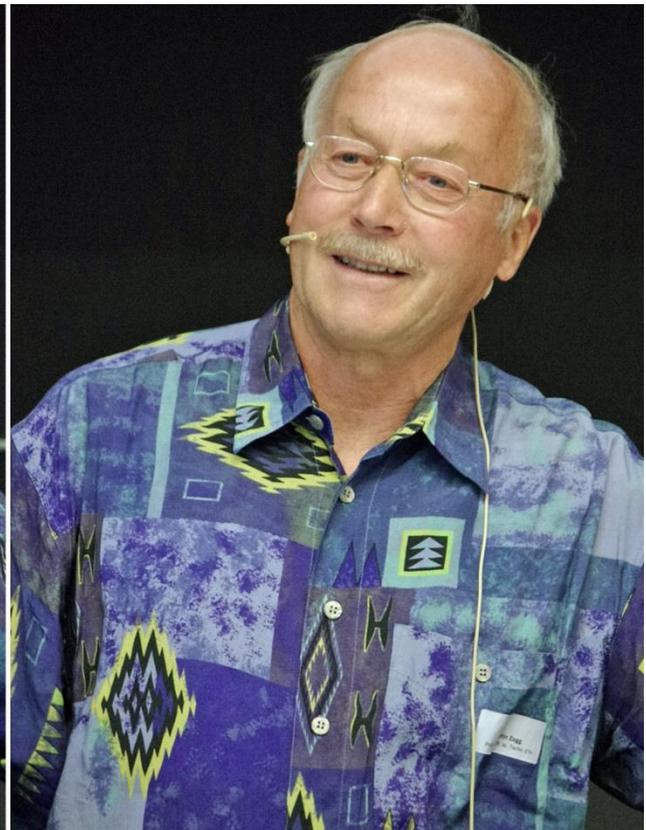
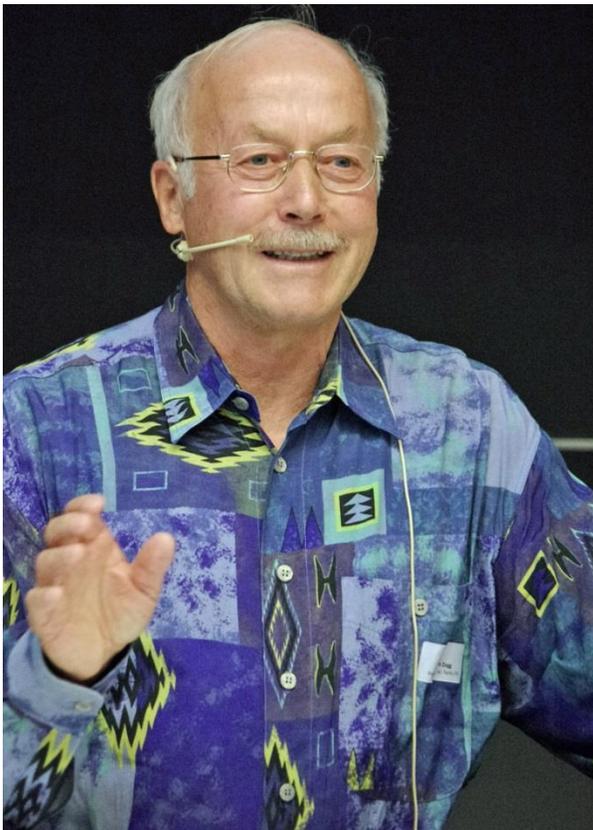


Jubiläumsvortrag von Martin Zogg

20 Jahre Wärmepumpentagung und Wärmepumpenentwicklung

zur zwanzigsten Tagung des
Forschungsprogramms Wärmepumpen und Kälte
des Schweizerischen Bundesamts für Energie BFE
vom 25. Juni 2014

an der Hochschule für Technik und Informatik
der Berner Fachhochschule in Burgdorf



Martin Zogg, Prof. em., Dr. sc. techn. ETHZ
Leiter des Forschungsprogramms
„Umgebungswärme-, Abwärme und Wärme-Kraft-Kopplung“
des Bundesamts für Energie von 1993 bis 2002
Kirchstutz 3
CH-3414 Oberburg
mazo@zogg-engineering.ch
www.zogg-engineering.ch

20 Jahre Wärmepumpentagung und Wärmepumpenentwicklung

Zusammenfassung

Der grosse Erfolg der Wärmepumpenheiztechnik in den vergangenen 20 Jahren hat viele Gründe. Die Fortschritte in Forschung und Entwicklung haben dazu wesentlich beigetragen. Eingangs werden einige Meilensteine der jährlichen Wärmepumpentagung des Bundesamts für Energie gewürdigt. Anschliessend werden ausgewählte Forschungs- und Entwicklungsergebnisse aus den Jahren 1992 bis 2014 zu den Themen Effizienzfortschritte, hohe Temperaturhübe, variable Heizleistung, Niedrigtemperatursysteme, Kompressoren, Arbeitsmittel, Luftkühler, Erdwärmesonden, Abwasser als Wärmequelle, Feldanalyse, hydraulische Einbindung, Wärmepumpentest, Regelung, Fernbedienung, Fehlerdiagnose, Contracting und Qualitätssicherung aufgezeigt. Dieser Teil ist eine Ergänzung der umfassenden Wärmepumpengeschichte des Autors [1] bis in die Gegenwart. Er soll als Wegweiser zu den einzelnen Tagungsbänden 1992 bis 2013 dienen.

Abstract

The great success of the heat pump heating technology in the past 20 years has many reasons. The progress in research and development has contributed considerably. At the beginning some milestones of the annual heat pump conference of the Federal Office of Energy are recollected. Subsequently, selected results of research and development from the years 1992 until 2014 on the topics of energy efficiency progress, high temperature lift, variable heat output, low temperature systems, compressors, refrigerants, air coolers, geothermal probes, waste water as a heat source, field analysis, hydraulic embedding, heat pump test, control, remote control, fault diagnosis, contracting and quality control are presented. This part is an extension of the comprehensive heat pump history of the author [1] to the present. It should serve as a guide to the various conference proceedings from 1992 until 2013.

Der Beitrag der Wärmepumpe zur deutlich höheren Effizienz gegenüber Heizkesseln und damit zur wesentlichen Brennstoffeinsparung bei der Wärmeerzeugung wird oft verkannt, weil der zweite Hauptsatz der Thermodynamik nicht verstanden wird. Die Kombination von Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen oder von Kombikraftwerken mit Wärmepumpen ermöglichte bereits beim Stand der Technik vor 20 Jahren Nutzungsgrade über 150% {Zogg 1995}. Heute sind Brennstoffnutzungsgrade um 200% durchaus möglich. Ein auch noch so moderner Kessel kommt nicht einmal auf 100%!

Trotz höherer Investitionskosten hat sich deshalb die Wärmepumpenheizung in den vergangenen zwanzig Jahren erfreulich entwickelt. Heute werden pro Jahr mehr Wärmepumpen installiert als Oelkessel. Mit rund 19'000 Wärmepumpen pro Jahr sind es etwa gleich viele wie Gaskessel. Bei neuen Einfamilienhäusern ist der Anteil an Wärmepumpenheizung von etwa 15% im Jahr 1992 auf heute gegen 80% gestiegen. Eine beeindruckende Erfolgsgeschichte.

Geschichte der BFE-Wärmepumpentagung

Einen kleinen Beitrag zu diesem Erfolg haben auch die Wärmepumpentagungen des BFE geleistet. Sie orientiert Fachleute und technisch interessierte Anwender umfassend über Fortschritte in Forschung, Entwicklung und Anwendung der Wärmepumpentechnik in der Schweiz. Regelmässige Berichte aus den Beteiligungen der Schweiz an internationalen Projekten und Gastreferenten aus dem Ausland vermitteln auch ein gutes Bild über das internationale Geschehen.

