiphaseneinspritzung: hermetischer Kolbenkompressor 45..65 Hz (12.2 m³/h bei 50 Hz) für die erste und Scrollkompressor mit n=konst 5.42 m³/h für die 2.Stufe, Plattenkondensator mit 1.4 m² Oberfläche, Rohrbündelverdampfer mit Al-Rippen, Cu-Rohre innen strukturiert, 3 Entspannungsventile mit Schrittmotoren (diese könnten später durch thermostatische Ventile ersetzt wer-

den), 1 manuelles Entspannungsventil, 1 Doppelrohrwärmeübertrager zur Unterkühlung des flüssigen Kältemittels aus dem Kältemittelreservoir zwischen den Stufen (um Blasenbildung im Entspannungsventil zu vermeiden), 1 Plattenwärmeübertrager am Eintritt in den Economizer (zur Reduktion des Dampfgehalts).

Mit dem Funktionsmuster für Zweiphaseneinspritzung mit drehzahlvariablem Kolbenkompressor (45..65 Hz) für die erste und einem Scrollkompressor für die zweite Stufe wurden **Leistungszahl und Wärmeleistung** zunächst mit dem Kältemittel R22 in den folgenden Bereichen ohne Enteisierung gemessen: L-7/W35, L-7/W50, L2/W50, L7/W50, L-10/W55 und L-11/W60. Die Hauptergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Höhere Leistungszahl bei zweistufigem Betrieb ab Temperaturhuben über ca. 45°C (bei -7/50°C ca. +14%).
- Markante Zunahme der Wärmeleistung bei grossen Temperaturhuben (bei -7/50°C + 70%)!
- Exergetische Wirkungsgrade im Bereich von 43% bis 45% bei einstufigem Betrieb und von 42% (Temperaturhub 42°C) bis 50% (Temperaturhub 71°C) bei zweistufigem Betrieb.
- Gute Wärmeleistungsanpassung durch Umschaltung auf einstufigen Betrieb.
- Reduktion der Kompressorausstrittstemperatur gegenüber einstufigem Betrieb (Begrenzung durch Konstruktion sowie Schmieröl- und Kältemittelersetzung).
- Effizienteres Abtauen im Falle eines flüssigen Kältemittelvorrats (oder eines thermisch mitgeführten Wasservorrats) zwischen den beiden Stufen.

Dem stehen allerdings auch gewichtige **Nachteile** des zweistufigen Kreisprozesses gegenüber :

- Aufwendigere Konstruktion (2 Entspannungsventile, 2 Kompressoren, Zwischenbehälter für Kältemittel, Schmierölverteilung auf beide Kompressoren, zusätzliche Leitungen etc.) und grösserer Kältemittelinhalt.
- Mangel an geeigneten Serie-Kleinkompressoren mit hohem isentropem Wirkungsgrad für geringe Druckverhältnisse auf dem Markt.
- Problematische Schmiermittel-Gleichverteilung zwischen den beiden Kompressoren.
- Möglichkeiten einer destillativen Trennung von Kältemittelgemischen in eine leichter flüchtige Fraktion im höheren und eine schwererflüchtige Fraktion im tieferen Temperaturbereich.

Schliesslich wurden Versuche mit dem FKW-Ersatzkältemittel-Gemisch R407C mit Steuerung des Abtauens der Verdampferoberfläche über eine Druckverlustmessung in der Luftströmung nach der Norm EN255 durchgeführt. Dabei ergaben sich mit diesem

ersten Funktionsmuster bereits Leistungszahlen, die jenen der besten in Töss getesteten kommerziellen Wärmepumpen entsprechen. Die Wärmeleistung ist aber im Bereich tiefer Aussentemperaturen wesentlich höher als bei einstufigen Maschinen. Eine Kostenschätzung zeigt, dass die Kosten der vorgeschlagenen zweistufigen Wärmepumpe mit Frequenzumwandler rund 75% und ohne Frequenzumwandler rund 30% über jenen einer einstufigen Wärmepumpe liegen. Vereinfachte Lösungen ohne Kältemittelreservoir zwischen den beiden Stufen sind möglich.

Bei der Beurteilung dieser Ergebnisse ist zu beachten, dass im Rahmen dieser Untersuchungen in erster Linie das technische Konzept getestet und das im Bericht ausführlich beschriebene Simulationsprogramm validiert wurden. Die Versuchsmaschine ist noch keine energetisch optimale Wärmepumpe. Insbesondere weisen die verwendeten Verdichter bei den kleinen Druckverhältnissen im zweistufigen Betrieb ungenügende isentrope Wirkungsgrade von lediglich 50..68% auf.

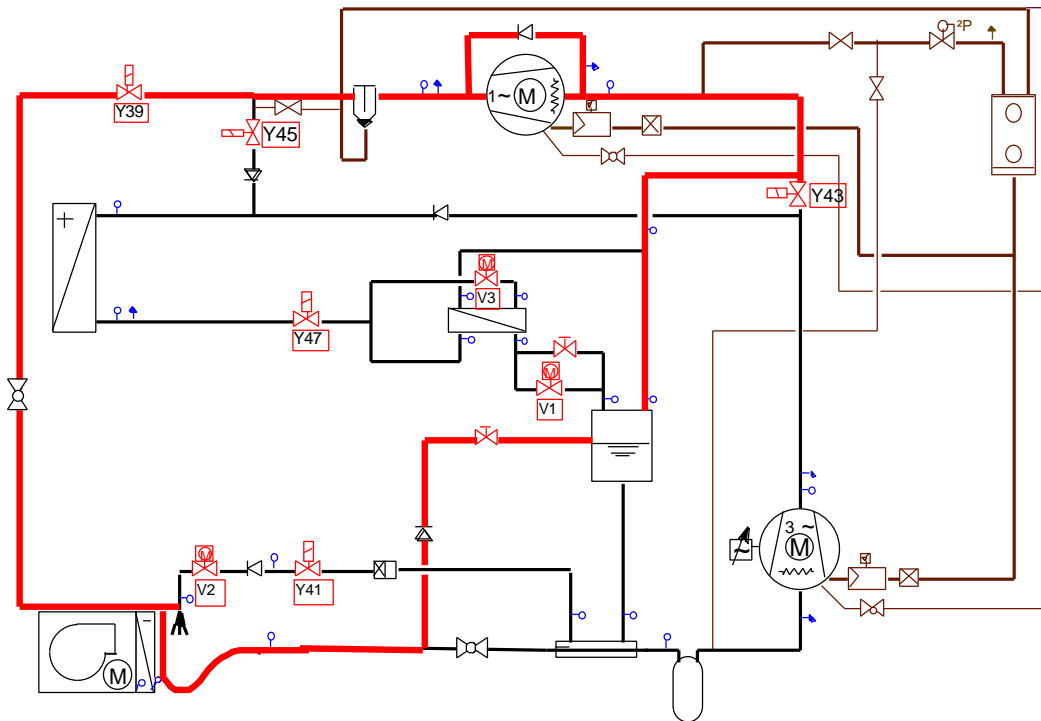


Bild 9: Zweistufige Wärmepumpe im Enteisungsmodus (aus [10])

In einer zweiten Phase [10] werden die theoretischen und experimentellen Untersuchungen auf eine **exergetisch optimale Enteisung** (Bild 9) und die **Verwendung** eines FKW-Gemisches mit kleinem Temperaturgleit (wie **R410A**) sowie die Verwendung eines **natürlichen Kältemittels** (wie Propan) ausgedehnt.

2.3.3 Wärmepumpe für den Sanierungsmarkt

Im **Sanierungsmarkt** liegt ein grosses Potential für den Einsatz von Wärmepumpen. Um die 400'000 Kesselheizungen sind in der Schweiz in den kommenden Jahren zu ersetzen. 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, die „**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,
- **natürliche Kältemittel** verwenden und
- dank **modularem Aufbau** und gemeinsamer Entwicklung und **Serieproduktion** kostengünstiger werden.

Zur Entwicklung einer entsprechenden Wärmepumpe mit hohem Wirkungsgrad und intelligenter Steuerung hat das Bundesamt für Energiewirtschaft ein detailliertes **Pflichtenheft** aufgestellt und ausgeschrieben. Eine leicht gekürzte und inzwischen etwas modifizierte Fassung findet man im **Anhang 1**, S. 53. Die Tabelle 2 zeigt die von der neuen Wärmepumpe geforderten exergetischen Wirkungsgrade (Gütegrad). In der Tabelle 3 werden diese mit dem Stand der Technik verglichen.

Die Entwicklung der *Swiss Retrofit Heat Pump* ist gemäss dem Bild 10 in zwei Phasen vorgesehen. Mehrere der laufenden Forschungsvorhaben dienen bereits der Phase 2 dieses mittelfristigen Vorhabens.

Tabelle 2: Anforderungen an den exergetischen Wirkungsgrad der SRHP (Randbedingungen gemäss EN 255).

Typ	Temperaturen		exergetischer Wirkungsgrad
Luft/Wasser	L 2 °C	W 50°C	42.5 %
	L -10..15 °C	W 35..60°C	minimal 0.375

Tabelle 3: Technischer Stand der Luft/Wasser-Wärmepumpe zum Vergleich. Beste Werte der bis zum 10.Nov.97 in Töss getesteten Wärmepumpen.

Arbeitsmittel	Vorlauf	Umgebungs-luft	reversible Leistungszahl	Leistungszahl COP	exergetischer Wirkungsgrad (Gütegrad)	thermische Leistung
	T_o °C	T_u °C	e_{rev}	e	z	kW
R22	50.0	2.0	6.732	2.64	39.2%	7.0
R290	50.0	2.0	6.732	2.65	39.4%	6.6
R407C	50.0	2.0	6.732	2.60	38.6%	9.6

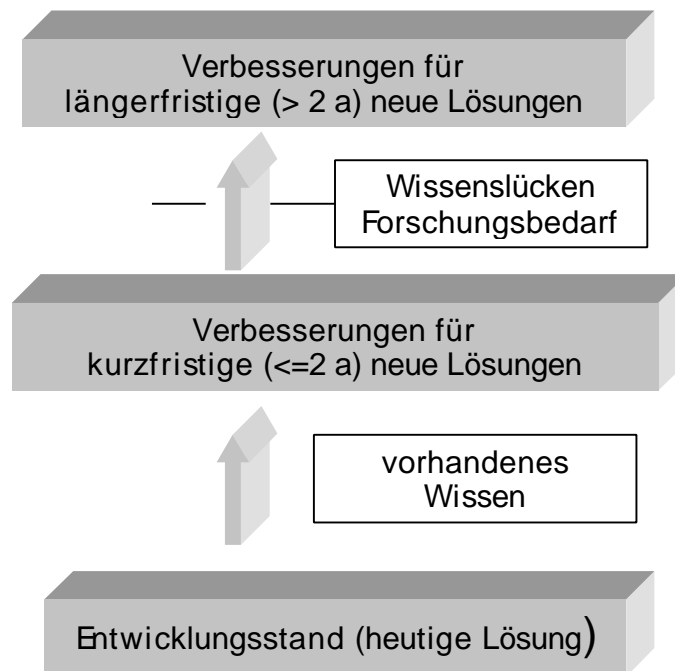


Bild 10: Entwicklung der Swiss Retrofit Heat Pump

Da eine gemeinsame Herstellung zum Erzielen der nötigen Stückzahlen und damit eines kostengünstigen Produkts auch für den Exportmarkt unumgänglich scheint, ist auch die Entwicklung mit vereinten Kräften voranzutreiben. Deshalb wurden nach der Bewertung der Offerten mehrerer Gruppierungen von Firmen, Forschungsinstituten und Ingenieurschulen die drei höchstplatzierten Offertsteller zu einem gemeinsamen Vorgehen eingeladen. Dem Bundesamt für Energiewirtschaft schwebt eine gemeinsame Entwicklungsgesellschaft und eine gemeinsame Fabrikationsgesellschaft vor. An der letzteren müssen sich alle schweizerischen Wärmepumpenhersteller zu fairen Bedingungen beteiligen können. Wir hoffen, dass im nächsten Jahr eine Einigung zustande kommt.

2.3.4 Absorptionswärmepumpen

Absorptionswärmepumpen haben den Vorteil, als wesentliche Antriebsenergie nur Wärme zu benötigen. Sie sind besonders interessant, wenn zum Antrieb Abwärme zur Verfügung steht.

2.3.4.1 AWP-Kessel

Noch 1996 haben wir der Entwicklung eines „**AWP-Kessels**“ – einer Kombination von Absorptionswärmepumpe, konventionellem Gaskessel und intelligenter Steuerung - hohe Priorität beigemessen [41]. Mit **Nutzungsgraden von 125..130%** wäre der AWP-

Kessel gegenüber den rund 100% eines Brennwertkessels ein wesentlicher Fortschritt. Die Idee ist bei der Schweizer Kesselindustrie zwar auf Interesse gestossen.

Kurzfristige Entwicklungsprioritäten standen in diesem stark umkämpften Marktsegment allerdings einem echten Engagement entgegen. So kam es in diesem Bereich trotz intensiver Bemühungen der BEW-Forschungsprogrammleitung und der Leitung des FOGA⁷ nicht zu einer Zusammenarbeit zwischen zwei interessierten Schweizer Firmen mit der österreichischen Firma Heliotherm.

Zu diesem Entscheiden haben auch beigetragen, dass uns die mit erster Priorität angestrebte, innovative technische Lösung mit der Vergabe der in der Schweiz entwickelten **Diffusions-Absorptionswärmepumpe** an *Nefit Fasto*, einer holländischen Tochterfirma der Buderus-Gruppe, nicht mehr zur Verfügung stand. Da diese Firma ein analoges Ziel verfolgt und sich an einer Kooperation mit den schweizerischen Kesselherstellern nicht interessiert zeigte, musste das Vorhaben der Realisierung eines schweizerischen AWP-Kessels leider aufgegeben werden.

2.3.4.2 Potentialabschätzung für konventionelle Absorptionswärmepumpen

Im Rahmen einer Diplomarbeit beim Unterzeichneten wurden Computersimulationen für konventionelle ein- und zweistufige Klein-Absorptionswärmepumpen durchgeführt [29]. Die Arbeit lässt trotz zeitlicher Beschränkung auf sechs Wochen folgende **wesentliche Schlüsse** zu:

1. Infolge des erheblichen Exergieverlustes von der Flamme (über 1000°C) zum Verdampfer (nur ca. 150°C) weist die Absorptionswärmepumpe gegenüber der Kombination Wärme-Kraft-Kopplung/Elektrowärmepumpe einen **grundsätzlichen Nachteil** auf. Absorptionsaggregate sind deshalb thermodynamisch eigentlich nur für die Abwärmenutzung (im allgemeinen zu Kühlzwecken) interessant.
2. Die Computersimulationen für einen **idealen einstufigen Absorptionswärmepumpenprozess** (unendliche Wärmeübertragungsflächen, kein Druckverlust, vollständige Nutzung der Brennstoffenergie) mit Feedvorwärmer und „Kälteübertrager“ ergibt für eine Heizgrenze bei 15°C sowie Vor- und Rücklauftemperaturen von 35°C/45°C bei $T_{\text{ausseren}} = 0^\circ\text{C}$ bei beliebig hohem Regelaufwand maximale Wärmeverhältnisse von rund 1.9.
3. In der **realen einstufigen Absorptionswärmepumpe** mit akzeptablem Regelaufwand (z.B. konstantes Rücklaufverhältnis) fallen diese Werte erheblich ab. Insbesondere der Einfluss real noch bezahlbarer Wärmeübertrager ist enorm. Die mit der Klein-**Absorptionswärmepumpe** der deutschen Firma **AWT** erreichten Wärmeverhältnisse müssen nach den eigenen Simulationsrechnungen bereits als beachtlich **bezeichnet werden**. Eine deutliche Verbesserung zu tragbarem Aufwand ist unwahrscheinlich. Auch die erreichten Wärmeverhältnisse der **Diffusions-Absorptionswärmepumpe** lassen sich mit einstufigen Aggregaten zu realistischen Aggregatskosten kaum überbieten.