Die **erste Schweizerische Wärmepumpenkonferenz** fand **1992** unter der Leitung von Professor P. Suter an der **ETH Zürich** statt. Sie stand unter dem Titel *Wärmepumpen und WKK - Integration komplexer Haustechnik in Gebäuden*. Da der weit überwiegende Teil von Wärmepumpen mit elektrischem Strom betrieben wird, umfasste das damalige Forschungs- und Entwicklungsprogramm des Bundesamts für Energie (es hiess damals Bundesamt für Energiewirtschaft) richtigerweise auch die Wärme-Kraft-Kopplung.

1992 hat mich der BFE-Forschungsprogrammleiter, Dr. G. Schriber, zur Entlastung meines Vorgängers, H.U. Schärer, für die Leitung des BFE-Forschungsprogramms *Umgebungswärme, Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung* engagiert. F. Rognon übernahm die Pilot- und Demonstrationsprojekte. Da „mein“ Forschungsprogramm nebst der Umgebungswärmenutzung mit Wärmepumpen und der Wärme-Kraft-Kopplung auch die Abwärmenutzung umfasste, gab ich den folgenden Tagungen den Namen **UAW-Tagung**. UAW steht für *Umgebungswärme, Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung*. Deshalb findet man die Tagungsbände von 1995 bis 2002 unter der Bezeichnung *UAW-Tagung*.

1995 organisierte ich die **zweite UAW-Tagung an der ETH Zürich** unter dem Titel *Heizungssysteme mit Wärmepumpen und Blockheizkraftwerken: Planungs- und Optimierungsmethoden*. Es gab 6 Vorträge mit folgendem Inhalt: Berechnungsprogramme für Wärmepumpen und WKK-Anlagen (T. Baumgartner, M. Stalder), Computersimulation für Wärmepumpenanlagen mit Holzkessel zur Spitzendeckung (Th. Afjei), Fernüberwachung zur Störungsdiagnose, Zustandsvorhersage und Betriebsoptimierung (D.E. Maurer, P. Neuenschwander), Pinchmethode zur thermischen Prozessintegration (D. Favrat, F. Staine) sowie eine Vorstellung und Diskussion der geplanten Forschungsvorhaben bis 1999 (M. Zogg). Der bescheidene Tagungsband umfasste 45 Seiten. Wir fühlten uns mit ungefähr 150 Teilnehmern etwas verloren im Auditorium-Maximum mit 430 Plätzen. Beim Mittagessen in der grossen Mensa sassen wir verstreut unter Studenten. Es hätte ein Fernglas gebraucht, um entferntere Kollegen noch zu erkennen...

Das eben neu gebaute Auditorium an der **Ingenieurschule Burgdorf** (diese wurde 1997 Teil der Berner Fachhochschule) animierte mich deshalb zu einem Versuch, die „Wärmepumpenfamilie“ für die nächste Tagung auf unseren ruhig gelegenen „Tech-Hügel“ einzuladen. Liegt doch Burgdorf im „technischen“ Mittelpunkt der Schweiz: Ein SBB-Ticket von Burgdorf nach Zürich oder nach Lausanne kostet exakt gleich viel. Ein Haupthindernis war vorerst allerdings das Mittagessen. Die Schulkantine ist zu klein und das Hotel Stadthaus zu weit entfernt. Bei der Einweihung meines neuen Labors für Verfahrenstechnik lernte ich den katholischen Pfarrer von der gegenüberliegenden Kirche kennen. Nun suchte ich ihn auf

und trug ihm meine Idee vor, das katholische Kirchgemeindehaus für das Mittagessen der UAW-Tagung zu missbrauchen. Er hat mich freundlich empfangen, zeigte grosses Interesse an der Wärmepumpenidee und empfahl mein Anliegen der katholischen Kirchgemeinde. Diese gab mir zu meinem weltlichen Ansinnen nach wenigen Gesprächen grünes Licht. Nun musste ich den Küchenchef, U. Schenk, von meinem Vorhaben überzeugen. Er zeigte sich mit seiner „Frauschaft“ sehr kooperativ. So konnte ich für die **dritte UAW Tagung 1996 erstmals** an die **Ingenieurschule Burgdorf** einladen. Das Experiment war gelungen. Seither trifft sich die Wärmepumpenfamilie alljährlich in Burgdorf (einzige Ausnahme im 2008) und fühlt sich hier offensichtlich wohl: Bild 1.



Bild 1: Jährliche Wärmepumpentagung des BFE ab 1995 in Burgdorf (bis 2002 „UAW-Tagung“)

Im Januar 2003 übergab ich die Leitung des Forschungsprogramms aus zeitlichen Gründen an Th. Kopp. Der Teil Abwärmenutzung wurde gestrichen; dafür wurde die andere Seite der Wärmepumpe, die Kältetechnik, ins Programm aufgenommen. Die Kältemaschine ist ja auch eine Wärmepumpe – nur nutzt man bei ihr die kalte Seite. So wurde unsere UAW-Tagung offiziell zur *Tagung des Forschungsprogramms Wärmepumpen und Kälte des Bundesamts für Energie*.

Es freut mich natürlich, dass die BFE-Wärmepumpentagung immer noch jährlich in Burgdorf stattfindet. Der Berner Fachhochschule danke ich bei dieser Gelegenheit für die Benützung des Auditoriums, der katholischen Kirchgemeinde für die grosszügige Gastfreundschaft, U. Schenk und dem Kantinenpersonal für die mit Bravour bewältigte Verpflegung der Tagungsbesucher. Ein besonderer Dank gebührt auch den Tagungsorganisatorinnen/Organisatoren: Frau B. Soravia und Frau L. Boppart (damalige Tagungsleiterinnen von ENET, Bern) und J. Wellstein von Wellstein Kommunikation, Basel, sowie der Administration der Fachvereinigung Wärmepumpen FWS, Bern.

Ab 1999 informiert das BFE-Forschungsprogramm auch über das Internet. Bis 2009 betrieb es eine **eigene Website**. 2009 wurde sie in die BFE-Website integriert und ist nun unter www.bfe.admin.ch/forschungwkk/index.html?lang=de zu finden.

Ausgewählte Forschungs- und Entwicklungsergebnisse seit 1992

Die wesentlichen Entwicklungen in der Wärmepumpentechnik waren zur Zeit unserer ersten Wärmepumpentagung bereits erfolgt. Ich habe sie in einer ausführlichen Geschichte der Wärmepumpentechnik beschrieben [1]. Diese enthält die wesentlichen Entwicklungen bis 2008 und wurde 2009 auch in gedruckter Form herausgegeben.

Die Entwicklungsschwerpunkte lagen in den vergangenen zwanzig Jahren bei der Bewältigung höherer Temperaturhübe, der Systemoptimierung und der Erhöhung der Verlässlichkeit. Die technische Weiterentwicklung wurde auch durch die eindrucksvollen Fortschritte der Informatik begünstigt. Die Wärmepumpen wurden kostengünstiger, effizienter und verlässlicher. Die Wärmepumpentechnologie wurde nicht nur durch nationale und internationale Anstrengungen in Forschung und Entwicklung sondern auch durch Qualitätssicherung und gemeinsamem Marktauftritt (www.fws.ch) gefördert.

Ein erhebliches Hindernis durch den raschen Ersatz chlorhaltiger, ozonschichtgefährdender synthetischer Arbeitsmittel (FCK, HFCK) durch teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (FKW) und natürliche Arbeitsmittel konnte zu Beginn der Berichtsperiode bewältigt werden.

Wesentliche Prozessverbesserungen wurden in den vergangenen zwanzig Jahren insbesondere bei den Luft/Wasser-Wärmepumpen durch neue Scrollkompressoren mit Dampfzwiseheinspritzung mit zuerst konstanter, dann auch mit variabler Drehzahl erzielt. Elektronische Expansionsventile, drehzahlvariable Ventilatoren und optimale Enteisierung brachten signifikante Verbesserungen.

Zu den **Hauptprioritäten** gehörten die Entwicklung einer Wärmepumpe für den Sanierungsmarkt mit hohen Vorlauftemperaturen (Projekt „Swiss Retrofit Heat Pump“) und die Optimierung ganzer Wärmepumpenheizungssysteme mit durchdachtem Einbinden der Wärmepumpen sowie der Entwicklung neuer Regelungs – und Diagnosemethoden. Weitere Verbesserungen von Wärmepumpenheizungssystemen wurden durch die Entwicklung validierter Auslegungswerkzeuge für Erdwärmesondenanlagen, die Verbesserung der Wärmeübertragung, die Reduktion des Arbeitsmittelvolumens und Computersimulationen zur verbesserten Auslegung erzielt. Weiter wurden neue Testmethoden zum Erfassen des dynamischen Verhaltens der Wärmepumpen und von Wärmepumpen mit kombinierter Warmwasserbereitung ausgearbeitet.

Bei den Wärmequellen wurden nach dem Thermosiphonprinzip arbeitende Erdwärmesonden mit CO₂ als Arbeitsmittel vorgeschlagen. Als weitere Wärmequellen wurden Abwasser und Eisspeicher untersucht. Aus Messungen an einer grossen Zahl ausgeführter Wärmepumpenheizungen konnten Systemfehler aufgedeckt und eliminiert werden. Im Folgenden wird eine Auswahl durchgeführter Forschungs- und Entwicklungsarbeiten vorgestellt. Für weitere Arbeiten und nähere Informationen sei auf [1] ([Bild 2](#)) verwiesen.

Bild 2: Umfassende Geschichte der Wärmepumpen von den Vordenkern und den ersten Versuchen bis 2008. Gratisdownload [1].



Effizienzfortschritte der Kleinwärmepumpen seit 1992

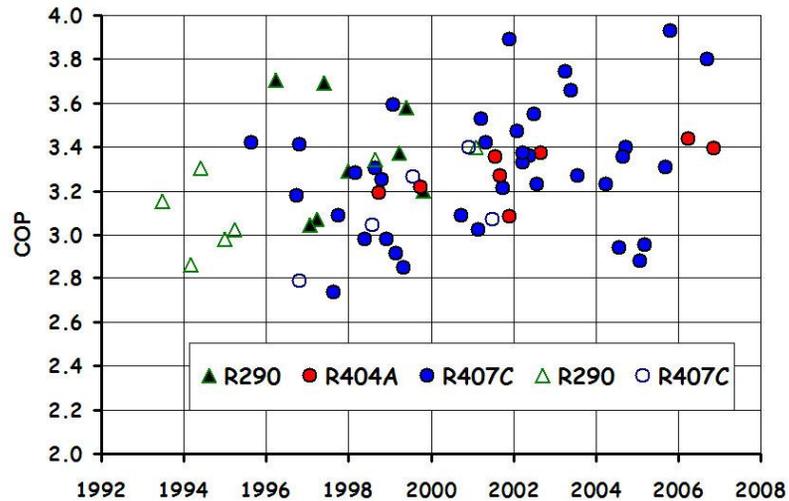
Rund 62% der Wärmepumpen nutzen heute Umgebungsluft als Wärmequelle. Das [Bild 8.3](#) vermittelt einen Eindruck über die von 1993 bis 2008 erreichten Fortschritte bei **Luft/Wasser-Wärmepumpen**. Innerhalb von 15 Jahren wurde bei den im Wärmepumpentestzentrum Buchs [www.wpz.ch] getesteten L/W-Wärmepumpen für zentrale Warmwasserheizungen und Luft als Wärmequelle eine Verbesserung der mittleren Leistungszahlen um 30% von 2.6 auf 3.4 beobachtet. Dies entspricht nur moderaten Lorenzwirkungsgraden¹ von 28% bis 36%. Hier lag also noch deutliches Verbesserungspotenzial.

Dieses wurde inzwischen von einigen Firmen gut genutzt. 2013 bis 2014-03 erreichten im Wärmepumpentestzentrum Buchs die **vier besten L/W-Wärmepumpen** bei 2°C/35°C **COP-Werte von 4.1 bis 4.4** [www.wpz.ch]. Dies ergibt Lorenzwirkungsgrade von 0.44 bis 0.47 und bedeutet **gegenüber den beiden Bestwerten von 1994 eine Verbesserung um 35%!** Im Vergleich zu den Mittelwerten von 1994 beträgt die Verbesserung sogar 70%. Die Lorenzwirkungsgrade der vier Testsieger erreichen bei Berücksichtigung der Solepumpenenergie bereits den unteren Bereich von Sole/Wasser-Wärmepumpen! Es gibt allerdings auch noch viel zu viele Fabrikate mit zu bescheidenen A2/W35-COP-Werten von 3.0 bis 3.5.

¹ Näherung für den exergetischen Wirkungsgrad gemäss [1], S.10

Bild 3: Leistungszahlen kommerzieller Luft (2°C) / Wasser (35°C) – Wärmepumpen. Maximale Wärmesenktemperaturdifferenz 10 K.

Nach Arbeitsmittel und Kompressortyp aufgeteilte Messergebnisse des Wärmepumpentestzentrums Buchs mit vollständigen Abtauzyklen. Ausgefüllte Symbole: Scrollkompressoren; leere Symbole: Kolbenkompressoren. ([1], Bild 8-3).



Von 1995 bis 2008 wurde bei **Sole /Wasser-Wärmepumpen** für 0°C/35°C nur eine Verbesserung der mittleren Leistungszahl um 17% von 3.8 auf 4.5 gemessen ([1], Bild 8 4)). Die deutlich höheren Werte für die Sole/Wasser-Maschinen verraten allerdings nicht die ganze Wahrheit, da sie die Pumpenergie zur „Sole“-Umwälzung in den Erdwärmesonden nicht enthalten. Für einen fairen Vergleich mit den Luft/Wasser-Maschinen muss diese noch berücksichtigt werden. Gemäss einem in {Nani 2005} beschriebenen Ansatz reduzieren sich dabei die Leistungszahlen von 3.8 auf 3.5 und von 4.5 auf 4.1. Dies entspricht noch mittleren Lorenzwirkungsgraden von 40% bis 47%. In den WPZ-Bulletins von 2013 bis 2014-04-19 [www.wpz.ch] findet man ohne Berücksichtigung der Pumpenergie für die Sole-Umwälzung für 0°C/35°C **bei 9 Fabrikaten COP-Werte von 4.6 bis 5**. Nach Abzug des Energiebedarfs für die Sole-Umwälzung bleiben noch maximale **B0/W35-COP-Werte von 4.2 bis 4.6** oder Lorenzwirkungsgrade von 47% bis 52%. Gegenüber den Mittelwerten von 1995 bedeutet dies eine Verbesserung um 31%. **Im Vergleich zu den Bestwerten von 1995 ist aber bei 0°C/35°C nur eine geringfügige Veränderung von -4% bis +5% festzustellen.**

Wärmepumpen für hohen Temperaturhub

Bei Wärmepumpen mit Umgebungsluft als Wärmequelle sind generell hohe Temperaturhübe nötig. Insbesondere gilt dies für den Sanierungsmarkt. Dafür waren vor 20 Jahren keine Wärmepumpen mit hinreichender Effizienz verfügbar. Im Rahmen der BFE-Forschungsprojekte erhielt deshalb die Entwicklung von effizienten Wärmepumpen für hohen Temperaturhub **höchste Priorität**. Die bis heute erreichten Verbesserungen dürfen als grossen Erfolg bezeichnet werden. Dies beweist die rasche Umsetzung bei fortschrittlichen Wärmepumpenherstellern.