⁷ Energieforschungsfonds der Schweizerischen Gasindustrie

4. Die zweistufige „**double-lift**“ **Absorptionswärmepumpe** hat zwei Vorteile:
 1. Ein Wärmepumpenbetrieb ist für Aussentemperaturen bis -15°C möglich.
 2. Für Aussentemperaturen über 0°C lässt sich beim Betrieb mit einer Stufe ein höheres Wärmeverhältnis erreichen.Der **Mehraufwand** für einen zusätzlichen Absorber, eine zusätzliche Lösungspumpe und eine komplexere Regulierung **lässt sich aber für eine Kleinwärmepumpe nicht rechtfertigen**.
5. Falls es gelingt, die **Diffusions-Absorptionswärmepumpe** in grossen Serien herzustellen, bleibt diese im Leistungsbereich unter 25 kW auch nach dieser Untersuchung die **mit Abstand aussichtsreichste Lösung**. Konventionelle Kleinabsorptionswärmepumpen haben nur eine echte Marktchance, wenn ein „Quantensprung“ im Preis der Wärmeübertrager und der Lösungspumpe erzielt würde.

2.4 Blockheizkraftwerke

Bei den Blockheizkraftwerken stand die Forschungstätigkeit im Zeichen der Emissionsminderung. Dieses Ziel wurde durch eine Betriebsemissionsüberwachung, die Entwicklung eines schadstoffarmen Motors und die Entwicklung von Kleinblockheizkraftwerken mit äusserer Verbrennung verfolgt.

2.4.1 Betriebsemissionsüberwachung von BHKW-Motoren

Gasmotoren von Blockheizkraftwerken mit Dreiwegekatalysatoren erreichen im Normalbetrieb tiefe Emissionswerte. Periodische Abgaskontrollen erfolgen in der Regel nur alle drei Jahre. Bei Störungen im System Lambdasonde-Regler-Katalysator können die gesetzlichen Emissionsgrenzwerte in der Zwischenzeit aber beträchtlich überschritten werden. Dies belegen Emissionsmessungen an 11 BHKW-Anlagen im Kanton Zürich. Die übliche **Betriebsemissionsüberwachung der stöchiometrisch betriebenen Verbrennungsmotoren** von Blockheizkraftwerken über die Lambdasondenspannung und die Abgastemperatur genügt offensichtlich nicht. Um Fehlfunktionen des Katalysatorsystems rechtzeitig erkennen zu können, werden deshalb auch von behördlicher Seite vermehrt kontinuierliche Emissionsüberwachungen gefordert. Deshalb wurden im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft zwei wirtschaftlich tragbare Methoden zur Emissionsüberwachung während der ganzen Betriebszeit von BHKWs ausgearbeitet und im praktischen Betrieb in 3 BHKW-Anlagen mit elektrischen Leistungen von 174 bis 430 kW erprobt [11]. Bei der aufwendigeren Emissionsüberwachungsmethode werden die Emissionen direkt gemessen, während sie bei der kostengünstigeren Endothermiemethode indirekt über die Temperaturerhöhung im Katalysator bestimmt werden.

Für **mittlere Anlagen** genügt die **Exothermiemethode**, die sich für Zusatzkosten von rund Fr.2000.- realisieren lässt. Der Sensorikaufwand ist hier gering. In Neuanlagen ist eine Temperaturmessung nach dem Katalysator zum Erfassen zu hoher Methankonzentrationen bei Zündaussetzern oder zu fettem Betrieb ohnehin vorhanden (Alarm

über 650°C). Zusätzlich wird nur noch eine Temperaturdifferenzmessung über den Katalysator benötigt.

Die chemische Umwandlung der Schadstoffe führt **im Katalysator** zu einer **Temperaturerhöhung**: Bild 11. Die minimale Schadstoffemission bei einem Luftverhältnis λ etwas kleiner 1 ergibt eine maximale Temperaturerhöhung über dem Katalysator von ca. 50°C im stationären Betrieb. Vereinfachte Berechnungen zeigen, dass diese zu rund 18 % von der Methanumwandlung, zu rund 62% von der CO-Umwandlung und zu etwa 20% von der NO_x-Umwandlung stammen.

***Bild 11:** Über dem Katalysator gemessene Temperaturerhöhung in Abhängigkeit der Betriebszeit (aus [11]).*

Die Exothermiemethode hat mit drei **Problemen** zu kämpfen. Erstens liegen die zum Erkennen von Fehlfunktionen des Katalysators zu messenden Temperaturänderungen im Bereich weniger K. Abweichungen über etwa 3 K von der normalen Temperaturdifferenz im stationären Betrieb lassen auf Störungen schliessen. Da die einzelnen Messpunkte eine relativ hohe Streuung aufweisen und die BHKW-Steuerungen normalerweise keine Mittelwertbildungen zulassen, sind die Signale durch die Vorgabe einer einstellbaren Anstellzeit zu filtern. Zweitens ist das Erreichen stationärer mittlerer Temperaturen am Katalysator abzuwarten (je nach Anlage etwa 90 Minuten, bei der Inbetriebnahme zu ermitteln). Ein drittes Problem ist die Tatsache, dass bei gleichen umzuwandelnden Stoffmengen nicht jede Schadstoffkomponente die gleiche Temperaturerhöhung über dem Katalysator ergibt. Bei einer Verschiebung der Abgaszusammensetzung ändert sich somit auch die Temperaturdifferenz über dem Katalysator.

Mit der Exothermiemethode lassen sich zwar **starke Abweichungen** in Richtung eines mageren Betriebs mit hohen NO_x-Emissionen (über 200 mg/m³_N) erfassen. Die Einhaltung der strengen Grenzwerte der schweizerischen Luftreinhalteverordnung kann mit dieser Methode aber nicht garantiert werden.

Bei **Kleinanlagen** mit einfachen Mess- und Steuerkonzepten lässt sich die Exothermiemethode kaum realisieren. Hier muss man sich auf eine Selbstüberprüfung der Steuerung (Störungsmeldung, wenn das „Lambda-Fenster“ nicht rechtzeitig erreicht wird oder wenn der Gasmischer an einen Endanschlag gerät) beschränken. Auch darin zeigt sich die Problematik zu kleiner BHKW-Anlagen.

Für grössere Anlagen wurde deshalb eine Messmethode mit elektrochemischen Messzellen für eine permanente Überwachung der NO_x- und der CO-Emissionen entwickelt. Gegenüber bisherigen Systemen zur Permanentüberwachung gelang damit eine Reduktion der Kosten um rund 75%. Der Preis für die neue **elektrochemische Messmethode** ist aber mit gut Fr.10'000.- immer noch beträchtlich. Die vorgeschlagene Messmethode erlaubt eine dauernde Überwachung des Einhaltens der Emissionsgrenzwerte im Betrieb. Die geforderte Lebensdauer der Messzellen von 2 Jahren wird dank einer Beschränkung auf kurze Messintervalle erreicht: Bild 12. Problematisch ist noch die Querempfindlichkeit der CO-Zellen auf grössere H₂-Konzentrationen im Abgas, wie sie in Motoren mit stöchiometrischem Betrieb auftreten können.

***Bild 12:** Betriebsphasen für die neue elektrochemische Messmethode.*

Bei der elektrochemischen Messmethode wird ca. 45 min nach dem BHKW-Start während 15 min gemessen. Bei Dauerbetrieb wird die Messung nach 24 h wiederholt. Spülmechanismen, Schaltung und Konstruktion des dazu nötigen Messgeräts werden im Schlussbericht ausführlich beschrieben. Beim praktischen Einsatz über 1.5 Jahre ergab sich eine Messgenauigkeit der NO_x-Sensoren um +/- 10%. Bei der CO-Messung muss infolge der problematischen Abhängigkeit heute erhältlicher Sensoren von der H₂-Konzentration im Abgas ab 1500 mg/m³ N₂ mit grösseren Fehlern gerechnet werden. Eine höhere H₂-Konzentration führt allerdings zur Anzeige eines zu grossen CO-Werts. Sensoren mit einer geringeren Wasserstoffabhängigkeit wurden angekündigt – konnten aber im Rahmen dieser Untersuchung noch nicht getestet werden.

Die entwickelten Methoden zur Emissionserfassung im Betrieb dienen nicht nur einem ökologisch unbedenklicheren Betrieb mittlerer und grösserer BHKW-Anlagen. Sie las-

sen auch Fehlfunktionen frühzeitig erkennen und ermöglichen damit ein rechtzeitiges Auslösen von Revisionsarbeiten.

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

In einem grösseren Vorhaben wird die Entwicklung eines **emissionsarmen Gasmotors**, der die strengen schweizerischen Abgasnormen ohne nachgeschalteten Katalysator erreichen soll, vorangetrieben. 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, verfolgt die ETHZ das **Konzept einer massiven Abgasrückführung**. Die Verbesserung des Magermotorkonzepts verspricht für den Motor aus schweizerischer Produktion bereits kurzfristig Marktchancen auf dem europäischen Markt für Blockheizkraftwerke. Beim Konzept der Abgasrückführung ist mehr Neuland zu betreten. Simulationsrechnungen zeigten aber, dass damit Stickoxidemissionen unter 100 mg/m_N^3 erreichbar sein sollten.

Im Berichtsjahr wurde der Motor für Magerbetrieb umgebaut und zunächst im atmosphärischen Betrieb untersucht [30]. Dabei wurde der Einfluss des Zündzeitpunktes in Abhängigkeit des Luftüberschusses ($\lambda = 1.6$ bis 1.7) auf die Leistung, den Wirkungsgrad und die Schadstoffemissionen experimentell erfasst. Bei Leistungen bis 70 kW (gegenüber 106 kW bei stöchiometrischem Betrieb) und Wirkungsgraden bis 38% . Bei stabilem Betrieb wurden ohne Katalysator NO_x -Emissionen im Bereich von 100 mg/m_N^3 (Grenze gemäss der sehr strengen Schweizer Luftreinhalteverordnung momentan 80 mg/m_N^3) und CO -Emissionen im Bereich von 800 mg/m_N^3 (Grenze gemäss der CH-LRV 650 mg/m_N^3) erreicht.

Weiter wurde der Motorenprüfstand für einen aufgeladenen Betrieb mit einem Turbo-Kompressor und für eine Zwischenkühlung ausgebaut. Die Leistung des Motors kann damit auf rund 150 kW erhöht werden. Er wurde auch mit einem Oxidationskatalysator zur Reduktion der CO - und der KW -Emissionen ausgerüstet. Zur Sicherstellung einer Gasversorgung mit konstanter Zusammensetzung wurde eine Druckspeicheranlage für total 700 m_N^3 gebaut.

Bei einem Luftüberschuss von 1.7 wurden NO_x -Werte unter 400 mg/m_N^3 erreicht. Dabei ergaben sich allerdings CO -Emissionen um 600 mg/m_N^3 . Mit einem nachgeschalteten Oxidationskatalysator lassen sich die CO -Emissionen unter den LRV-Grenzwert von 650 mg/m_N^3 reduzieren. Die NO_x -Werte sind aber nach wie vor zu hoch. Weitere Versuche werden mit anderen Kolbengeometrien und Brennraumvolumina gefahren. Ziel für das kommende Jahr ist ein aufgeladener Magermotor mit Abgaskühlung, mit dem die strengen Anforderungen der schweizerischen Luftreinhalteverordnung für Klärgasbetrieb ohne Katalysatoren und für Erdgasbetrieb mit Oxidationskatalysator eingehalten werden können [12].

Gleichzeitig mit diesen Untersuchungen laufen an der ETH-Zürich Versuche, eine Emissionsreduktion durch massive Abgasrückführung zu verwirklichen. Hier wurde das Ziel einer Reduktion der NO_x -Emissionen unter 80 mg/m_N^3 erreicht. Dies allerdings

noch bei sehr hohen CO-Emissionen. Über dieses BEW-Projekt wird im Forschungsprogramm „Feuerung und Verbrennung“ berichtet.

2.4.3 Kleinblockheizkraftwerke

2.4.3.1 Neuer Motor mit äusserer Verbrennung

Ein vorgeschlagener neuer Motortyp sollte die Vorteile der bekannten Motorentechnik mit den geringeren Schadstoffemissionen bei äusserer Verbrennung des Stirlingmotors verbinden. Der neue Kreisprozess setzt sich aus 2 Isentropen, 2 Isobaren und 2 Isochoren zusammen. Der vorgeschlagene Motor besteht im wesentlichen aus zwei weitgehend konventionellen Kolbenmaschinen (ein Kompressor und ein Motor), die phasenverschoben arbeiten. Diese sind durch zwei über einen Wärmeübertrager gekoppelten Verbindungskanäle verbunden. An deren Ende befindet sich auf der Motorseite der (äussere) Brenner und auf der Kompressorseite der Kühler. Als Arbeitsmedium ist Luft vorgesehen. Dieses wird im Gegensatz zu den Stirling-Motoren nur in einer Richtung geführt. Für eine erste experimentelle Verifikation des **neuen Motortyps mit äusserer Verbrennung** wurde ein Funktionsmuster gebaut [13]. Leider konnten mit den damit durchgeführten Versuchen die theoretischen Voraussagen nicht bestätigt werden. Da sich gegenüber dem Stirling-Prozess noch grössere Totvolumen und eine schlechtere Wärmeübertragung (bei tragbarem Druckverlust) erkennen lassen, wird das Vorhaben abgebrochen.

2.4.3.2 Stirling-Freikolben-Energiemodul

Ziele einer laufenden Entwicklung eines **Stirling-Freikolben-Energiemoduls** sind: 1 kW elektrische Energie (elektrischer Wirkungsgrad um 20%), 4 kW thermische Energie, 50'000 wartungsfreie Betriebsstunden und Kosten der produzierten elektrischen Energie im Bereich von 0.20 Fr/kWh. In einer Zusammenarbeit zwischen einem privaten Forschungsinstitut, einer Industriefirma und zwei technischen Schulen konnten wesentliche Schritte erfolgreich bewältigt werden. Das **Mini-Blockheizkraftwerk** ist für Netzbetrieb (Schwerpunkt) und Inselbetrieb konzipiert. Dank einer äusseren Verbrennung sind geringe Emissionswerte ohne katalytische Abgasreinigung möglich. Dieses technisch interessante – bezüglich Energieeffizienz allerdings nicht unproblematische - Projekt wird durch den NEFF⁸, den PSEL⁹, den FOGA und das BEW unterstützt.