Während grössere Wärmepumpen für den Sanierungsmarkt (beispielsweise mit Economizer und Schraubenkompressoren) bereits verfügbar waren, gab es für Heizleistungen unter 25 kW noch keine befriedigende Lösung. Um diese Situation möglichst rasch zu ändern, lancierte das BFE noch 1998 den Wettbewerb **Swiss Retrofit Heat Pump** zur Entwicklung eines neuen Wärmepumpentyps. Dieser musste Heizung und Warmwasserbereitung umfassen, auch Luft als Wärmequelle nutzen und deshalb einen effizienten Betrieb bis zu einem Temperaturhub von -12°C auf 60°C ohne Zusatzheizung bewältigen können. Hauptanforderungen mit Luft als Wärmequelle waren Lorenzwirkungsgrade von über 37.5% im ganzen Betriebsbereich und von 42.5% für den Testpunkt mit Luft 2°C / Wasser 50°C {Zogg 2002a}.

Zunächst wurden vier **unterschiedliche Kreisprozesse** untersucht: Bild 4. Im Vordergrund standen ein geringerer Heizleistungsabfall, eine tiefere Kompressorausstrittstemperatur und eine höhere Effizienz bei hohen Temperaturhüben. Die vier Kreisprozesse wurden zunächst durch Computersimulation optimiert, dann gebaut und im Labor ausgemessen. Die vielversprechendsten Prozesse wurden anschliessend in realen Wärmepumpenheizungen getestet. Die Hauptresultate des Vergleichs der untersuchten Prozesse findet man in [1], Tabelle 8-1.



Bild 4: Im Vorhaben „Swiss Retrofit Heat Pump“ untersuchte Wärmepumpenprozesse für hohen Temperaturhub ([1], Bild 8-16)

Die **zweistufige Wärmepumpe** mit zwei Kompressoren schien zunächst die vielversprechendste Lösung für hohe Temperaturhübe zu sein. Eine Wärmepumpe mit diesem Kreisprozess wurde an der EPFL gebaut und getestet. Verglichen mit dem einfachen, einstufigen Prozess wurde eine um 50% höhere Heizleistung und eine um 14% höhere Leistungszahl erreicht. Es zeigte sich aber, dass die Schmierölmigration im Kreislauf schon nach wenigen Betriebsstunden eine einwandfreie Schmierung der Kompressoren behinderte [Zehnder et al. 1999]. Zudem ist eine Wärmepumpe dieses Typs zu kompliziert, um mit den im Sanierungsmarkt zu ersetzenden kostengünstigen Kesseln zu konkurrieren.

Der Kreisprozess mit **Economizer** und einer **Zwischeneinspritzöffnung für Dampf** ist eine einfachere und kostengünstigere Lösung: **Bild 5**. Er war bei grösseren Wärmepumpen mit Schraubenkompressoren bereits Stand der Technik: Ein Kondensateilstrom wird auf ein mittleres Druckniveau expandiert. Das dabei entstehende Gas-Flüssig-Zweiphasengemisch wird dann im Economizer durch Unterkühlung des Restkondensats verdampft. Dieser Dampf wird dem Kompressor durch die Zwischeneinspritzungsöffnung zugeführt. Dieser Prozess weist die folgenden Vorteile auf:

1. Grösserer Massenstrom am Kompressoraustritt → Höhere Heizleistung.
2. Reduktion der Kompressoraustrittstemperatur → Einhalten der Betriebstemperaturgrenzen des Kompressors.
3. Kondensatunterkühlung → Vergrösserung der Leistungszahl.

Als auf Anregung von D. Favrat an der EPFL die ersten Versuche durchgeführt wurden, war auf dem Markt noch kein geeigneter Kompressor für Heizleistungen unter 25 kW verfügbar. Aber die Resultate mit dem damals verfügbaren Scrollkompressor mit Flüssigkeits-Einspritzöffnung waren bereits vielversprechend [Zehnder et al. 2000]. Für ein Folgeprojekt wurde dann von **Copeland** ein erster **Prototyp eines Scrollkompressors** für die Dampf-Zwischeneinspritzung zur Verfügung gestellt. Zusätzlich wurde die Versuchswärmepumpe noch mit einem Sauggaswärmeübertrager ausgerüstet (Bild 5). Gegenüber einem einfachen Einstufenprozess wurden damit bei hohen Temperaturhüben mit dem Arbeitsmittel R-407C die folgenden Verbesserungen erzielt: Erhöhung der Heizleistung um 30%, Erhöhung der Leistungszahl um 15% (gemessen bei $-7^{\circ}\text{C}/60^{\circ}\text{C}$) [Brand et al. 2000]. **Diese Entwicklung war erfolgreich.** 2002 startete Copeland die Massenproduktion von Scrollkompressoren mit Dampfzwischeneinspritzung. Der Prozess wurde **inzwischen** (je nach Arbeitsmittel mit oder ohne Sauggaswärmeübertrager) zum **Standardprozess** für Kleinwärmepumpen mit hohem Temperaturhub.

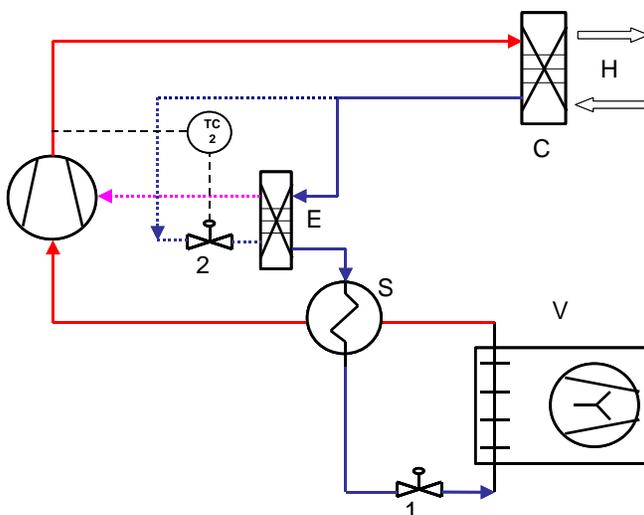


Bild 5: Wärmepumpe mit Economizer/Dampfeinspritzung und Sauggaswärmeübertrager. Scrollkompressor mit Dampfzwischeneinspritzung.
 C Kondensator,
 E Economizer,
 S Sauggaswärmeübertrager
 H Heizsystem,
 V Verdampfer,
 1 Hauptexpansionsventil,
 2 Hilfsexpansionsventil
 ([1], Bild 8-18)

Wärmepumpen mit variabler Heizleistung

Die Diskrepanz zwischen benötigter und von der Wärmepumpe produzierter Heizleistung in Abhängigkeit der Verdampfungstemperatur hat schon zu mehreren Anläufen mit drehzahlvariablen Wärmepumpen geführt. Sie sind an den zu geringen Teillastwirkungsgraden der Kompressoren und dem zu hohen Preis der Inverter gescheitert. Zu den frühen Verfechtern leistungsgeregelter Wärmepumpen gehört H.J. Eggenberger. Er begann mit entsprechenden Untersuchungen bereits in den frühen 1990er Jahren in seinem hausinternen Privatversuchslabor. Über eine Versuchswärmepumpe mit Hubkolbenkompressor hat er in [2] berichtet. Eine systematische Lokalisierung der Verlustquellen in Wärmepumpen durch Exergieanalysen wurde durch K. Hilfiker und B. Wellig an der Fachhochschule Luzern angeregt [3]. Sie quantifizierten die grossen Verluste von Wärmepumpen im Ein-/Aus-Betrieb. Auch von anderer Seite wurde darauf hingewiesen [4].

Eine bedeutende Verbesserung des im Bild 5 dargestellten Prozesses wurde durch die Entwicklung eines **drehzahlvariablen Scrollkompressors mit Dampfzwischeneinspritzung** durch *Copeland* ermöglicht. In mehreren Projekten wurde an der Fachhochschule Luzern ein Prototyp einer **neuen Luft/Wasser Wärmepumpe** entwickelt, gebaut und ausgemessen. Darüber wurde an den Wärmepumpentagungen des BFE von 2010 bis 2013 regelmässig berichtet. Der ursprünglich von *Copeland* entwickelte Prototyp-Kompressor mit gutem Teillastverhalten ist inzwischen im Handel erhältlich. Bei der neuen Luft/Wasser-Wärmepumpe wird die erzeugte Heizleistung mittels einer auf die Betriebscharakteristiken von **Kompressor und Ventilator** abgestimmten **kontinuierlichen Drehzahlregelung** bis zu einer Aussentemperatur von 0°C der erforderlichen Heizleistung angepasst. Darunter funktioniert die Wärmepumpe (bei den momentanen Teillastcharakteristiken) im Ein-/Aus-Betrieb. Sowohl Kompressor als auch Ventilator müssen **gute Teillastwirkungsgrade** aufweisen. Vereisung und Frostbildung im Luftkühler sind infolge kleinerer Wärmeleistungen bedeutend geringer als bei konventionellen Wärmepumpen. Soweit eine Abtauung noch nötig ist, erfolgt sie prioritär mit Ventilatornachlauf. Für die Auslegung solcher Luft/Wasser-Wärmepumpen wurde eine Wegleitung ausgearbeitet. Für das CH-Mittelland wurden bei Niedrigtemperaturheizsystemen (30°C/25°C bzw. 41°C/35°C bei einer Aussentemperatur von -10°C) Jahresarbeitszahlen um 4.1, bei 46°C / 38°C um 3.8 errechnet [5]. Die bedeutende Verbesserung der Jahresarbeitszahlen gegenüber konventionellen L/W-Wärmepumpen wurde mit Labor- und Feldversuchen bestätigt. Für Sole/Wasser-Wärmepumpen ist die Erhöhung der mit der neuen Wärmepumpe erreichbaren Jahresarbeitszahl geringer, beträgt aber immer noch 5% bis 10% [6]. Dass die nach dem geschilderten Prinzip arbeitende leistungsgeregelte Wärmepumpe bereits kommerziell angeboten wird, belegt den Erfolg dieser Entwicklung eindrucklich.

Wärmepumpen für Niedrigtemperatur-Fussbodenheizungen

Standard-Wärmepumpen erzeugen für Niedrigtemperatur-Fussbodenheizungen unnötig hohe Temperaturhübe. Diese verursachen hohe Effizienzverluste. Deshalb werden in einer Forschungsarbeit spezielle Wärmepumpen mit einem Temperaturhub in der Grössenordnung von nur 20 K entwickelt [7]. Für einen ersten Prototypen steht nur ein handelsüblicher Hubkolbenkompressor zur Verfügung. Ideal wäre ein kleiner **Turboverdichter**. Über dessen Entwicklung wurde an den Wärmepumpentagungen schon mehrfach berichtet: Bild 6. Die zu überwindenden Hürden sind noch beträchtlich. Selbstverständlich kommen für Niedrighub-Wärmepumpen nur **elektronische Expansionsventile** in Frage. Man hofft, im Heizbetrieb bei einem Temperaturhub von 20 K COP-Werte von 9 (und beim Kühlbetrieb noch höhere Werte) zu erreichen. Noch weiter gehen die Versuche für eine thermisch angetriebene Kleinwärmepumpe mit Radialturbine und Radialkompressor auf einer gasgelagerten Welle [8].

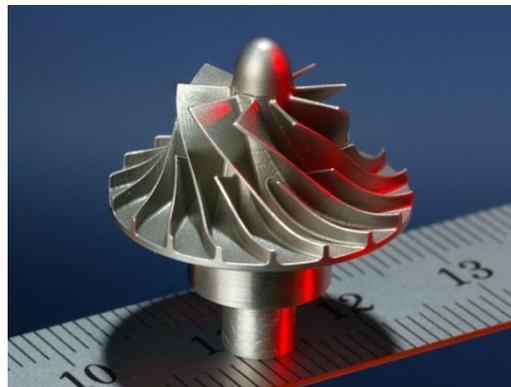


Bild 6: Rotor des Funktionsmusters eines ölfreien Miniatur-Turbokompressors {Schiffmann et al. 2005}

Kostengünstige Wärmepumpen für Niedrigenergiehäuser

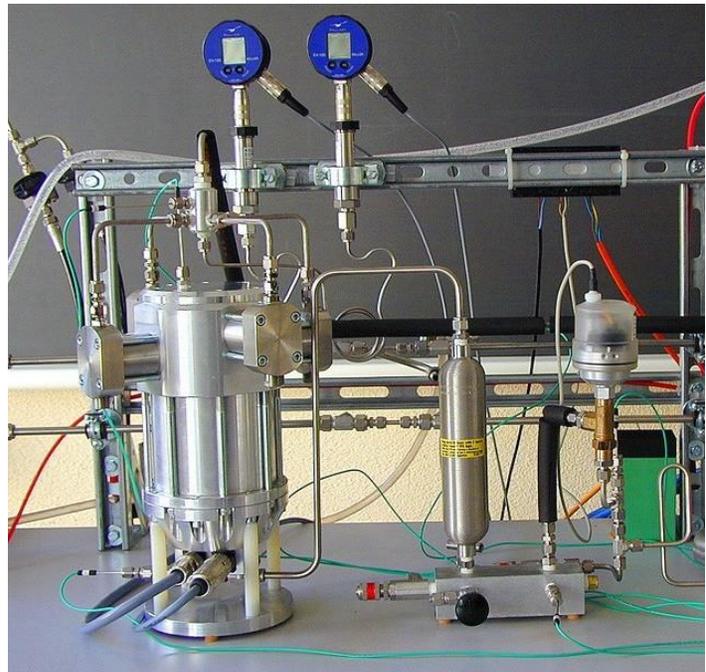
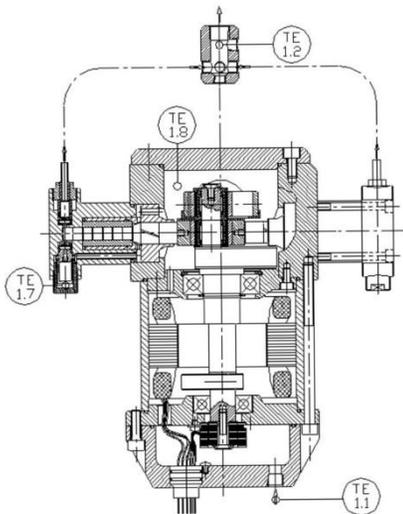
Niedrigenergiehäuser weisen eine dichte und gut isolierte Gebäudehülle, hohe solare Wärmegevinne, Niedrigtemperatur-Wärmeverteilssysteme und einen hohen Wärmebedarfsanteil für die Warmwasserbereitung auf. Zum Auffinden optimaler Regelstrategien für kostengünstige Wärmepumpenheizungen ohne Wärmespeicher und Mischventile wurden Untersuchungen des Gesamtsystems aus Gebäude und Heizung durchgeführt. Die Ergebnisse wurden in einem Handbuch für solche Systeme zusammengefasst {Afjei et al. 2000, Afjei 2002}. In einem laufenden internationalen Projekt werden Wärmepumpenlösungen für Netto-Nullenergiegebäude untersucht [9].