Das BEW finanzierte die **Entwicklung des dynamischen Lastreglers** [14]. Der Lastregler hat zwei Funktionen. Nebst der Regelung des Energiemoduls im Betrieb muss er bei einem Lastabwurf kurzzeitig die ganze Leistung ohne Beschädigung des schwingenden Kolbensystems aufnehmen können. Das erste Abbremsen erfolgt durch eine vom Regelkreis unabhängige elektronische Notbremse (durch mechanische Kolbenhubkontakte ausgelöster elektronischer Kurzschlusschalter).

⁸ Nationaler Energie-Forschungs-Fonds

⁹ Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft

Der Stirling-Lineargenerator erzeugt keinen exakt sinusförmigen Spannungsverlauf. Das Aktivfilter muss daraus im Betrieb auch bei Laständerungen einen **konstanten Sinusspannungsverlauf** erzeugen. Für den Inselbetrieb ist ein Referenzsinusschwinger vorgesehen. Auch für den Netzbetrieb gibt es noch keine bekannten Lösungen für Linear-Schwinger-Generatoren.

Im Rahmen des BEW-Projektteils wurde zunächst ein **Funktionsmuster für Netz- und Inselbetrieb** zum Erproben am früher beschriebenen [94] 300W-Versuchsaggregat ausgelegt, gebaut, getestet und verbessert. Darauf und auf Simulationsrechnungen basierend wurde der Regler für das 1 kW-Energiemodul entworfen, gebaut und im Labor wie auch am 1 kW Stirling-Generator erfolgreich getestet. Offen ist noch das Einbinden des Lastreglers in das übergeordnete Betriebsführungssystem.

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. Die Leistungsreduktion ist von der Dauer des Betriebsunterbruchs und den jeweiligen Eigenschaften der Wärmepumpe abhängig. Um auch diese erfassen und vergleichen zu können, sind Methoden für einen **dynamischen Wärmepumpentest** zu entwickeln.

Die Wärmepumpe ist nur eine wichtige Komponente im Gesamtsystem Wärmequelle - Wärmepumpe - Wärmespeicher - hydraulisches Wärmeverteilungssystem - Gebäude - Regelung. Deshalb wird in einem weiteren Schritt an der **Erfassung des realen Gesamtsystems im tatsächlichen Betrieb** mit bescheidener messtechnischer Hardware als Grundlage für Betriebsoptimierungen, Abnahmeversuche und Hochrechnungen auf die zu erwartenden Jahresergebnisse (Vergleich mit Planungsdaten!) gearbeitet. Schliesslich wird am Beispiel der Beheizung von Niedrigenergiehäusern auch die sich aus einer Optimierung des Gesamtsystems ergebende Effizienzsteigerung und Kostenreduktion aufgezeigt.

2.5.1.1 Dynamischer Wärmepumpentest

Zur Anpassung der Wärmeleistung von Wärmepumpen an den variablen Wärmebedarf werden Wärmepumpen 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. Bei der heutigen **stationären Prüfstandmessung** nach der EN 255 werden (wie z.B. in Töss) nur diese Grenzwerte bei stationärem Betrieb gemessen.

Dass die Leistungs- und Leistungszahleinbussen beim **Ein- und Ausschalten von Wärmepumpen** beträchtlich sein können, zeigt eine experimentelle Untersuchung, die bei einer Zykluszeit von 30 min und einer Betriebszeit von 20 min gegenüber dem stationären Betrieb eine Wärmeleistungs- und Leistungszahleinbusse um die 10% ergab. Bei noch kürzeren Taktzeiten wurden Reduktionen bis gegen 30% beobachtet. Bei sehr kurzen – für die Praxis nicht mehr relevanten Taktzeiten – ergab sich allerdings ein Wiederanstieg der Leistungszahl.

In der Literatur werden die Leistungs- und Leistungszahleinbussen beim Taktbetrieb von Wärmepumpen auf **mehrere Effekte** zurückgeführt. Es sind dies **während der Stillstandszeit** die Abkühlung wärmerer Komponenten mit Kältemittelinhalt durch Wärmeverluste an die Umgebung, die Erwärmung kälterer Komponenten mit Kältemittelinhalt durch Wärmebezug aus der Umgebung, die Kältemittelmigration aus dem Verdampfer 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 unterscheiden 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 in der Literatur gefundenen Gleichungen zur **Berechnung der Leistungs- und Leistungszahleinbussen** während dem Einschaltvorgang in Abhängigkeit der Betriebs- und der Stillstandszeit beruhen zwar auf der Beobachtung physikalischer Effekte - sind aber nur empirischer Natur. Der Zwischenbericht [15] fasst die wichtigsten der bisher beobachteten Effekte beim Anlaufvorgang aus der Literatur zusammen. In der nächsten Projektphase ist ein zur Reduktion des Versuchsaufwands und für den späteren Einbau in Simulationsprogramme wie *WP-Calc* und *YUM* geeigneteres Berechnungsmodell auszuarbeiten.

2.5.1.2 Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen

Im Forschungsvorhaben **Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen** [16] wird in Zusammenarbeit von Hochschule, Planern und Industrie ein Versuch unternommen, von den Ergebnissen der modernen Systemanalyse zur Reduktion des Messaufwands mit Hilfe eines hinreichend genauen mathematischen Modells zu profitieren. Dabei sollen die wichtigsten Anlagekenngrössen aus möglichst wenigen und **möglichst ko-**

stengünstigen Betriebsmessungen an installierten Anlagen in möglichst kurzer Zeit (maximal ein Monat während der Heizperiode) gewonnen werden. Wenn dies gelingt, kann dann mit Hilfe von Simulationsrechnungen auf die für die Effizienz und Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpenheizungen relevanten Grössen für das (auch der Planung zugrunde gelegte) Referenzjahr hochgerechnet werden. Dies würde nicht nur eine bessere Betriebsoptimierung zwischen der Abnahme- und der Schlussprüfung und einen Vergleich mit den Planungswerten, sondern auch eine Überprüfung der Wärmepumpenanlage nach jahrelangem Betrieb ermöglichen. Weiter soll die neue Methode in der Lage sein, die häufigsten Fehlerquellen zu erkennen und ihre Auswirkung auf die relevanten Jahresergebnisse zu berechnen. Schliesslich ist durch ein in die Wärmepumpensteuerung zu implementierendes Diagnoseset eine einfache Betriebsüberwachung während der ganzen Betriebsdauer der Wärmepumpenanlage zu realisieren.

Zunächst wird die **Anwendbarkeit der Kurztestmethode** anhand einer einfachen monoenergetischen Wärmepumpenanlage **erprobt**. Dies erfolgt zunächst mit fiktiven Messdaten aus Simulationsrechnungen. Falls dieser erste Schritt Erfolg verspricht, wird die Methode mit Messungen an einer ausgeführten Wärmepumpenanlage validiert. Nach einer Verallgemeinerung auf andere wichtige Schaltungsvarianten ist die Spezifikation eines Diagnosesets und einer Schnittstelle für Kurzzeitmessungen zum Einbau in die Wärmepumpe vorgesehen.

In der abgeschlossenen zweiten Phase [16] wurde für eine einfache Anlagenvariante einer Luft/Wasser-Wärmepumpe (elektrische Zusatzheizung, Seriespeicher im Vorlauf, Niedertemperatur-Heizung mit Thermostatventilen und Überströmventil-Schaltung und Heissgasabtauung) ein **dynamisches Simulationsmodell** (Bild 13) entwickelt und als echtes Simulationsprogramm in *MATLAB-Simulink* programmiert. Dieses Simulationsmodell ermöglicht eine Berechnung der Jahresarbeitszahl mit gemessenen Meteorodaten. Als Besonderheiten des Simulationsprogramms seien genannt: Speichermodellierung mit 6 thermischen Schichten, Erfassung der Energiespeicherung in Fussboden und Raumwänden.

Bild 13: *Schema zum Simulationsmodell für die Referenzanlage mit Luft/Wasser-Wärmepumpe, elektrischer Zusatzheizung und Seriespeicher (aus [16]).*

Als **reale Referenzanlage** wurde die Wärmepumpenanlage eines Einfamilienhauses in Massivbauweise mit witterungsgeführter Rücklaufregelung (auf die Wärmepumpe wirkend), Seriespeicher, Fussbodenheizung (45°C/35°C bei einer Aussentemperatur von -8°C) und zusätzlichen Radiatoren in Treppenhaus und Badezimmer mit Raumthermostaten instrumentiert: Bild 14. Im Arbeitsmittel- und im Heizkreislauf wurde im März 1997 mit den Messungen begonnen. Sie werden normal in Intervallen von 5 Minuten durchgeführt. Für die Erfassung besonderer dynamischer Effekte wurde an einem Tag in Intervallen von 10 Sekunden gemessen.

Bild 14: *Schema der Referenzanlage (aus [17]).*

Die **Anlageparameter** wurden für die Simulationsrechnung nach dem Prinzip der kleinsten Fehlerquadrate aus den gemessenen Vor-, Rücklauf- und Raumtemperaturen **ermittelt**. Mit der Übernahme der gemessenen Ein- und Ausschaltzeiten wurde eine gute Übereinstimmung zwischen Simulationsrechnung und den gemessenen Temperaturen des Heizungskreislaufs erzielt. Bei der Simulation des ganzen Wärmepumpenheizungssystems mit Rücklauftemperaturregelung ist die Übereinstimmung dagegen noch unbefriedigend. Ursache dafür ist unter anderem die noch nicht erfolgte Erfassung von Zusatzfunktionen der Heizungsregelung.

Im weiteren Verlauf des Projekts wird an einer entsprechenden Verfeinerung des Simulationsmodells gearbeitet (Erfassung aller Reglerfunktionen, detailliertere Modellierung des Arbeitsmittelkreislaufs). Zusätzlich wird auch der beim Normalbetrieb der Thermostatventile variable Volumenstrom des Heizungskreislaufs erfasst. Anschließend wird das Identifikationsverfahren anhand von fiktiven (durch das Simulationsmodell erzeugten) Messdaten entwickelt.

Die **Modellierung der Wärmeverteilung mit Fussbodenheizung** und (unbekannten) **inneren Wärmequellen** wurde abgeschlossen. Die Identifikation dieses Teilsystems anhand gemessener Werte der Rücklauftemperatur, der Aussentemperatur und der Druckdifferenz über der Umwälzpumpe (Volumenstrom via Pumpencharakteristik!) konnte auch für den Fall mit variablem Volumenstrom (Thermostatventile und Überströmventile im Betrieb) erfolgreich abgeschlossen werden. Die Ergebnisse konnten als effektive Heizkurve verdichtet werden. Der Vergleich mit der der Planung zugrunde gelegten Heizkurve zeigte die aus der Praxis qualitativ bekannte Abweichung: Bild 15.

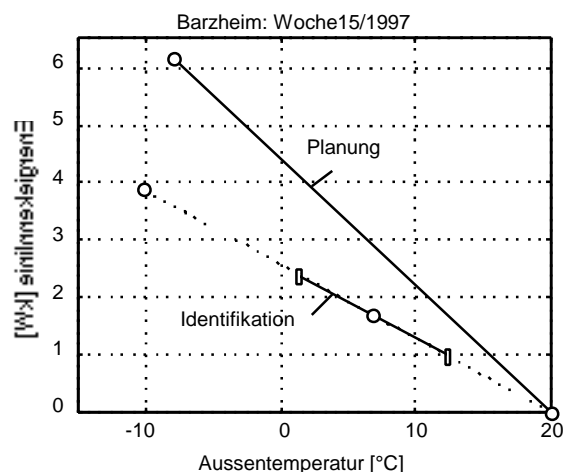


Bild 15: Vergleich des Ergebnisses der Identifikation mit den Planungsdaten für den Heizleistungsbedarf des Referenzgebäudes in Abhängigkeit der Aussentemperatur (aus [17]).

Diese ersten Ergebnisse der Parameteridentifikation sind sehr ermutigend und lassen fürs kommende Jahr auch eine erfolgreiche Erfassung der weiteren Teilsysteme Wärmespeicher und Wärmepumpe erwarten.

2.5.1.3 Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe

Niedrigenergiehäuser mit **Energiekennzahlen unter 200 MJ/m²a** stellen neue Anforderungen an die Heizsysteme. Der Anteil für den Warmwasserbedarf steigt 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 mit weniger Geld und geringerer Umweltbelastung zu erreichen, sind Wärmeerzeugung, Wärmeverteilung und Gebäude als **ganzes System** zu behandeln [18].

Geringe Kosten werden durch den direkten Anschluss der Wärmepumpe ohne Wärmespeicher und ohne Mischventile ans Wärmeverteilungssystem erreicht. Dies stellt an die Regelung des Heizungssystems allerdings erhebliche Ansprüche. Das Gesamtsystem

Gebäude-Heizung wird durch eine Computersimulation mit TRNSYS sowie mit Feld- und Labormessungen erfasst.

Mit den Zielen, die massgebenden Verursacher **ökologischer Belastungen** zu finden und einen Vergleich zu konventionellen Heizungssystemen anzustellen, wurden Ökobilanzen aufgestellt. Das Teilsystem Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Abluft-Wärmepumpenboiler und einem Gebäudetyp in Leichtbauweise ergab Folgendes: Die Belastung des Ökosystems durch den Bau des Gebäudes erwies sich als etwa gleich gross wie jene durch den Bau (Anteil ca. 20%) und den Betrieb (Anteil ca. 80%) des Heizungssystems. Die Umweltbelastung durch das FKW-Kältemittel R407C ist demgegenüber vernachlässigbar. Von den untersuchten Heizungssystemen schneidet die Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Abluft-Wärmepumpenboiler am besten ab:

Bild 16.

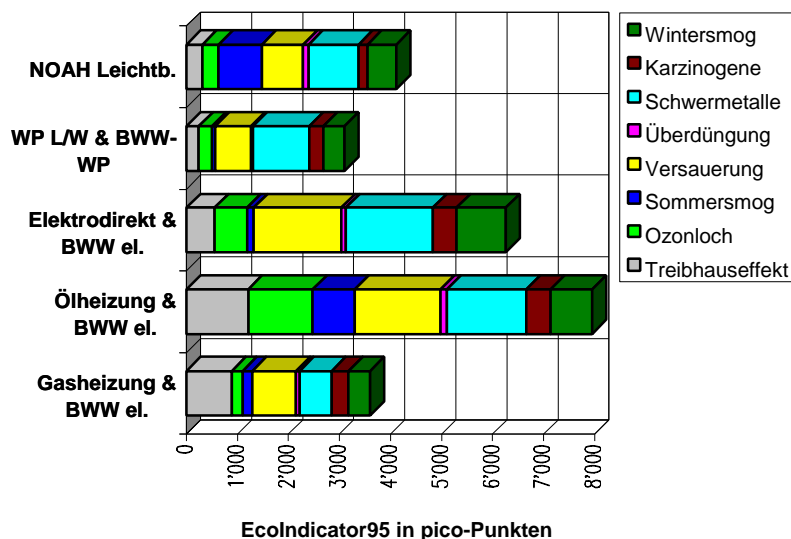


Bild 16: Umweltbelastung durch den Bau eines NOAH-Leichtbauhauses (oberster Balken) verglichen mit der Wärmeenergieerzeugung für Raumheizung und Brauchwarmwasser (BWW) von unten nach oben durch Gasheizung und Elektroboiler, Ölheizung und Elektroboiler, Elektrodirektheizung und Elektroboiler, Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Abluft-Wärmepumpenboiler (aus [19], Angaben zum EcoIndicator95 in <http://www.pre.nl/eco-ind.html>).