Kompressoren

Wie oben gezeigt wurde, sind neue Kompressoren oft der Schlüssel zu besseren Prozessführungen. Ab den frühen 1990er Jahren hat die Anzahl eingesetzter hermetischer **Scrollkompressoren** jene hermetischer Kolbenkompressoren deutlich überholt. Sie wurden für kleinere Wärmepumpen zum Standardkompressor. In den vergangenen 20 Jahren kamen Scrollkompressoren mit Dampfeinspritzung und seit 2012 drehzahlregelte Kompressoren mit gutem Teillastverhalten auf den Markt. Die Effizienz kleiner Kompressoren wurde deutlich gesteigert. Neue Permanentmotoren bringen weitere Verbesserungen.

Für das wieder aktuell gewordene Kohlendioxid werden weltweit neue Kompressoren entwickelt. Überkritische CO₂-Prozesse kämpfen immer noch mit Schmierölproblemen. Ziel eines BFE-Forschungsvorhabens war deshalb ein Machbarkeitsnachweis für einen **kleinen, ölfreien, halbhermetischen CO₂-Kolbenkompressor** für überkritische Wärmepumpen-Prozesse mit hohem Temperaturhub. Diese arbeiten unter hohen Drücken, typischerweise mit 35 bar Saugdruck und 80 bis 150 bar Enddruck. Zu diesem Zweck wurde ein Vierzylinder-Kolbenkompressor mit einer elektrischen Antriebsleistung von 150 W bis 950 W und variabler Drehzahl konstruiert und gebaut: Bild 7. Das Funktionsmuster wurde über den ganzen Drehzahlbereich erfolgreich getestet und erbrachte vielversprechende Resultate {Baumann 2001, Baumann und Conzett 2002}. Das Vorhaben zeigte allerdings bei der Umsetzung einmal mehr die Grenzen von Firmen mit für diesen Markt unterkritischer Grösse auf.

Bild 7: Funktionsmuster eines kleinen, ölfreien CO₂ Kompressors {Baumann 2001}



Arbeitsmittel

Das Geschehen bei den Arbeitsmitteln wurde durch die Herausforderungen zur Bewältigung der durch die synthetischen Arbeitsmittel verursachten Umweltprobleme diktiert. 1990 stimmten die Unterzeichnerstaaten des Protokolls von Montreal in London zwei Übereinkommen zur Eliminierung der FCK-Arbeitsmittel aus Produktion und Gebrauch bis zum Jahr 2000 zu. 1992 wurde das Protokoll von Montreal für einen auf 1995 vorgezogenen **Ausstieg aus den FCK-Arbeitsmitteln** (R-11, R-12, ...) modifiziert, und für die **HFCK-Arbeitsmittel** (R22, ...) wurde international ein stufenweiser Ausstieg bis 2030 (in der Schweiz für Neuanlagen bereits 2002 verboten) beschlossen.

Mit den neuen **FKW-Arbeitsmitteln** (wie z.B. R-134a) werden gute Resultate erzielt. Sie können die FCK und HFCK vollumfänglich ersetzen, bleiben aber infolge ihres hohen Treibhauspotenzials GWP und ihrer schwer abbaubaren Zersetzungsprodukte auch international nicht unangefochten.

Natürliche Arbeitsmittel werden als die endgültige Antwort auf die Frage nach den optimalen Arbeitsmitteln angesehen. Die wichtigsten Vertreter sind **Ammoniak, Kohlendioxid und Kohlenwasserstoffe** wie Propan oder Isobutan. Aber jedes dieser Arbeitsmittel stellt Herausforderungen: Das in Grossanlagen oft eingesetzte Ammoniak hat zwar ausgezeichnete, thermodynamische Stoffwerte – ist aber toxisch und entzündbar. Sein stechender Geruch warnt im Leckagefall allerdings lange vor dem Erreichen gefährlicher Konzentrationen. Kohlendioxid erfordert einen überkritischen Prozess, welcher für die meisten Raumheizungsanwendungen (im Gegensatz zur Warmwasserbereitung) ungünstig ist. Kohlendioxid-Wärmepumpen für die Warmwasserbereitung werden schon seit 2000 erfolgreich eingesetzt. Mit Propan lassen sich effiziente Wärmepumpenprozesse betreiben. Es ist aber leicht entzündbar, und seine Verwendung wird deshalb insbesondere in den U.S.A. und in Japan als nicht tolerierbares Risiko eingestuft. Die Verwendung natürlicher Arbeitsmittel wie Ammoniak oder CO₂ ist heute bei Grossanlagen in der Wärme- und Kältetechnik selbstverständlich geworden. CO₂ hat sich bei Kleinwärmepumpen infolge des hohen Temperaturgleits des überkritischen Prozesses nur zur Warmwasserbereitung durchgesetzt. [10, 11]. Ammoniak hat sich bei Kleinwärmepumpen nicht zuletzt wegen einem fehlenden ammoniakverträglichen Kleinkompressor noch nicht etabliert [12]. Auch Kohlenwasserstoffe wie Propan konnten sich bei Wärmepumpen insbesondere infolge der erforderlichen Massnahmen zur Beherrschung der Explosionsgefahr bei Füllmengen über 150 g nicht wirklich breit durchsetzen [4].

Zum Vergleich der Umwelteinwirkung unterschiedlicher Arbeitsmittel auf den globalen Treibhauseffekt wurden international zahlreiche Untersuchungen durchgeführt. Die bedrohlichen Resultate beschleunigten den Ausstieg aus den FCK- und HFCK-Arbeitsmitteln zusätzlich. Durch weltweite Anstrengungen ist es bis etwa 2005 gelungen, den die Zivilisation bedrohenden Ozonschichtabbau zu stoppen.

Die Umweltbeeinflussung durch Wärmepumpen ist aber nicht auf den Treibhausgaseneffekt beschränkt. Eine umfassende Antwort auf Umweltschäden bei der Verwendung unterschiedlicher Arbeitsmittel kann deshalb nur eine vollständige **Ökobilanz (Life Cycle Assessment LCA)** liefern. Diese Ökobilanzstudie wurde 1999/2000 für die Wärmepumpenheizung, die Klimatisierung und die Kälteerzeugung durchgeführt. Es wurden für Systeme mit Ammoniak, Propan, Kohlendioxid und die Fluorkohlenwasserstoffe (FKW wie R-134a, R-404A, R-407C, R-410A, R-417A) sowie Chlordifluormethan R-22 als Referenz die folgenden Umwelteinwirkungen verglichen: nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf, Treibhauseffekt, Ozonschichtabbau, Versauerung, photochemische Ozonbildung, aquatische und terrestrische Ökotoxizität und Emissionen radioaktiver Isotope (karzinogene und erbgutschädigende Effekte). Die Resultate bestätigten, dass der **Energieeffizienz der Anlagen eine Schlüsselrolle zukommt**. Anlagen mit natürlichen Arbeitsmitteln und vergleichbarer oder besserer Effizienz als Anlagen mit FKW ergeben geringere Umweltbelastungswerte. Wenn die Anlagen mit natürlichen Arbeitsmitteln aber eine tiefere Effizienz aufweisen als jene mit synthetischen Arbeitsmitteln, ist die Situation nicht mehr so eindeutig. Hauptschlussfolgerung der Studie war, dass FKW-Arbeitsmittel noch toleriert werden können, wenn es keine zumutbaren Alternativen mit natürlichen Arbeitsmitteln gibt. Dies aber nur unter den Bedingungen einer regelmässigen, strikten Dichtheitskontrolle während der ganzen Anlagelebensdauer und einem fachgerechten Arbeitsmittelrecycling vor der Entsorgung der Anlage. Gleichzeitig sollten die Herstellungsverfahren für die FKW-Arbeitsmittel verbessert werden {Frischknecht 1999, 2000, Zogg 2000b}.

Die Arbeitsmittelfrage hat unsere Wärmepumpentagung immer wieder aufgegriffen. So wurde jüngst mitgeteilt, dass der abgeschätzte **Umweltschaden** der Emissionen von Arbeitsmitteln in der Schweiz **bedeutend** sei. Er betrage etwa ein Drittel des Umweltschadens der Lösemittel-Emissionen [13]. Die Schweizer Gesetzgebung verbietet übrigens den Einsatz von in der Luft stabilen Arbeitsmitteln beispielsweise bei Klimaanlageanlagen mit mehr als 600 kW Kälteleistungen ab Ende 2013 [14].

Verdampfer von Luft/Wasser-Wärmepumpen

Speziell in dicht überbauten Gebieten haben die Luft/Wasser-Wärmepumpen gelegentlich zu Beanstandungen infolge der **Geräuschentwicklung** geführt. Im Rahmen eines Forschungsprogramms wurden die Lärmquellen von Luft/Wasser-Systemen analysiert, und es wurden Richtlinien für Planer und Hersteller zur Konstruktion leiser Maschinen ausgearbeitet. Sie enthalten eine grosse Zahl zu ergreifender Einzel-

massnahmen. Ihre Umsetzung in kommerziellen Luft/Wasser-Wärmepumpen hat bereits zu Erfolgen geführt {Beerhalter 2007}.

Der **Energiebedarf für das Abtauen von Wärmepumpen** mit Luft als Wärmequelle ist beachtlich, erreicht er doch etwa 10% des gesamten Bedarfs an elektrischer Energie. Eine Reduktion auf 5% liegt im Bereich des Möglichen. Zu Beginn des Vorhabens wurden die wichtigsten Abtaumethoden theoretisch analysiert {Hubacher und Ehrbar 2000}. Dann wurde in der zweiten Projektphase ein energetischer und ökonomischer Vergleich der Methoden vorgenommen {Bertsch et al. 2002}. Es wurden auch unkonventionelle Abtaulösungen wie Nutzen der Wärme aus dem Wärmeverteilsystem oder Abtauen mit Raumluft (Raumluftabtauung) untersucht. Überraschenderweise ergibt die Heissgasabtauung über eine Betriebsdauer von 15 Jahren etwa dieselben Gesamtkosten wie die Prozessumkehr. Sehr interessant ist das Abtauen durch Ventilatornachlauf und das Abtauen in Stillstandszeiten [15].

Bei einer **Lamellenluftkühler-Optimierung** (Verdampfer) durch Computersimulation mit gleichzeitigem Wärme- und Stofftransport in der Luft erwies sich die Reduktion des Luftvolumenstroms infolge Querschnittsverengung und damit grösserem Druckverlusts vielfach von grösserer Bedeutung als die Wärmeleitung durch Frost oder Eis [16]. Die Geometrie des Lamellenluftkühlers ist insbesondere auch für das energieeffiziente **Abtauen durch Ventilatornachlauf** wichtig. Die Wirksamkeit des Abtauens durch Ventilatornachlauf hängt nicht nur von der Temperatur sondern auch von der Luftfeuchtigkeit ab, weil das Abtauen durch die Kondensationswärme deutlich gefördert wird. Praktische Hinweise für die optimale Gestaltung von Lamellenluftkühlern werden in [17] zusammengestellt.

Erdwärmesonden

Als Baustein für Computersimulationen ganzer Wärmepumpensysteme mit Erdwärmesonden wurde das **Berechnungsmodul EWS** zur Berechnung der Temperatur des aus einer Sonde tretenden Wärmeträgers entwickelt. 1997 wurde es zunächst für Einzelsonden ausgearbeitet {Huber 1997} und dann 1999 auf Erdwärmesondenfelder erweitert {Huber und Pahud 1999}. Dank der kurzen Rechenzeit des Moduls EWS erlaubt es die dynamische Computersimulation ganzer Wärmepumpenanlagen mit Erdwärmesonden auf Personal Computern. EWS wurde später in diverse Wärmepumpensimulationsprogramme implementiert und am Institut für Geophysik der ETH-Zürich validiert {Signorelli und Kohl 2002}.

Computersimulationen sind allerdings nur nützlich, wenn die benötigten **geothermischen Stoffwerte** hinreichend genau bekannt sind. Deshalb wurde 1998/1999 ein Computerprogramm entwickelt, welches die Abschätzung dieser Stoffwerte für das Schweizerische Mittelland ermöglicht. Es wurde 2006 überarbeitet und ergänzt {Leu 1998, Leu et al. 1999, 2006}.

Für Gebäude mit Wärmeleistungsbedarf über 100kW werden heute vorwiegend klassische Erdwärmesondenfelder eingesetzt. Die Bohrtiefe beträgt typischerweise 100 bis 200 Meter. Mit zunehmender Leistung nimmt die Anzahl Sonden zu, was zu höherem Flächenbedarf und höheren Anschlusskosten führt. Deshalb wurden an zwei Beispielen auch Sonden mit bis zu 500 m Bohrtiefe in Bezug auf Investitionskosten und Jahreskosten untersucht. Anstelle von 4 EWS mit 122 m Tiefe wurde eine **Sonde mit 400 bis 500 m Tiefe** als günstigere Lösung vorgeschlagen. Der Betrieb ist dann ohne Frostschutz möglich [18].

An der Fachhochschule Luzern wurde auf der Basis einer Computersimulation eine **CO₂-Erdwärmesonde** vorgeschlagen, welche nach dem **Prinzip eines Thermosiphons** funktioniert. Die Jahresarbeitszahlen könnten damit im Vergleich zu Sole-Sonden um 15-25% verbessert werden (Wegfall der Umwälzpumpe 6 - 13 %, Druckverlust Saugleitung 0.5 %, höhere Verdampfungstemperatur 10 - 13 %). Zudem erfolgt im Vergleich zu Sole-Sonden ein gleichmässigerer Wärmeentzug über die Höhe. Problematisch dürfte der grosse Durchmesser infolge der Flutgrenze (41 mm für 7.5 kW Entzugsleistung) sein [19].

Eine detaillierte Untersuchung der Nützlichkeit einer **Sommerregeneration** einzelner Erdwärmesonden und ganzer Erdwärmesondenfelder **durch thermische Solaranlagen** zeigte ein ernüchterndes Ergebnis. Bei Einzelsonden vermag der durch die Regeneration bewirkte Mehrertrag nicht einmal die dafür benötigte Umwälzpumpeenergie zu kompensieren. Die Sommerregeneration ist höchstens für stark belastete Erdwärmesondenfelder von Interesse {Hässig et al. 1998}. Eine umfassende Antwort zur Nachhaltigkeit von Erdwärmesondenanlagen findet man in {Signorelli et al. 2005}.