Die übliche **Regelung kleiner Wärmepumpenanlagen** über die Rücklauftemperatur wird bei der Anwesenheit von Einzelraum-Thermostatventilen (wie sie bei Niedrigenergiehäusern unumgänglich sind) instabil. Wenn beispielsweise bei zu grosser Wärmezufuhr das Thermostatventil schliesst, sinkt die Rücklauftemperatur und die Wärmepumpe erhält damit das falsche Signal, noch mehr Wärme zu liefern. Dieses Problem lässt sich durch die Verwendung der durch die Thermostatventile verursachten Druckdifferenz als zusätzliches Eingangssignal für die Regelung lösen. Man kann dadurch auch ohne Raumtemperaturfühler auf die Raumtemperatur und den Wärmebedarf schliessen. Durch eine über ein Modell des Wärmebedarfs gesteuerte **Pulsbreiten-**

modulation erfolgt das Einschalten der Wärmepumpe in bedarfsabhängigen zyklischen Abständen: Bild 17.

Weiter wurde der Frage nachgegangen, ob bei einer guten Wärmepumpenheizung eine **passive Solarenergienutzung** noch etwas bringe. Im untersuchten Beispiel konnte bei einer Massivbauweise mit guter passiver Solarenergienutzung 13% der Heizungsenergie eingespart werden. Bei Leichtbauweise kommt es zu derart vielen Überhitzungen mit entsprechend höheren Wärmeverlusten, dass netto mit zusätzlicher passiver Solarenergienutzung keine Heizenergie gespart werden kann.

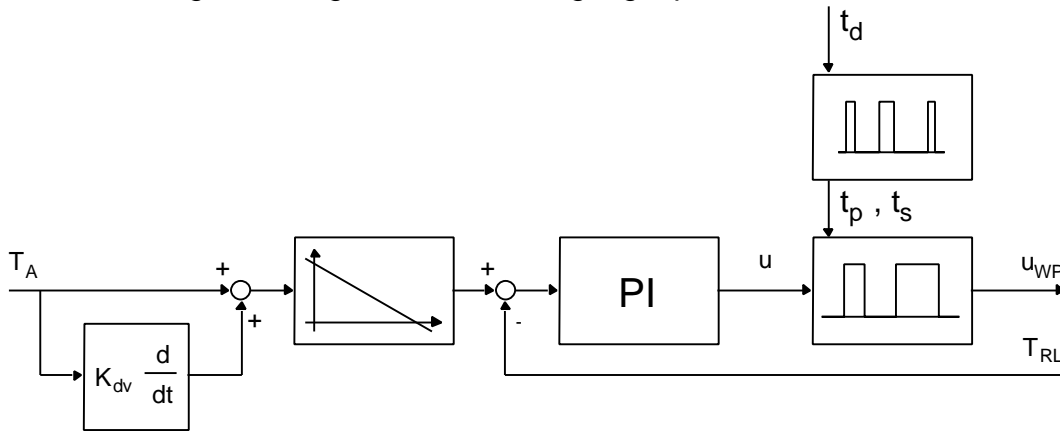


Bild 17: Funktionsschema des Heizungsreglers mit Pulsbreitenmodulation (aus [19]).

Für die Variante einer **Sole/Wasser-Wärmepumpe** wurde eine **dynamische Simulation** mit dem für Erdwärmesonden neu entwickelten Programmmodul EWS [2] durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass eine Änderung der Wärmeleitfähigkeit des Erdbodens um 1 W/mK eine Änderung der mittleren Soletemperatur von 2K und damit eine Änderung der JAZ von nur 3% ergibt. Weiter zeigte sich, dass Erdwärmesonden bei genügend hohem Volumenstrom auch mit reinem Wasser als Wärmeträger betrieben werden können [19].

2.5.2 Integration verfahrens- und energietechnischer Prozesse

Unsere Forschungsbemühungen konzentrierten sich auf neue Methoden zur Optimierung von Batch-Prozessen. Im Bereich der **Prozessintegration** (Einführung in [38], [WWW 17], [WWW 18]) hinkt die technische Praxis auch in unserem Land weit hinter den heutigen Möglichkeiten her. Wir haben deshalb der Umsetzung der Pinch-Methode in die Praxis großes Gewicht beigemessen.

2.5.2.1 Energetische Integration bei Batch-Prozessen

In der Schweiz wird sowohl im Chemie- wie auch im Lebensmittelbereich häufig in **diskontinuierlichen Prozessen** (Batch-Prozesse) produziert. Deshalb wurde 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.

Der Zwischenbericht zur Prozessintegration diskontinuierlicher Prozesse [20] gibt eine interessante **Übersicht** über die derzeit für Batch-Prozesse **verfügbaren Methoden**. Die bereits früher vorgestellte Pinch-Methode für mehrere Zeitabschnitte (*Pinch-BATCH*) wird an zwei einfachen Beispielen mit kombinatorischen Methoden anderer Autoren zur automatischen Wahl optimaler Wärmeübertragungsverbindungen für diskontinuierliche Prozesse verglichen. Dabei wurden mit der vorgeschlagenen *Pinch-BATCH*-Methode gegenüber den kombinatorischen Methoden etwas wirtschaftlichere (5..15%) Lösungen mit einem höheren Anteil an zurückgewonnener Wärme gefunden. Beim Stellenwert und dem angemessenen Realisierungsgrad der Optimierung des Energieeinsatzes bei Batch-Prozessen in der industriellen Praxis ist die mit *Pinch-BATCH* erreichbare Verbesserung zumindest bis zum Vorliegen eines anwenderfreundlichen PC-Werkzeugs allerdings noch von eher akademischem Interesse.

Die **Omniummethode** für eine direkte Wärmeübertragung berechnet systematisch die zwischen allen kalten und allen warmen Strömen übertragbare Wärme. Schliesslich werden diejenigen kalten und warmen Ströme durch eine Wärmeübertragung verbunden, welche die höchste Gesamtwärmerückgewinnung ergeben. Dabei wird zwischen zwei Strömen nur ein einziger Wärmeübertrager zugelassen. Damit werden zusätzliche interessante Möglichkeiten zur Wärmerückgewinnung vernachlässigt.

Die **Permutationsmethode** ist eine Ergänzung der Omniummethode. Im Gegensatz zu dieser lässt sie nur eine indirekte Wärmeübertragung über einen Zwischenspeicher von allen warmen zu allen kalten Strömen zu. Auch diese Methode nutzt die zur Verfügung stehenden Temperaturdifferenzen nicht genügend effektiv.

Die vorgeschlagene **PinchBATCH-Methode** erleichtert das Auffinden optimaler Schaltungen für direkte und indirekte Wärmeübertragung und die systematische Wahl geeigneter Zwischenspeichertemperaturen. Im Programm *PinchLENI* wurden gewisse Elemente zur Wahl der Wärmespeicherung implementiert. Die Strukturen von *PinchLENI* genügen allerdings nicht mehr, um auch Batch-Prozesse wirklich erfassen zu können. Deshalb wird momentan eine vollständige **Neuprogrammierung des Programms *PinchLENI*** durchgeführt.

In der zweiten Phase des Projekts sind die **Optimierung der Wärmespeicherung** und die **Minimierung der Anzahl benötigter Wärmeübertrager** unter Einbezug kombinatorischer Methoden geplant. Für die Anwendung durch den praktizierenden Ingenieur ist ein entsprechender Ausbau der Neufassung des Programms *PinchLENI* vorgesehen.

2.5.2.2 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 systematisches Auffinden optimaler Anlagekonfigurationen vor der Prozesssimulation und Detailauslegung entwickelt. Sie sind auch ein hervorragendes Werkzeug zur Abschätzung des Verbesserungspotenti-

als bestehender Anlagen. Die weitaus erfolgreichste Pinch-Methode wird infolge ihrer Einfachheit und hohen Anschaulichkeit sowie der leichten Eingriffsmöglichkeiten für den planenden Ingenieur insbesondere in den angelsächsischen Ländern mit Erfolg eingesetzt. Leider sind diese Methoden bei uns noch wenig bekannt. Dies nicht zuletzt wegen dem Fehlen eines entsprechenden Lehrbuchs in deutscher Sprache. Aus diesem Grund wurde ein deutschsprachiges Handbuch als Einführung in die Prozessintegration erarbeitet [21] und in einem ersten BEW-Kurs „Energieplanung in Industrie und Haustechnik mit zukunftsweisender Methode“ erprobt. Weitere Aktionen zum Umsetzen der Pinch-Methode in die Praxis werden im Kapitel 4 vorgestellt.

3 ZUSAMMENARBEIT

Unsere Bestrebungen zur Reduktion des Primärenergiebedarfs in den Bereichen der Umgebungswärme- und Abwärmenutzung wurden durch eine intensive nationale und internationale Zusammenarbeit ergänzt und unterstützt.

3.1 Nationale Zusammenarbeit

Der Forschungsbereich „Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW)“ wurde nochmals durch den **NEFF** (Nationaler Energie-Forschungs-Fonds) unterstützt. Mit seinen Nachfolgefonds, dem **FOGA** (Energieforschungsfonds der schweizerischen Gasindustrie) und dem **PSEL** (Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft) wurden die Forschungsanstrengungen koordiniert. Die entsprechenden Forschungsprojekte wurden im Kapitel 2 ausführlich erörtert. Hier seien nochmals erwähnt: Mini-Blockheizkraftwerke in der Form eines Freikolben-Stirling-Generators (Abschnitt 2.4.3.2, **NEFF**, **PSEL**, **FOGA**, **BEW**), Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum Töss (Abschnitt 2.5.1.1, **PSEL**, **BEW**), Swiss Motor (Abschnitt 2.4.2, **FOGA**, **BEW**), Mini-Blockheizkraftwerk mit Verbrennungsmotor und Teillastbetrieb mit variabler Drehzahl (**NEFF**, **FOGA**), Kostenermittlung und Marktsituation von Grosswärmepumpen (**PSEL**). Der **FOGA** hat sich auch nochmals für die Lancierung des AWP-Kessel-Vorhabens engagiert (Abschnitt 2.3.4.1).

Im Rahmen der **FWS** (Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz) arbeiten Branchenverbände von Planern und Installateuren, Hersteller von Wärmepumpen, Elektrizitätswerke und Dienststellen von Kantonen zur Verbreitung effizienter Wärmepumpenheizungsanlagen mit einem guten Preis-/Leistungsverhältnis zusammen. Die *Arbeitsgemeinschaft Wärmepumpen* **AWP** wirkte bei der Ausarbeitung und Vorstellung des Pflichtenhefts für die *Swiss Retrofit Heat Pump* (Abschnitt 2.3.3) mit. Auch mit dem *Schweizerischen Fachverband für Wärme-Kraft-Kopplung* **WKK** wird ein reger Gedankenaustausch gepflegt.

Im Bereich der **Prozessintegration** (Abschnitt 2.5.2) fand die nationale Zusammenarbeit im Rahmen mehrerer Sitzungen des *National Teams* des *IEA Implementing Agreement on Process Integration Technologies* statt. Zu diesen Sitzungen sind alle

interessierten Fachleute herzlich eingeladen. Interessenten wenden sich bitte an den Unterzeichneten. Unsere Bestrebungen zur Verbreitung der Methoden der Prozessintegration wurden auch durch den **FVC** (Fachgruppe für Verfahrens- und Chemieingenieurwesen im SIA) unterstützt.

3.2 Internationale Zusammenarbeit

Nachfolgend werden die wesentlichen institutionalisierten Kooperationen mit schweizerischen Projektpartnern im Bereich des BEW-Forschungsprogramm *Umgebungswärme, Abwärme und Wärme-Kraft-Kopplung* erörtert. Es soll hier aber auch auf zwei ergiebige Informationsquellen in diesem Bereich hingewiesen werden: *IEA Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies* ([WWW 2], [WWW 3], [WWW 4]) und *IZW Informationszentrum Wärmepumpen+Kältetechnik, Fachinformationszentrum Karlsruhe* [WWW 5].

3.2.1 Bilaterale Kooperation mit Nachbarländern

Zwischen der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz FWS und den entsprechenden Organisationen in Deutschland und Österreich finden regelmässige Dreiländertreffen statt. Insbesondere an dem für Deutschland, Österreich und der Schweiz gemeinsam zu erteilenden **Gütesiegel für Wärmepumpen** wird intensiv gearbeitet.

Die **Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke** führte im Juni 1997 eine Informativonstagung zur Marktentwicklung und zum Marketing in Deutschland, Österreich und der Schweiz am Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrums Töss durch. Die Gäste besichtigten bei dieser Gelegenheit das *Testzentrum Töss* und zwei Grosswärmepumpen in Zürich. Im Bereich des Richtlinienwerks des Vereins Deutscher Ingenieure wird am Entwurf der **VDI-Richtlinie 4640 zur thermischen Nutzung des Untergrundes** gearbeitet. Im entsprechenden Ausschuss kann die Schweiz die Interessen des Bundesamtes für Energiewirtschaft, der Arbeitsgemeinschaft Wärmepumpen und der Fördergemeinschaft Wärmepumpen durch einen Delegierten wahrnehmen.

Die **Electricité de France EdF** möchte nach einem erheblichen Marktanteilverlust die in Frankreich weitverbreiteten Elektrowiderstandsheizungen durch Wärmepumpen ersetzen. Sie zeigt sich an unserer Wärmepumpentechnologie und an unseren Planungswerkzeugen sehr interessiert. Hier könnte sich für unsere Wärmepumpenhersteller ein grosser Markt öffnen!

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 IEA¹⁰ (**IEA Heat Pump Programme HPP**).

3.2.2.1 Heat Pump Centre (Annex 16)

Das **Heat Pump Centre** des HPP (Projekt oder Annex 16) informiert über internationale Fortschritte der Wärmepumpentechnologie, Ergebnisse der HPP-Projekte und über Marktentwicklungen in den Mitgliedländern Niederlande, Norwegen, Spanien, Österreich, Schweiz, USA und Japan. Das *Heat Pump Centre* gab uns auch Gelegenheit, das in der Schweiz Erreichte 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. Im *Swiss National Team* sind vertreten: Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz FWS, Arbeitsgemeinschaft Wärmepumpen AWP, Verband Schweizerischer Heizungs- und Lüftungsfirmen CLIMA-SUISSE, Schweizerische Elektrizitätswirtschaft mit der Informationsstelle für Elektrizitätsanwendung INFEL, Elektrizitätswerke NOK und EKZ mit dem Wärmepumpentestzentrum Töss, Schweizerischer Verein für Kältetechnik, Ingenieurschulen und Bundesamt für Energiewirtschaft. 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 6]. Berichte aus dem HPP-Programm der IEA können über diesen Weg auch bestellt werden. *Swiss National Team* ist mit aktuellen Informationen über erreichbar.

3.2.2.2 Compression Systems with Natural Working Fluids (Annex 22)

Im HPP-Projekt 22 **Compression Systems with Natural Working Fluids** erarbeiten Kanada, die USA, Japan, Dänemark, Frankreich, England, Norwegen und die Niederlande gemeinsam Planungsgrundlagen für die Anwendung natürlicher Kältemittel wie Ammoniak, Kohlenwasserstoffe, CO₂ oder Luft in Wärmepumpen und Kompressionskälteanlagen. In diesem Rahmen hat die Schweiz nebst der bereits in [41] beschriebenen Studie zur Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel drei weitere Beiträge ausgearbeitet und im Oktober 1997 in einem Workshop in Gatlinburg (USA) vorgestellt. Es sind dies eine Untersuchung des Wärmeübergangs bei der Verdampfung von Ammoniak-Schmierölgemischen in Rohren ([5], [25], Näheres im Abschnitt 2.2), eine detaillierte Analyse von Messergebnissen an einer der beiden 3.9-MW-Ammoniak-Wärmepumpen der ETH-Lausanne ([6], [26], Näheres im Abschnitt 2.3.1.1) und eine Studie zum Wärmeübergang von überkritischem CO₂ in Rohren [27]. Der Schlussbericht zum Annex 22 wird im März 1998 erscheinen. Eine Verlängerung dieses Vorhabens steht zur Diskussion.

¹⁰ International Energy Agency, Näheres in [WWW 1]

3.2.2.3 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 geht 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 schweizerische Beitrag erfolgt im Rahmen der bereits in [41] beschriebenen Heizkörperwärmepumpe. Der Abschluss dieses Vorhabens ist für 1998 mit einem internationalen Workshop in Kanada geplant.

3.2.2.4 Low-Temperature Low-Cost Heat Pump Heating System (Annex 25)

Weltweit werden sich neue Standards für Gebäude mit wesentlich geringerem Energiebedarf durchsetzen. Für die Niedrigenergiehäuser mit einem grossen Einfluss der Gebäudedynamik und einem hohen Anteil der Warmwasserbereitung am Gesamtwärmebedarf sind neue kostengünstige Lösungen mit hoher Effizienz zu entwickeln. Für das im Abschnitt 2.5.1.3 beschriebene Vorhaben „Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe“, hat deshalb die Schweiz aufgrund der nachstehenden Überlegungen eine Ausweitung als IEA-Projekt angeboten:

- Nutzen von Synergien durch einen Erfahrungsaustausch zwischen ähnlich gelagerten, nationalen Projekten.
- Erweiterung der Anlagevarianten auf die Besonderheiten in anderen Ländern.
- Hinterfragen und Ergänzen der eigenen Methoden und der Beurteilungskriterien bezüglich Ökologie, Ökonomie und Komfort.

Holland wollte dem Programm sofort beitreten. Deutschland und Österreich bekundeten grosses Interesse, und es wurde ein entsprechender Vertragstext ausgearbeitet. Im September 1997 fand in Zürich ein „Kick-off Meeting“ mit Vertretern aus Deutschland, den Niederlanden und der Schweiz statt. An diesem wurde die mögliche Zusammenarbeit konkretisiert. Im Oktober 1997 wurde das Vorhaben nochmals einem internationalen Kreis von Fachleuten und den Verantwortlichen des *IEA Heat Pump Programme* vorgestellt. Obwohl die deutschen und österreichischen *IEA-HPP*-Delegierten unser Anliegen als zukunftsgerichtet unterstützten, konnte die Finanzierung nicht sichergestellt werden. Die Schweiz hat ihren Annexvorschlag deshalb zurückgezogen. Wir werden aber die zustande gekommenen Kontakte im weiteren Projektverlauf auf informelle, bilaterale Weise nutzen. Der Unterzeichnete erhielt bei allen Diskussionen den Eindruck, dass wir mit einem entsprechenden EU-Antrag mehr Erfolg gehabt hätten. Die IEA ist offenbar für unsere deutschen und österreichischen Nachbarn ein „schlechtes Zusammenarbeitsvehikel“.

3.2.3 EU-Projekte

Im Rahmen des vierten Forschungs-Rahmenprogramms der **Europäischen Union** gelangten leider auch in diesem Berichtsjahr keine schweizerischen Forschungsgesuche aus dem Bereich UAW zur Realisierung. Forschern und Entwicklern wird aber dringend geraten, sich über laufende Vorhaben und Ausschreibungen der EU zu informieren. Am bequemsten erfolgt dies über [WWW 9], [WWW 10], [WWW 11], [WWW 12].

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. Das Bundesamt für Energiewirtschaft hat deshalb 50% der Kosten für die Mitgliedschaft der Schweiz übernommen. Besonders wertvoll sind aus seinem Tätigkeitsbereich die Literaturübersichten im *IIR-Bulletin* (Näheres über [WWW 14]) und seine internationalen Veranstaltungen. Vom 29. Sept. bis zum 1. Okt. 1997 führte das IIR in Linz den Workshop *Heat Pump Systems, Energy Efficiency and Global Warming* mit 57 Teilnehmern aus Europa, Amerika, Asien und Australien durch. Auch aus unseren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten [9] und [18] wurde vorgetragen. Die Konferenz bekräftigte folgende Entwicklungstendenzen:

- Die Einsicht, dass nicht nur die Wärmepumpen, sondern das **Gesamtsystem** von der Wärmequelle bis und mit dem Gebäude optimiert werden müssen, setzt sich vermehrt durch.
- Mit dem von uns eingeschlagenen Weg sehr **einfacher Systeme für Niedrigenergiehäuser** sind wir auf dem richtigen Weg.
- Insbesondere in Deutschland und Norwegen werden Anlagen zur Verwendung von **CO₂ als natürliches Kältemittel** entwickelt. Für stationäre Anwendungen ist die Warmwasserbereitung infolge der grossen Temperaturänderung besonders interessant.
- Für den **R22-Ersatz** ist auch für zweistufige Wärmepumpen R410A interessant (nur kleine Abweichungen zwischen Siede- und Taulinie -> keine unliebsamen Destillationseffekte).
- **Absorptionswärmepumpen** können sich nur bei im Vergleich zur elektrischen Energie sehr tiefen Gaspreisen und vor allem bei nutzbarer Abwärme (über 100°C) durchsetzen.

Einen stichwortartigen **Führer zu den Tagungsunterlagen** [31] findet man im **Kapitel 8 (Anhang)** dieses Berichts.

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 (Näheres in [WWW 16]. Das erste Vorhaben dieses Programms (**Annex 1**) 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 befindlichen 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 noch wenig beachteten Thema der Prozessintegration [22]. Mit der Herausgabe eines **Sonderheftes** des *Schweizer Ingenieur und Architekt zur Prozessintegration* wurde eine besondere Anstrengung zur Verbreitung der Methoden der Prozessintegration in die Praxis unternommen (Näheres im Abschnitt 2.5.2). Dieses Sonderheft fand auch bei den anderen Mitgliedländern grosse Anerkennung.

Im Mai 1997 wurde in **Trondheim (N)** ein zweitägiger **Workshop zum Annex 1** durchgeführt. Er fand leider trotz einer bedeutenden internationalen Folgeveranstaltung nur bescheidene Teilnehmerzahlen aus der Privatwirtschaft. Für künftige Bemühungen zur Verbreitung der PI-Methoden sind diese vermehrt als **wertvolle Ergänzung zur Prozesssimulation** zu behandeln. Die Ingenieure in der Verfahrens- und Energietechnik wenden Simulationswerkzeuge als selbstverständliche Werkzeuge seit langem an. Insbesondere die Pinch-Methode (ev. mit Ergänzungen aus dem Bereich mathematischer Optimierungsmethoden) vermag durch einfache **Analysen** das Potential möglicher besserer Lösungen aufzuzeigen und durch die **systematische Synthese** rasche Wege zu einer besseren Prozessführung aufzuzeigen. Die weitere Bearbeitung und Feinoptimierung wird der Verfahreningenieur dann wie bereits gewohnt über die **Prozesssimulation** vornehmen. Die grosse **Stärke der Prozessintegration in der konzeptionellen Phase** muss den Praktikern anhand überzeugender und einfach zugänglicher Beispiele gezeigt werden.

3.2.5.1 Erfassen der Bedürfnisse der Anwender - Benutzerübersicht

Als erstes Produkt des Annex 1 wurde eine Benutzerübersicht ausgearbeitet. Zur Klärung der Anwendungsbereiche, der Anwendungsart, der Prioritätswünsche für künftige Entwicklungen und des Nutzens für die Anwender der Prozessintegration wurde in den Teilnehmerländern eine Umfrage durchgeführt. Im Rahmen dieser internationalen **Umfrage** wurden **in der Schweiz** 41 Fragebogen an Firmen der Stoffumwandlungstechnik und an Ingenieurbüros verschickt. Davon wurde 20 beantwortet. In 13 Fällen wurden die Informationen durch persönliche Interviews geklärt und ergänzt. Das in [32] zusammengefasste Ergebnis ist im Vergleich mit den anderen Teilnehmerländern ernüchternd. Nur fünf Projekte (Papierindustrie, Eternitproduktion, Abfüllindustrie, Nassoxidation und Brauerei) wurden systematisch mit den Methoden der Prozessintegration geplant und in der Praxis erfolgreich realisiert. In der Schweiz besteht somit in diesem Bereich ein **erheblicher Nachholbedarf**. Die Industrie verlangt nach guten Lehrbüchern (es gibt keines in deutscher Sprache!) und Handbüchern mit detaillierten Fallstudien. Dabei ist die Prozessintegration in einem weiteren Rahmen

auch für einen optimalen Umgang mit Stoffströmen (wie Wasserhaushalt oder andere Prozessführung) zu behandeln. Ein Grund für die geringe Anwendungshäufigkeit der Prozessintegration in der Schweiz ist auch das Fehlen einer praktikablen Methode für die in der Schweiz häufigen Batch-Prozesse.

In Europa ergibt sich (mit Ausnahme von England, wo die Prozessintegration seit langem erfolgreich angewandt wird) ein analoges Bild wie in der Schweiz: **Man kennt die PI-Methoden kaum** - oder glaubt, sie seien überflüssig [33]. Wer die Methoden anwendet, benützt etwa zu gleichen Teilen kommerzielle Software und selbst entwickelte Software. Von der kommerziellen Software werden *SuperTarget* und *Advent* am häufigsten eingesetzt. Die Auswertungen sind allerdings problematisch, da nur die jeweils engagierten Gruppen erfasst wurden.

Die PI-Methoden werden bei der Planung vorrangig im Stadium des **Grobkonzepts** eingesetzt. Sie kommen aber auch für **Energieanalysen** und für die **Sanierungskonzeption** zum Zug.

Hauptziel beim Einsatz der PI-Methoden ist die Reduktion der Energiekosten. **Weitere Ziele** sind: Reduktion der Investitionskosten, verbesserte Betriebbarkeit der Anlagen und in zunehmendem Mass auch Reduktion der Umweltbelastung (Emissionen, Wasser/Abwasser, geschlossene Anlage) und des Kühlwasserbedarfs sowie Erhöhung des Durchsatzes in bestehenden Anlagen.

Zusammenfassend werden folgende **Gründe für die spärliche Anwendung** der Methoden der Prozessintegration genannt:

- Weit verbreitete Unkenntnis.
- Software zu teuer.
- Hoher Schulungsaufwand für nur gelegentlichen Einsatz (was man nicht häufig braucht, ist rasch vergessen).
- Der Zeitaufwand für eine PI-Analyse ist zu gross (der Kunde will das nicht bezahlen).
- Mangel an hinreichend genauen Daten.
- PI trägt nichts zur Flexibilität und zur Regelbarkeit einer Anlage bei.
- Für einfachere Fälle ist die kommerzielle Software zu komplex.
- Es gibt noch nicht genügend überzeugende Praxisresultate.
- Die gemeinsame Verwendung der Daten zwischen Planungssoftware (Fließbilder), Prozesssimulationssoftware und PI-Software ist oft nicht gegeben.

Die ausführliche Benutzerübersicht [33] kann durch Personen mit Wohnsitz in einem der eingangs genannten Mitgliedsländer des Annex 1 bezogen werden.

3.2.5.2 Katalog zur Prozessintegration

Als zweites Produkt des Annex 1 liegt nun eine umfassende Orientierungshilfe zur Prozessintegration vor [34]. Dieser Katalog enthält nebst einer zusammenfassenden Darstellung der weltweit wichtigsten Methoden und deren Anwendungsbereiche weltweite Informationen zu Forschungsinstitutionen, Softwareentwicklern, verfügbarer Software, Kursen und Fachbüchern.

Während das Schwergewicht der akademischen Forschung heute bei den Methoden der mathematischen Programmierung liegt, hat sich in der Praxis praktisch ausschliesslich die Pinch-Methode durchgesetzt.

Der sehr empfehlenswerte Katalog zur Prozessintegration [34] kann durch Personen mit Wohnsitz in einem der eingangs genannten Mitgliedsländer des Annex 1 bezogen werden. Eine sehr interessante, bewertende Softwareübersicht findet man als Ergänzung in [WWW 19].

3.2.5.3 Künftige Aktivitäten

Zunächst ist bis Mai 1998 die **bewertende Übersicht** zu den vorhandenen Methoden als drittes Produkt des Annex 1 fertigzustellen. Da in der Praxis die Methoden der mathematischen Programmierung noch nicht eingesetzt werden, legen die Mitgliedsländer besonderen Wert auf eine ausführliche Darstellung der praktischen Anwendbarkeit und Vorteile dieser Methoden. Zur Sicherung der Weitergabe der Informationen aus Annex 1, zur Koordination neuer Annexvorschläge und der Rekrutierung neuer Mitgliedsländer wird der **Annex 1** bis Mai 1998 **verlängert**.

Die neuen **Annexvorschläge** *Pulp and Paper* der skandinavischen Länder und *Environment and Sustainability* der Schweiz sind mit möglichen Partnerländern zu besprechen und als Vertragstexte zu konkretisieren. Zum Thema *Environment and Sustainability* wird durch das *Laboratoire d'énergétique industrielle der EPF-Lausanne* ein entsprechender Vorschlag ausgearbeitet.

Unter dem Patronat des *IEA Implementing Agreement on Process Integration* wird im April 1998 in Kopenhagen eine **Internationale Konferenz zur Prozessintegration** durchgeführt. Sie soll einer Verbreitung und Vertiefung der Methoden der Prozessintegration dienen und weitere Länder zum Beitritt bewegen. Leider wurde unserem Wunsch, keine separate Konferenz für „Insider“ durchzuführen, sondern den Anlass mit einer grossen internationalen Veranstaltung der Prozesstechnik zu verbinden, nicht entsprochen.

4 TRANSFER IN DIE PRAXIS

Da an den meisten der ohnehin sehr anwendungsnahen Projektarbeiten private Firmen beteiligt sind, ist die direkte **Zusammenarbeit mit der Privatwirtschaft sehr eng**. Die Umsetzungschancen der Forschungsergebnisse in die Praxis erwies sich bei

gleichzeitiger gemeinsamer Bearbeitung von Vorhaben durch den Hochschulbereich und die Privatwirtschaft schon ab Projektbeginn als besonders hoch. Im Berichtsjahr konnten weitere solche Projekte gestartet werden.

Die im Jahr 1997 abgeschlossenen Forschungsarbeiten

- sind eine **gute Grundlage für eine industrielle Weiterentwicklung zu neuen Produkten** (Stiller Verdampfer für Luft/Wasser-Wärmepumpen [1], Zweistufige Wärmepumpe [9], [10], Entwicklung von Wärmepumpen mit Ammoniak als Arbeitsmittel [6], [7], [8], Swiss-Motor [12], Entwicklung eines Mini-Stirling-BHKW mit Freikolben [14]);
- dienen einer **besseren Auslegung** (Berechnungsmodul für Erdwärmesonden [2], Geothermische Eigenschaften des Schweizer Molassebeckens [3], Verdampfung von Ammoniak-Ölgemischen [5], Dynamischer Wärmepumpentest [15]);
- können zur **Planung effizienterer und kostengünstiger Wärmepumpenheizsysteme** eingesetzt werden (Regeneration von Erdwärmesonden [4], Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpen [18], [19]);
- erlauben eine bessere **Optimierung und Überprüfung von Wärmepumpenheizungssystemen** (Dynamischer Wärmepumpentest [15], Kurztestmethode für Wärmepumpen [16], [17]);
- sichern einen **emissionsarmen Betrieb von Anlagen** mit Wärme-Kraft-Kopplung (Betriebsüberwachung von Dreiwegekatalysatoren [11]) und
- erlauben die **Reduktion des Energiebedarfs verfahrenstechnischer Prozesse** durch eine systematischere Konzeption mit den Methoden der Prozessintegration [20], [21], [34].

Die in den UAW-Projekten erarbeiteten Ergebnisse und Werkzeuge werden in erster Linie durch **Publikationen** der Projektleiter in den einschlägigen Fachzeitschriften verbreitet. In den ebenfalls in der Fachpresse publizierten **Kurzfassungen** des Programmleiters wird laufend auf die Resultate und Schlussberichte abgeschlossener Vorhaben hingewiesen.

Zahlreiche P+D-Projekte helfen, das in der Forschung Erarbeitete in zuverlässig funktionierende Anlagen umzusetzen. Diesem Ziel diene auch die im Mai 1997 an der Ingenieurschule Burgdorf durchgeführte 4. UAW-Tagung mit dem Thema **Wärmepumpen und Blockheizkraftwerke: Von der Forschung in den Alltag** [35]. Sie fand grosses Interesse und wurde von gegen 200 Teilnehmern besucht.

Der trotz hohem Energiesparpotential geringe Bekanntheitsgrad der Prozessintegration (vergl. Abschnitte 2.5.2.2 und 3.2.5.1) veranlasste uns zur Verfassung und Herausgabe einer **Sondernummer zur Prozessintegration im „Schweizer Ingenieur und Architekt“** [36]. Nach einer Einführung in die Prozessintegration wurden darin vier erfolgreiche Anwendungen in der Schweizer

Prozessindustrie erörtert, die Besonderheiten bei diskontinuierlichen Prozessen aufgezeigt und die Zielrichtungen der Forschung skizziert.

Unter dem Titel „Energieplanung in Industrie und Haustechnik mit zukunftsweisender Methode“ fand im November 1997 an der Ingenieurschule Burgdorf der erste **BEW-Kurs zur Prozessintegration** statt. Anhand von Praxisbeispielen aus der Prozess- und Haustechnik und eines speziell für diesen Kurs ausgearbeiteten deutschsprachigen Handbuchs [21] wurden die Teilnehmer in die Anwendung der Pinch-Methode eingeführt. Dieser Kurs fand ein sehr gutes Echo und wird bereits am 31. März 1998 wiederholt. Der Kurs verdeutlichte allerdings auch den instationären Charakter der Energieflüsse in der Haustechnik. Dieser Problematik wird deshalb im kommenden Jahr in einem Forschungsprojekt anhand eines interessanten Beispiels aus der Praxis nachgegangen.

Das auch vom Bundesamt für Energiewirtschaft 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 wesentlichen¹¹ nach der Euronorm EN 255 ermittelten Testergebnisse werden regelmässig im WPZ-Bulletin publiziert. Sie können auch über das Internet abgerufen werden [WWW 15]. Ab 1998 wird in Töss auch die elektrisch-sicherheitstechnische Prüfung durchgeführt.

Die Tendenz zu natürlichen Kältemitteln verstärkte sich insbesondere in Deutschland und in den skandinavischen Länder. Dies aus der Befürchtung, toxische Abbauprodukte wie Trifluoressigsäure der FKW könnten langfristig zu einem nächsten Ausstiegsszenario führen. **Natürliche Kältemittel** wie Alkane, Alkene, CO₂ und Ammoniak sind entweder brennbar und/oder toxisch. Eines der Haupthindernisse für brennbare Kältemittel war bisher das Fehlen entsprechender Standards und anerkannter Richtlinien. Mit der **Verabschiedung** der **SN 253130** wurde auch in der Schweiz ein wesentlicher Schritt zur Anwendung brennbarer Kältemittel getan. Die nun vorliegende **neue Schweizer Norm** regelt den Umgang mit brennbaren Kältemitteln zur Gewährleistung der Anwendung brennbarer Kältemittel mit hoher Sicherheit für die Betreiber. Sie wurde durch einen Arbeitsausschuss mit Vertretern aus der Kälte- und der Wärmepumpentechnik bearbeitet. Die Tabelle 4 gibt einen Eindruck über den gegenwärtigen Stand der Normierung.

Schweiz	<p>SN 253120:1998 Definitionen und technische Angaben über Kältemittel SN 253130:1998 Kälteanlagen, Anforderungen in Bezug auf den Aufstellungs-ort. Ein Auszug ist über [WWW 7] abrufbar.</p> <p>Für brennbare Kältemittel der Gruppe L3 gilt künftig:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Innenaufstellung bis max. 5 kg Füllmasse ➤ über dem Erdreich: <ul style="list-style-type: none"> - keine Lüftung, wenn Raumvolumen ausreichend gross - sonst natürliche oder mechanische Lüftung
---------	--

¹¹ Verschärfend gegenüber der EN255 wird ab Oktober 1996 die maximale Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur auf 10 K begrenzt.

	<ul style="list-style-type: none"> ➤ unter dem Erdreich: <ul style="list-style-type: none"> - keine Lüftung bis 1 kg - sonst mechanische Lüftung
Deutschland	DIN 7003, 2.Entwurf 1997
Frankreich	erachtet derzeitige Normen und Richtlinien als unzureichend
Europa	prEN 378 noch hängig EN 1127 für industrielle und kommerzielle Anwendungen

Tabelle 4: Stand der Normierung für brennbare Kältemittel.

Die von der *Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz (FWS)* organisierte **Wärmepumpen Expo 97** im Nov.1997 in Zürich bot mit gut 50 Ausstellern 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. Aufgefallen sind interessante Neuentwicklungen in den Bereichen zweistufige Wärmepumpen für den Sanierungsmarkt, Kleinwärmepumpen mit Ammoniak als Kältemittel und Kleinanlagen für Minienergiehäuser mit kontrollierter Lüftung. Die Veranstaltung fand bei Bauherren, Architekten und Planern grosse Beachtung.

Das Ressort Aus- und Weiterbildung der *FWS* nahm sich einer Verbesserung der Installationsqualität durch die Ausbildung der entsprechenden Fachleute und einer Erhöhung der Produktequalität durch die Einführung eines Wärmepumpen-Gütesiegels an. Insbesondere zeigte sie die Einsatzmöglichkeiten von **Wärmepumpen bei Heizungsanierungen** in diversen Kursen für Monteure der Sanitär-, Elektro- und Heizungsbranche. Mit der Herausgabe der Zeitschrift „Wärmepumpe NEWS“ ab April 97 wurde die Öffentlichkeitsarbeit verstärkt.

Die Wärmepumpentechnik wird auch im Rahmen des **Investitionsprogramms des Bundes** („Konjunkturspritze“) **gefördert**. Bedingungen und weitere Einzelheiten sind über [WWW 20] zu erfahren.

Der *schweizerische Fachverband für Wärme-Kraft-Kopplung WKK* führte im Nov.1997 eine gut besuchte Tagung zur **Wärme-Kraft-Kopplung** durch. Er hat eine interessante Übersicht zur Wärme-Kraft-Kopplung mit Fachinformationen, schweizerischen Referenzbeispielen und Firmenportraits herausgegeben [37].

5 AUSBLICK AUF 1998

Auch im Jahr 1998 wird die Realisierung des UAW-Konzepts 96/99 [39] – wenn auch mit einigen Korrekturen - fortgesetzt. An der Aktualität der Wärmepumpentechnologie und der Wärme-Kraft-Kopplung hat sich dank ihrem **hohen und kurzfristig realisierbaren Potential bezüglich Reduktion der CO₂-Emission und des Bedarfs an fos-**

silien Brennstoffen nichts geändert. Auch die für 1998 geplanten Forschungsarbeiten dienen in erster Linie dem Ziel, die **Effizienz** und die **Zuverlässigkeit** solcher Systeme zu **erhöhen**, deren **Preis zu senken** und den Weg für die Verwendung **natürlicher Kältemittel** zu ebnen. Im einzelnen sind für 1998 die folgenden Beiträge vorgesehen (in thematischer Reihenfolge):

- **Wärmequellen:** Fortsetzung der Untersuchung stiller Verdampfer [1], Implementieren des Berechnungsmoduls für Erdwärmesonden [2] in das Auslegungsprogramm WP-Calc [40], Beschaffung der für die Auslegung von Erdwärmesonden relevanten Stoffwerte des Erdbodens [3] und Direktverdampfung von Propan in Erdwärmesonden.
- **Verdampfen von Arbeitsmitteln:** Abschluss der Wärmeübergangsuntersuchungen beim Verdampfen von Ammoniak-Schmieröl-Gemischen in Rohren [5], Verallgemeinerung der Berechnungsgleichungen für den Wärmeübergang bei der Verdampfung in Rohren.
- **Ammoniak-Kleinwärmepumpen:** Erarbeiten der Grundlagen zum Bau kleiner Ammoniakwärmepumpen. Je nach Ausgang des Vorhabens [8] Realisieren eines Funktionsmusters.
- **Luft/Wasser-Elektrowärmepumpen:** Weiterentwickeln zu einem effizienten **monovalenten Betrieb ohne Wärmespeicher** im Heizungssystem.
- **Wärmepumpe für den Sanierungsmarkt:** Entwickeln eines Wärmepumpenmoduls hoher Effizienz und geringer Systemkosten mit natürlichem Arbeitsmittel für die im Sanierungsmarkt üblichen hohen Vorlauftemperaturen und Umgebungsluft als Wärmequelle gemäss den Spezifikationen im Abschnitt 2.3.3.

Dieser Punkt erhält **höchste Priorität**. Im Sanierungsmarkt von EFH, Reihen-EFH sind rund 40'000 Heizungseinheiten pro Jahr zu ersetzen. Heute erreicht die Wärmepumpe davon nur einen Anteil von ca. 2..3%. Ziel ist eine Steigerung des Wärmepumpenanteils am Sanierungsmarkt im Jahr 2000 auf 10%.

- Erproben und Verfeinern eines neuen Konzepts für ein effizientes und kostengünstiges **Wärmepumpenheizungssystem für Niedrigenergiehäuser** gemäss dem Abschnitt 2.5.1.3.
- Entwickeln und Erproben einer **Messmethode** zum Testen des dynamischen Verhaltens von Wärmepumpen gemäss dem Abschnitt 2.5.1.1.
- **Systemoptimierung:** Entwickeln einer **Kurztestmethode** für die Optimierung, die Abnahme und die Betriebskontrolle von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen gemäss dem Abschnitt 2.5.1.2, Ausarbeiten und Erproben einer neuen Regelstrategie mit Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpen.
- Entwickeln eines besonders **emissionsarmen Gasmagermotors** schweizerischer Produktion für Blockheizkraftwerke gemäss dem Abschnitt 2.4.2.

- Ausbauen und Verbessern der Werkzeuge zur Systemwahl, zur **Auslegung und zur Optimierung** von Heizungen mit Wärmepumpen oder Blockheizkraftwerken.
- **Abwärmenutzung:** Reduktion des Energiebedarfs industrieller Prozesse durch **Prozessintegration**. Entwickeln einer praktikableren Methode für Batch-Prozesse (Abschnitt 2.5.2.1), Überarbeiten des Handbuchs und des BEW-Kurses zur Prozessintegration (Abschnitt 2.5.2.2), Schliessen der Wissenslücken für die Anwendung der Prozessintegration in der komplexeren Haustechnik, Mitarbeit im *IEA Implementing Agreement on Process Integration* (Abschnitt 3.2.5, Einbringen des CH-Schwerpunktes „Umwelt und Nachhaltigkeit“).

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 besseren 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 **12. Mai 1998** an der Ingenieurschule Burgdorf **die fünfte öffentliche UAW-Tagung** mit dem Thema
**„Wärme-Kraft-Kopplung - heute und morgen,
Stand der Technik – Entwicklungsschwerpunkte“**

durch. Wir werden an dieser Tagung von ausgewiesenen Fachleuten Näheres zum Stand, den Möglichkeiten und den Grenzen sowie zu den Entwicklungstendenzen der wichtigsten Systeme der Wärme-Kraft-Kopplung von Kleinblockheizkraftwerken über Brennstoffzellen bis zum kombinierten Gas- und Dampfturbinenprozess erfahren.

Das Programm mit Anmeldeformular ist bei ENET zu beziehen.

6 QUELLEN

Die aufgeführten Jahres-, 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 Fax 031-352-77-56.*

6.1 Forschungsprojekte im Jahr 1997

- [1] P.von Böckh, HTL-MuttENZ: *Stiller Verdampfer für Luft/Wasser-Wärmepumpen*. (JB, ENET-Nr. 9721060)
- [2] A.Huber, HUBER ENERGIETECHNIK, Zürich: *Berechnungsmodul für Erdwärmesonden*. (SB, ENET-Nr. 9658807)
- [3] W. Leu, GEOFORM, Winterthur: *Geothermische Eigenschaften des Schweizer Molassebeckens*. (JB, ENET-Nr. 9723763)
- [4] W.P. Hässig, BASLER & HOFMANN, Zürich: *Regeneration von Erdwärmesonden, Phase 1*. (JB, ENET-Nr. 9722601)
- [5] O. Zürcher, LENI / EPF-Lausanne: *Evaporation de mélanges d'ammoniac et d'huile dans des tubes*. (JB, ENET-Nr. 9656540)
- [6] X.Pelet, D.Favrat, LENI/EPF-Lausanne & A.Vögeli, SULZER FRIOTHERM, Winterthur: *Performances of 3.9 MWth Ammonia Heat Pumps within a District Heating Cogeneration Power Plant - Status after eleven Years of Operation*. (SB, ENET-Nr. 9658908)
- [7] T.Boyman, Th.Schmid, HTL-Horw & A.Flück, NEK UMWELTTECHNIK, Zürich: *Kleinwärmepumpen mit Ammoniak - Phase 1: Thermodynamische Vor- und Nachteile gegenüber Propan und R407C*. (ZB, ENET-Nr. 9719746)
- [8] T.Boyman, Th.Schmid, HTL-Horw & A.Flück, NEK UMWELTTECHNIK, Zürich: *Kleinwärmepumpen mit Ammoniak - Phase 1: Thermodynamische Vor- und Nachteile gegenüber Propan und R407C*. (JB, ENET-Nr. 9719746)
- [9] E.Nidegger, D.Favrat, D.Reymond, M.Zehnder, LENI/EPF-Lausanne: *Pompe à chaleur biétagée à haute performance, phase 1*. (SB, ENET-Nr. 9400101)
- [10] M. Zehnder, LENI/EPFL-Lausanne: *Pompe à chaleur biétagée à haute performance, phase 2*. (JB, ENET-Nr. 9710478)
- [11] F. Kühnis und H.P. Eicher, EICHER+PAULI, Liestal & D.E. Maurer, AMMANN, Langenthal, *Betriebsüberwachung von Dreiwegekatalysatoren*. (SB, ENET-Nr. 9553311)
- [12] R.Röthlisberger, LENI / EPF-Lausanne: *Swiss Motor: Modification d'un moteur diesel pour le fonctionnement au gaz naturel en cogénération*. (JB, ENET 9553707)
- [13] P.-A. Jeandupeux, ETS-Le Locle: *Moteur à combustion externe*. (SB, ENET-Nr. 9553848)
- [14] Hp. Zumsteg, ÖKOZENTRUM, Langenbruck & E.T.Schönholzer, M. Hagen, HTL-Buchs: *Dynamischer Lastregler zu Stirling-Lineargenerator*. (SB, ENET-Nr.9555021)

- [15] B. Gubser, M. Ehrbar, HTL-Buchs: *Dynamischer Wärmepumpentest - Ergebnisse der Literaturrecherche*. (ZB, ENET-Nr. 9720132)
- [16] G.Reiner, SULZER FRIOTHERM, Rothenburg & E.Shafai, S.Ginsburg, R.Wimmer, IMRT/ETH-Zürich & H.R.Gabathuler, H.Mayer, GABATHULER, Diessenhofen & H.U.Bruderer, SAURER THERMOTECNIK, Arbon: *Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen - Phase 2: Messung, Modellierung und Validierung*. (ZB, ENET-Nr. 9657407)
- [17] G.Reiner, SULZER FRIOTHERM, Rothenburg: *Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen*. (JB, ENET-Nr. 9657407)
- [18] Th. Afjei, D. Wittwer, INFEL, Zürich & W. Betschart, M. Wetter, G. Zweifel, A.Glass, 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*. (ZB, ENET-Nr.9655701)
- [19] Th. Afjei, INFEL, Zürich: *Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe - Phase 2: Ökologischer und ökonomischer Vergleich, Systemoptimierung, intelligente Regelung, Versuche*. (JB, ENET-Nr.9655701)
- [20] P. Krummenacher, A. Auguste, LENI / EPF-Lausanne: *Intégration énergétique de procédés industriels discontinus*. (ZB, ENET-Nr. 9655360) und (JB, ENET-Nr. 9655360)
- [21] 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 BEW-Kurs "Energieplanung in Industrie und Haustechnik"* (ZB, ENET-Nr. 9658854)
- [22] P.Krummenacher, LENI/EPFL-Lausanne: *Direction du NT Suisse pour l'annexe 1 de l'IEA-IA on Process Integration*. (JB, ENET-Nr. 9554740)

JB	Jahresbericht, Bundesamt für Energiewirtschaft 1997
ZB	Zwischenbericht, Bundesamt für Energiewirtschaft 1997
SB	Schlussbericht, Bundesamt für Energiewirtschaft 1997

6.2 Weitere Referenzen

- [23] E.Niedegger, J.R.Thome, D.Favrat: *Flow Boiling and Pressure Drop Measurements for R134a/Oil-Mixtures*, International Journal of Heating, Ventilating, Air-Conditioning and Refrigerating Research, 3(97)1,38/65
- [24] Thome,J.R., Kattan, N., Favrat,D: *Evaporation in Microfin Tubes*; O.Zürcher, J.R.Thome, D.Favrat: *Prediction of two-phase flow patterns for evaporation of refri-*

- gerant R407C inside horizontal tubes*, Proceedings of the Convective Flow and Pool Boiling Conference II, Irsee BRD, 1977
- [25] M.Zürcher, J.R.Thome, D.Favrat: *Flow Boiling of Ammonia in Smooth and Enhanced Horizontal Tubes*, Preprints Workshop „Compression Systems with Natural Working Fluids“ of the IEA Annex 22 in Gatlinburg USA, October 1997
- [26] X.Pelet, D.Favrat, A.Vögeli: *Performance of 3.9 MW_{TH} Ammonia Heat Pumps within in a District Heating Cogeneration Power Plant, Status after eleven Years of Operation*, Preprints Workshop „Compression Systems with Natural Working Fluids“ of the IEA Annex 22 in Gatlinburg USA, October 1997
- [27] Ch. Trepp: *Heat Transfer of Supercritical Carbon dioxide in Tubes*, Preprints Workshop „Compression Systems with Natural Working Fluids“ of the IEA Annex 22 in Gatlinburg USA, October 1997
- [28] D.Favrat, E.Nidegger, D.Reymond: *Comparison between a single stage and a two stage air to water domestic heat pump with one variable speed compressor*, Preprints, IIR-Conference "Heat Pump Systems“, Linz 1997
- [29] B. Gerber und B. Jordi: *Prozesssimulation: Kleinabsorptionswärmepumpe*, Diplomarbeit, Labor für Verfahrenstechnik, Ingenieurschule Burgdorf 1997
- [30] R.Röthlisberger: Swiss Motor, *Modification d'un moteur diesel pour le fonctionnement au gaz naturel en cogénération*, Statusbericht, Bundesamt für Energiewirtschaft 1997
- [31] IIR-Workshop "*Heat pump Systems, Energy Efficiency and Global Warming*“ Linz, Preprints, International Institute of Refrigeration 1997
- [32] P.Krummenacher: *Process Integration Survey in Switzerland in the frame of the IEA Implementing Agreement on Process Integration*, Annex 1, Bundesamt für Energiewirtschaft 1997, ENET-Nr. 9554740/1
- [33] T. Pears: *End-User Survey*, IEA Implementing Agreement on Process Integration, Annex 1 / ea technology, Capenhurst GB 1997, ENET-Nr. 9554740/3
- [34] T. Gundersen: *A worldwide Catalogue on Process Integration*, IEA Implementing Agreement on Process Integration, Annex 1 / Telemark Institute of Technology, Porsgrun (N), 1997, ENET-Nr. 9554740/2
- [35] F.Rognon (Hrsg.): *Wärmepumpen und Blockheizkraftwerke: Von der Forschung in den Alltag*, Tagungsband zur 4.UAW-Tagung, Bundesamt für Energiewirtschaft 1997, ENET-Artikel 30550
- [36] M.Zogg: *Einführung in die Prozessintegration*, S.4/9, P.Krummenacher, R.Morand: *Energieoptimierung und Kältekonzept*, S.10/13, D.Diggelmann und R.Morand: *Energieoptimierung in der Projektierungsphase*, S.13/15, R.Jeanmonod, P.Krummenacher: *Intégration d'une installation d'oxydation par voie humide*, S.15/18, U.Haller: *Kosteneinsparung bei der Rückgewinnung von DMF*, S.25/26, P.Krummenacher: *Energetische*

Integration von Batch-Prozessen, S.27/33, D.Favrat: *Kooperationsvertrag zur Prozessintegration*, S.34/36, R.Bendel: *Prozessintegration auch für meinen Betrieb?*, S.37/38, Schweizer Ingenieur und Architekt, 115(97)38

- [37] Schweizerischer Fachverband für Wärme-Kraft-Kopplung: *Wärme-Kraft-Kopplung - die kombinierte Erzeugung von Wärme und Strom*, Liestal 1997.(ISBN 3-9521007)
- [38] M.Zogg: *Einführung in die Prozessintegration*, Schweizer Ingenieur und Architekt, 115(97)38, 4/9. ENET-Nr.6100005/10
- [39] M.Zogg: *Konzept 1996/1999 für das F+E-Programm „Umgebungs- und Abwärmenutzung, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW)“*, Bundesamt für Energiewirtschaft 1995, ENET-Artikel 30398 (gratis, solange vorrätig)
- [40] M.Zogg: *Jahresübersicht 1995 zum Forschungsprogramm „Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW)“* - ausführliche Fassung, Bundesamt für Energiewirtschaft 1996, ENET-Artikel 30397 (gratis, solange vorrätig)
- [41] M.Zogg: *Jahresübersicht 1996 zum Forschungsprogramm „Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW)“* - ausführliche Fassung, Bundesamt für Energiewirtschaft 1997, ENET-Artikel 30593 (gratis, solange vorrätig)

6.3 Internet-Links

- [WWW 1] <http://www.iea.org/homechoi.htm>
IEA International Energy Agency: **allgemeine Informationen zu IEA.**
- [WWW 2] <http://www.eetic.org>
<http://www.iea.org/impagr/imporg/enetec/caddet.htm>
CADDET, IEA Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies: **allgemeine Information.**
- [WWW 3] <http://www.caddet-ee.org>
CADDET, IEA Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies: **rationeller Energieeinsatz.**
- [WWW 4] <http://www.caddet.co.uk>
CADDET, IEA Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies: **erneuerbare Energien, Bestellen von Berichten.**
- [WWW 5] <http://www.fiz-karlsruhe.de/peu/izw>
IZW Informationszentrum Wärmepumpen+Kältetechnik, Fachinformationszentrum Karlsruhe: **Aktivitäten in Deutschland und in der EU.**
- [WWW 6] <http://www.heatpumpcentre.org>
Heat Pump Centre, Annex 16 des IEA Heat Pump Programme:
Informationen und Berichte zu allen IEA-Wärmepumpenprojekten.
- [WWW 7] <http://www.waermepumpe.ch>
Swiss National Team des Heat Pump Centre: **Informationen über Wärmepum-**

- pen, Forschung, Entwicklung und Markt in der Schweiz, Links zu weiteren Informationsquellen über Wärmepumpen.
- [WWW 8] <http://www.termo.unit.no/kkt/annex22>
Annex 22 des IEA Heat Pump Programme: **natürliche Arbeitsmittel für Kompressionswärmepumpen.**
- [WWW 9] <http://www.cordis.lu>
Allgemeiner Zugang zu den EU-Forschungsprojekten.
- [WWW 10] www.cordis.lu/cordis/cord_db.html
Zugriff auf die Datenbank der EU-Forschungsprojekte.
- [WWW 11] <http://europa.eu.int/en/comm/dg12/joule1.html>
http://apollo.cordis.lu/cordis-cgi/srchidadb?CALLER=JOULE_THERMIE
EU-Forschungsprojekte im Bereich nicht-nuklearer Energien.
- [WWW 12] <http://europa.eu.int/en/comm/dg17/thermie.htm>
<http://apollo.cordis.lu/cordis-cgi/srchidadb?CALLER=THERMIE>
EU-Pilot- und Demonstrationsprojekte im Bereich nicht-nuklearer Energien.
- [WWW 13] <http://www.svk.ch>
Schweizerischer Verein für Kältetechnik.
- [WWW 14] <http://www.iifir.org>
International Institute of Refrigeration.
- [WWW 15] <http://www.wpz.ch>
WPZ, Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrums Töss: allgemeine Informationen und Testberichte.
- [WWW 16] <http://www.iea.org/impagr/effene/a32proc.htm>
Homepage des IEA Implementing Agreement on Process Integration.
- [WWW 17] <http://www.mech.canterbury.ac.nz/docs/assignment/pinch.htm>
Einführung in die Pinch-Methode.
- [WWW 18] <http://telemann.ltt.rwth-aachen.de/~roosen/papers/chemeng-96/node4.html>
Einführung in die Pinch-Methode.
- [WWW 19] <http://dutw239.wbmt.tudelft.nl/PItools/tools.html>
Umfassende Übersicht zur Software für die Prozessintegration.
- [WWW 20] <http://www.admin.ch/bew>
Bundesamt für Energiewirtschaft.

7 ANHANG 1: PFLICHTENHEFT SWISS RETROFIT HEAT PUMP

Modifizierte Fassung vom 6.Sept.1997

1. **Wärmequelle** Luft. Folgende Möglichkeiten werden zugelassen:
 - Innenaufstellung mit Luftkanälen in und aus dem Gebäude,
 - Aussenaufstellung,
 - Splitausführung mit hermetischer Wärmepumpe.
2. **Optimaler Betrieb** mit Vorlauftemperaturen bis 60°C. Vollständige Deckung des Wärmeleistungsbedarfs bei einer Auslegungstemperatur von -12°C ohne separate Zusatzaggregate.

Phase 1 einstufiger Prozess;

Phase 2 zweistufiger Prozess mit zwei Verdichtergrößen. Wenn möglich Motoren mit zwei Drehzahlen verwenden, Lorenzprozess und druckgeregeltes elektronisches Expansionsventil.

3. **Warmwasserbereitung** auf wählbare Temperaturen von 45°C bis 55°C ohne Zusatzaggregate. Der Warmwasserboiler wird in den primären technischen Speicher integriert. Die gültigen hygienischen Standards sind gegebenenfalls durch eine Legionellenschaltung zu garantieren.
4. Es dürfen nur **natürliche Kältemittel** (wie Alkane, Alkene, Ammoniak, CO₂ usw.) verwendet werden.

Um die Exportchancen nicht einzuschränken, sind die Komponenten so zu wählen, dass die Wärmepumpe auch in einer Variante für FKW-Kältemittel (wie R407C oder R410A) angeboten werden kann.

Falls die FKW-Lösung zeitlich vorgezogen wird, ist diese so zu gestalten, dass ein späterer Explosionsschutz problemlos möglich ist. Der Kältemittelinhalt ist in jedem Fall möglichst gering zu halten.

5. **Modularer Aufbau**

Die neue Wärmepumpe ist aus möglichst wenig kompakten **Einheiten** mit eigenen Gehäusen (Bausteine) aufzubauen, die leicht zusammengefügt und zu einem Gesamttaggregat verbunden werden können. Die Einheiten müssen ohne Demontage durch Türen mit einer freien Breite von 750 mm eingebracht werden können.

Mögliche Einheiten sind:

- **Wärmepumpeneinheit** mit ein bis drei identischen Wärmepumpenmodulen, Kondensator, Steuerung, Ventilen und Umwälzpumpe(n),
 - **Boiler/Speichereinheit** mit technischem Speicher und integriertem Warmwasserboiler,
 - **Zusatzspeichereinheit** (optional, wenn mehr Speichervolumen erforderlich) und
 - **Verdampfeinheit** mit Ventilator (diese kann auch getrennt im Freien angeordnet werden).
- Eine separate **Solarspeichereinheit** wird zugelassen.

6. **Baureihe**

Das Hauptmarktsegment im Wärmeleistungsbedarfsbereich von 5 kW bis 30 kW (inklusive Warmwasserbereitung) muss bei einer Aussentemperatur von -12°C und einer Vorlauftemperatur von 60 °C durch ein Aggregat mit identischen **Wärmepumpenmodulen** abgedeckt werden. Der Bau eines einzigen, effizienten Wärmepumpenmoduls in hoher Stückzahl soll zu entsprechenden Kosteneinsparungen führen.

Speicher und Steuerung müssen optional für die **Warmwasserbereitung mit Sonnenkollektoren** angeboten werden.

7. **Übergeordnete Regelung** für alle Einheiten (Wärmepumpe, technischer Speicher, integrierte Warmwasserbereitung mit Vorrangschaltung und optionaler Kollektorkreislauf) mit den Zielen:

- eines **optimalen Betriebs** bei mehreren Wärmepumpenmodulen für eine hohe Jahresarbeitszahl und ein geringes Speichervolumen (möglichst modellbasierte Regelung mit Pulsbreitenmodulation und Führen elektronischer Expansionsventile;
- **minimaler Abtauverluste** (nur wenn nötig und mit intelligenter Prozessführung);

- bei der **Solarvariante** einer optimalen Zuschaltung des Kollektorsystems;
 - einer einfachen **Überwachung des Systems** (Jahresbedarf an elektrischer Energie, Jahreslaufzeit, Anzahl Einschaltungen, Laufzeitanteil im Nieder- und Hochtemperaturbereich, Vor- und Rücklauftemperatur als $f(T_{\text{Aussen}})$) und später einem Stecker für Messungen nach der Kurztestmethode;
 - einer Erfassung („**lernende Steuerung**“) und optimalen Berücksichtigung
 - . von Sperrzeiten des EW,
 - . des dynamischen Verhaltens des Gebäudes und des Wärmeverteilsystems,
 - . des Benützerhaltens und
 - . des Wettergeschehens (z.B. über eine einfache Druckmessung).
8. Hohe **Exergetische Wirkungsgrade** (mit Quell- und Senkenbedingungen nach EN255) gemäss der Tabelle 2 im Abschnitt 2.3.3 und hohe Jahresarbeitszahlen.
 9. **Betriebsgrenzen**: Die vollständige Deckung des Wärmebedarfs muss bis zu einer minimalen Aussentemperatur von -12°C möglich sein. Stillstand ohne Schaden bis -30°C .
 10. **Tiefer Preis**: Der Ersatz alter Kesselheizungen muss wirtschaftlich tragbar sein.

Der Hersteller des Serieprodukts muss bereits an der Entwicklung des Funktionsmusters beteiligt sein.
 11. **Qualitätsmerkmale**: Lebensdauer der Wärmepumpe mindestens 15 Jahre. Die neue Wärmepumpe muss den Bedingungen für das FWS-Gütesiegel entsprechen und wartungsfrei sein. Entlüftungs-, Entleerungs- und Füllarmaturen müssen leicht zugänglich sein.
 12. **Geringe Schalleistung**: innen $\leq 55 \text{ dB(A)}$, aussen $\leq 55 \text{ dB(A)}$. Die Körperschalldämmung hat durch schwingungsdämpfende Lagerung nach dem Stand der Technik zu erfolgen.
 13. **Verträglichkeit mit den Vorschriften**: Die neue Wärmepumpe muss die neuesten Richtlinien, Normen und gesetzlichen Vorschriften für die Schweiz, Deutschland, Österreich und Frankreich erfüllen.
 14. **Zeitrahmen**: Ein Funktionsmuster der neuen Wärmepumpe muss innert zwei Jahren nach Projektstart ausgemessen sein.

8 ANHANG 2: IIR-WÄRMEPUMPENKONFERENZ 1997

International Institute of Refrigeration (IIR):
Heat Pump Systems, Energy Efficiency and Global Warming
in Linz vom 29.Sept.-1.Okt. 1997

Stichwortartiger Führer zu den Tagungsunterlagen [31]

Umweltprobleme

- Die **Umweltrelevanz der FCKW** wird bezweifelt: Die Vulkane in der Südhemisphäre haben mehr Chlorverbindungen produziert als die Menschheit durch Kältemittel. Zwischen der Nord- und der Südhalbkugel findet fast kein Luftaustausch statt. Das beängstigende Ozonloch liegt aber über dem Südpol [Steimle].
- **China** wird bald mehr Wärmepumpen produzieren als Japan.
- **Welteinsparpotential an CO₂** durch Wärmepumpen: 6% [Halozan].
- **EU** hat im Mittel 5.4% **erneuerbare Energien** (A 24.3%, D 1.8%). Die Stromproduktion erfolgt in der EU zu 14.5% (13.2% Hydro) aus erneuerbarer Energie (A 70%, BRD 5.5%).
- EU-Vorschlag 1997 für Kyoto: **CO₂ -15%** bis 2010 (Basis 1990).

Wärmequellen

- **Erdkollektoren** in Frankreich. Nichts Neues -> [Bernier 192].

Kältemittel

Alternative

- [Kazachki 28]
R22-Ersatz - alternative Kältemittel und Propan/Zyklopropan, COP Fig.1. Relative Kosten (Bezug auf R22) für 7/50°C und 7/65°C Fig 3. Beste Wahl R410A bis 55°C; R407C bis 65°C Kondensationstemperatur.
- [Maczek 36]
R22-Ersatz: Vergleich R410A und R407C in gleicher Versuchsmaschine Zusammensetzungsänderung bei R407C entlang des Kreislaufs: (Bild nicht im Skript). Kein Vergleich mit Phasengleichgewichtsrechnungen (mit Schmieröl als Komponente!).
- [König Solvay 64]
R22-Ersatz: R410A, R407C, R290. Dampfdruckkurven Fig.1. Auch NH₃: COP wie R22, Apparatvolumen 94%. Ab 45°C mit zweistufiger Kompression, aber COP besser (bis 10% bei 60°C). R290, R410A und R407 ergeben etwa gleiche COP-Werte wie R22. Bei R410A besteht noch erhebliches Verbesserungspotential.
- [Kzachki 76]
Alternative Kältemittel für **hohe Temperaturen:** 7/80°C, 20/100°C, 30/120°C. Klassifikation nach Steigung der l-g-Linie im T-s-Diagramm (Kappa). Gesamtkostenvergleich mit Investitionskosten-Annahme 110 USD/cm³ Verdrängungsvolumen des Kolbenkompressors. Beste Wahl: bis 80°C: Bin-X, R407D, R134a. Bis 100°C: R134a. Bin-Z bis 120°C (+andere).
- [Hewitt 90]
R114-Ersatz für **hohe Temperaturen:** R227ea (EU-Projekt). Einfluss der Löslichkeit und Zirkulation des Schmiermittels auf die Verdampfung in Plattenapparat. Experimente wenig theoretischer Hintergrund.

Natürliche Kältemittel - CO₂

- [Süss 124]
Konstruktions- und Auslegungskriterien: 100..150 bar, kleine Druckverhältnisse im Bereich 2..4. Untersuchung der Prinzipien Hubkoben, Taumelscheibenkolben, Rotationskammer. Probleme mit Schmiermitteln. Hauptvorteile: hohe Kompressorwirkungsgrade (wegen hoher Dichte und kleinem

Druckverhältnis). Die hohe Temperaturdifferenz auf der warmen Seite ist z.B. für die Warmwasserbereitung vorteilhaft – für die Raumheizung aber ein erheblicher Nachteil.

Warmwasserbereitung (interessant!)

- [Kasper 210]
Auslegung einer WP zur Warmwasserbereitung mit CO₂ als Kältemittel (Lorentzen-Zyklus). Doppelrohrwärmeübertrager mit strukturierten Cu-Rohren (Institut Halozan).
- [Neksa 218]
Prototyp zur Warmwasserbereitung. T-s-Diagramm Fig.1. Fließbild Funktionsmuster Fig.2. Gemessener COP bei 0°C Verdampfungstemp. und 60°C Warmwassertemp. (bei 10°C Eintritt) 4.25. Für 80°C noch 3.6. Gründe für die guten Ergebnisse: Lorentzen-Prozess, hoher Kompressorwirkungsgrad (hohe Dichte, Druckverhältnis nur ca. 2..3) (SINTEF N).
- Siehe auch [Rieberer 184].

Raumheizung (problematisch)

- [Enkemann 140]
CO₂-Sanierungswärmepumpe: konventionelles 70/50°C (bei -15°C; Abhängigkeit von T_a in Fig.3) muss mit 90/40°C betrieben werden (Reduktion des Massenstroms – wie wird die nötige Wärmestromverteilung auf die einzelnen Räume aufrecht erhalten??). Für dieses 90/40°C-System ergaben Kreislaufberechnungen etwa folgende COP-Werte (siehe Fig.5): 1.5 bei T_a = -15°C, 2,5 bei T_a = 0°C und 4 bei T_a = 15°C. Ein Funktionsmuster wird gebaut – es liegen noch keine Versuchsergebnisse vor. Ausser der Unbrennbarkeit des CO₂ springen keine Vorteile ins Auge.

Kompressionswärmepumpen

- [Favrat 132]
Zweistufige Kompressionswärmepumpe für Sanierungsmarkt -> UAW-Projekt. Siehe Zusammenfassung M.Zogg zum Schlussbericht.
- **Firmenbesichtigung bei der Firma Neuratherm** am Nachmittag des 970930, Technische Anlagen, A4844 Regau 13.

Propanwärmepumpe mit R290-Direktverdampfung in firmengefülltem Erdregister. Ca. 300 Stück pro Jahr. Aussenauflistung. Näheres siehe Prospektsammlung. Sicherheitsauflagen WP970928.
Diskussion: Gefälle bis 6 m realisierbar. WP läuft zur Entfernung von Restöl aus dem Register beim Start und alle 2 Stunden mit höherer Drehzahl. Diskussion: Heliotherm realisiert auch Erdwärmesonden. 50 m Tiefe (mehr in A aus gesetzlichen Gründen kaum möglich). U-Rohrsonde mit kleinerem Querschnitt im Aufstieg. Ölproblem offenbar lösbar.

Computersimulation

Siehe Systemuntersuchungen

Anwendungen

Warmwasserbereitung
Siehe Kältemittel, CO₂

Trocknung mit Wärmepumpen

- Diskussion: **AEG-WP-Tumbler:** WP-Tumbler von AEG ist im Markt erhältlich. Ein neues Aggregat ist in Entwicklung.
- [Zakeri 234]
WP-Andwendung beim **Gefriertrocknen.**

- [Bannister 148, 156]
Holz Trocknung in Kammertrocknern (Neuseeland). Nutzen der WP auf der kalten Seite (Entfeuchten) und auf der warmen Seite (Erhitzen der Trocknungsluft).

Alternative Prozesse

- [Steimle 226]
Stirling-Kühlsystem. Idealer/realer Prozess (inkl. T-s-Diagramme). Gute Analyse des realen Prozesses. Exergetische Gütegrade: Fig. 7. Keine Wunder zu erwarten. Exergetischer Wirkungsgrad nur 0.13 bei -20°C .. 0.3 bei -60°C. -> **Wie längst bekannt: Stirlingprozess für WP vergessen!** Interessant für Kühlung unter 50°C. Dort auch kommerziell längst realisiert (Phillips-Luftverflüssiger!).

Absorptionswärmepumpen

- [Gustafsson 100]
Marktsituation in Schweden: 28 Einheiten, 124 MW Abwärmenutzung (120..150°C), Trends (Fernheizung, Prozesskühlung, Fernkühlung). Schweden hat ein dichtes Fernwärmenetz mit total 9000 km Länge.
- [Bangheri 108]
Heliotherm-Absorptionswärmepumpe. Hauptmarkt E 10..20 kW. WP-Modus bis -4/55°C. Künftig auch als Solarkühlaggregat gedacht. Sonst keine Neuigkeiten. Diskussion: Wärmeverhältnis von 1.5 ohne GAX wird bezweifelt.

Wärmepumpensysteme

Konventionelle Systeme

- [Jonsson 174]
EU-Projekt, Schweden (Granryd, **Computersimulationen für Gesamtsystem** einschliesslich dem Gebäude) für Raumheizung/Raumkühlung/Warmwasserbereitung. Heizmodus: JAZ für Wärmeverteilsystem mit hoher Wärmekapazität ist deutlich höher als für Systeme mit tiefer Wärmekapazität.
- [Bernier 192]
(Président de la Commission Thermopompes AFF/ADPM) **Erdwärmelösungen** in Frankreich: Erdkollektoren mit Direktverdampfung und Fussbodenheizung mit Direktkondensation. Gesamtsysteme mit Haus - nicht nur WP - betrachten. Für uns nicht viel Neues. Nebenbei: EDV will offenbar vier F-Firmen mit der Entwicklung neuer WP beauftragen.
- [Atzgerstorfer 260]
Biomasse (Holzverbrennung) und Wärmepumpen für die Bandlast (Institut Halozan).

Niedrigenergiehäuser

- [Afjei 166]
Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung -> siehe SB Phase 1, Zusammenfassung M.Zogg.
- [Rieberer 184]
CO₂-Wärmepumpensystem mit Ventilationsluft als Wärmequelle und als Wärmeverteilmedium. (Institut Halozan, Graz, EU-Projekt). Gesamtwärmezufuhr nur über Ventilationsluft möglich? Anlagenflussbild: Fig.5. Unterkritischer CO₂-WP-Prozess (tiefe Temperaturen). Vorwärmung der Luft durch Erdregister (ein Rohr um ganzes Haus Fig.9) und Wärmerückgewinnung aus der Abluft. Enderwärmung durch die WP. Computerrechnungen ergeben sehr hohe COP-Werte. Funktionsmuster wird ausgelegt. Kühlung im Sommer ebenfalls "im Visier". Transkritischer Prozess für Warmwasserbereitung soll JAZ bis 9 erreichen. Die phantastischen Zahlen für CO₂-Systeme sind nicht einleuchtend. Warten wir Messungen an ersten Funktionsmustern ab..!

- [Osendorf 1]
NL-Systemanalyse. Fig.4: Unterschiede COP/JAZ des Systems enorm! Systemuntersuchungen: Anforderungen an Wärmeverteilsystem Ab.4 (nichts Neues).
- [Narita 10]
Vergleich diverser WP-Systeme für die Fernwärmeversorgung in **Japan** (wesentlicher Kühlungsanteil!).
- [Favrat 16]
Ökonomisch, thermodynamische und ökologische **Optimierung von Fernwärmesystemen** mit Wärmepumpen kombiniert mit WKK. Internalisierung externer Kosten. Ergebnisse als f(Elektrizitätskosten, Gaskosten) für CH-Strommix S.21. Berücksichtigung Umweltbelastung -> WP (WKK nur bei tiefen Energiekosten).

Wärmepumpenmarkt

- **Österreich** habe derzeit 130'000 WP (grösstenteils Warmwasserbereitung) mit einer **totalen Umweltenergienutzung von 880 GWh.**
- In **Österreich** sind **3 wesentliche WP-Hersteller** übrig geblieben: Neuratherm, Ochsner und Heliotherm. Produktion je ca. 300 WP. Der Rest wird aus der BRD importiert [Diskussion].
- Steimle: **Verhältnis Wärmepumpen pro Einwohner:** Schweiz 1:70, Österreich 1:50 (viel WW!), USA 1:20. Bedeutung der Kältetechnik: Der weltweite Umsatz der Kälteindustrie entspricht etwa jenem der Autoindustrie! Die Kältetechnik trägt wesentlich zur Deckung der Grundbedürfnisse der Menschheit bei: Nahrung, Gesundheit, Wohnen, Energie und Transport. 50% der Lebensmittel verdirbt auf den Transportwegen.
- Wenn WP auch in Europa Erfolg haben sollen, ist nicht nur nationale, sondern **europäische Zusammenarbeit gefragt.**

Wärmepumpenförderung

- In **Österreich** offenbar nur durch die Elektrizitätswerke.
- [Zeinhofer 252]
Marktbearbeitung: **Ziel Oberösterreichische Kraftwerke: 25% Marktanteil bei Neubauten.** Konsumentenumfrage: Hauptvorteil -> Umweltschonung; Hauptnachteil -> hohe Investitionskosten. Installateure, die sich auf WP spezialisiert haben, werden engagiert.
- [Hohle 246]
Erfahrung mit zwei **Contracting-Modellen für Kleinüberbauungen.** Hauptprinzip ist die Übernahme des Risikos und der Anfangsinvestition.

[nnn S] Referenz zum Tagungsband [31] mit Name des erstgenannten Autors (nnn) und der ersten Seite (S).
--