Abwasser als Wärmequelle

Wärme aus Abwasserkanälen ist eine interessante Wärmequelle. In den 1990er Jahren hat U. Studer seine Abwasserkanal-Wärmeübertrager „Rabtherm“ eingeführt. Diese **Wärmeübertrager** werden in der **Bodenzone der Kanalisationsrohre** eingebaut; **Bild 8**. Das System „Rabtherm“ wurde in der Schweiz schon in mehreren Pilotinstallationen erprobt. Im Stadium Bachgraben-Basel funktioniert es bereits seit 25 Jahren problemlos {Müller 2005}. Auch in der Anlage in Binningen, welche 2001 installiert wurde, sind bisher keine Belagsbildungen bekannt geworden. In Zürich-Wipkingen wurden 1999 durch die Elektrizitätswerke der Stadt Zürich EWZ Rabthermelemente mit einer Gesamtlänge von 200 m installiert. Sie dienen als Wärmequelle zur Wärmepumpenbeheizung von 900 Wohnungen. Hier traten einige Probleme durch die Bildung eines Biofilms auf den Wärmeübertrageroberflächen auf. Diese wurden in einem BFE-Forschungsprojekt analysiert und als Gegenmassnahmen wurden Empfehlungen zur Fließgeschwindigkeit und zur Oberflächenbehandlung ausgearbeitet {Wanner 2004}.



Bild 8: Rabtherm-Abwasserkanalelemente
{Müller 2005}

Der Wärmeentnahme aus Abwasser sind allerdings Grenzen gesetzt, da die Reinigungsleistung von ARA mit abnehmender Temperatur schlechter wird.

Mittlerweile wurde die Fachwelt auch im Ausland bis hin nach Japan, Taiwan oder China auf diese Möglichkeiten zur Beheizung und Kühlung von Gebäuden sowie das Know-how in der Schweiz aufmerksam. [20] gibt einen Überblick über den internationalen Stand der Technik und der Wirtschaftlichkeit der Anlagen.

Gereinigtes Abwasser - kalter Wärmeverbund

Anstatt Wärme über ein konventionelles Fernwärmesystem mit trotz teurer thermischer Isolation hohen Wärmeverlusten zu transportieren, wird beim kalten Wärmeverbund Abwärme tiefer Temperatur durch einfache Rohrleitungsnetze zu den Verbrauchern transportiert. Dort wird das Niedrigtemperaturwasser von Wärmepumpen als Wärmequelle genutzt. Diese liefern dann die Nutzwärme mit der gewünschten Temperatur. Solche kalte Wärmeverbünde können kostengünstiger sein als konventionelle Fernwärmesysteme.

1995 wurde in Muri ein erster solcher kalter Wärmeverbund mit gereinigtem Abwasser aus einer Abwasserreinigungsanlage und kostengünstigen Kunststoffrohren realisiert. Bei einer totalen Heizleistung von 2.4 MW wurde mit den angeschlossenen Wärmepumpen eine mittlere Jahresarbeitszahl von 3.1 erreicht. Bis 2008 wurden etwa 50 weitere Abwasserwärmepumpen nach diesem Prinzip realisiert und der kalte Wärmeverbund wurde zu einer konkurrenzfähigen Technologie. Mit den angeschlossenen Wärmepumpen wurden Jahresarbeitszahlen bis 5 gemessen. Abwasser hat in der Schweiz das Potenzial, über Wärmepumpen bis zu 15% der an die Kanalisation angeschlossenen Gebäude zu beheizen {Müller 2005}.

Feldanalyse installierter Wärmepumpenheizungen

Eine effiziente Wärmepumpe garantiert noch keine effiziente Wärmepumpenheizung. Diese besteht aus vielen, voneinander abhängigen Komponenten: **Bild 9**. Von der Wärmequelle bis zur Wärmeverteilung in die einzelnen Räume kann deshalb Manches schief gehen.

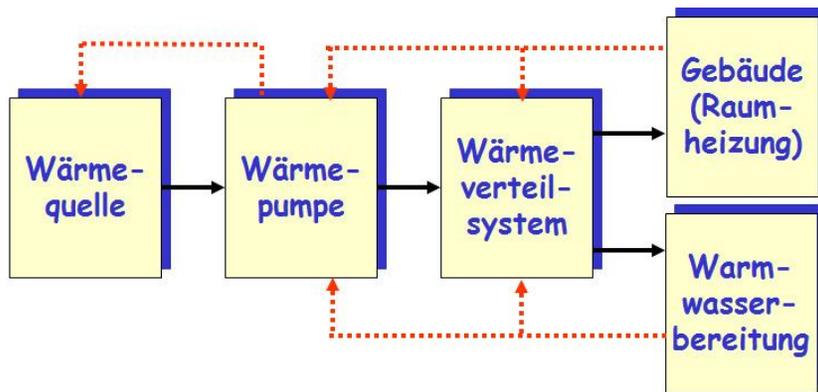


Bild 9: Komponenten eines Wärmepumpenheizungssystems.

Das Bundesamt für Energiewirtschaft beschloss deshalb 1995, eine umfassende systematische Feldanalyse ausgeführter Wärmepumpenheizungssysteme durchführen zu lassen. Ziele des Vorhabens FAWA (Feldanalyse Wärmepumpen) waren die Aufdeckung von Systemschwächen und die Ermittlung der besten Wärmepumpensysteme. Von 1996 bis 2003 wurden unter der Leitung von P. Hubacher total 236 Wärmepumpensysteme im Heizleistungsbereich bis 20 kW ausgemessen. Insgesamt wurden 1.3 Millionen Betriebsstunden oder 740 Betriebsjahre messtechnisch erfasst. Dabei ergaben sich für Luft/ Wasser-Systeme eine mittlere Jahresarbeitszahl von 2.6 und für Sole/Wasser-Systeme mit Erdwärmesonden eine solche von 3.4 {Hubacher et al. 2004}.

Die 20 besten Anlagen (8.5% der total geprüften Anlagen) wurden näher analysiert. Sie erreichten bei den Luft/Wasser-Systemen eine mittlere Jahresarbeitszahl von 3.1 (mit einem Maximalwert von 3.4) und bei den Sole/Wasser-Systemen mit Erdwärmesonden eine mittlere Jahresarbeitszahl von 5.0 (mit einem Maximalwert von 5.6!). Diese Werte lagen deutlich über den Mittelwerten aller gemessenen Anlagen. Dabei waren diese „Meisteranlagen“ keineswegs exotische, sondern einfach streng nach bekannten Richtlinien ausgelegte Anlagen. Bei den Sole/Wasser-Systemen mit Erdwärmesonden gab es durch eine sorgfältige Optimierung des Wärmeträgervolumenstroms durch die Sonden sehr deutliche Verbesserungen. Sehr hohe Effizienzwerte erzielten die Erdwärmesondenanlagen mit reinem Wasser anstelle von „Sole“ (Wasser-Ethylenglykol-Mischung). In einem Fall wurde dadurch eine Verbesserung der Leistungszahl um 24% beobachtet. Die Verwendung von reinem Wasser als Wärmeträger ist allerdings infolge des Einfrierisikos nur bei sehr sorgfältiger Erdwärmesondenauslegung möglich. Weiter ist bemerkenswert, dass ein hoher Anteil der Bestanlagen Wärmepumpen mit Propan als Arbeitsmittel besitzt {Nani et. al 2005}.

Hydraulische Schaltungen

Auf der Grundlage einer ausführlichen Evaluation der häufigsten hydraulischen Standardschaltungen für Einfamilienhäuser mit einem Heizleistungsbedarf bis 25 kW wurden in Zusammenarbeit mit den wichtigsten Wärmepumpenanbietern **sieben Standardschaltungen** identifiziert. Sie wurden aufgrund der Kriterien hoher Energieeffizienz, hoher Verlässlichkeit und einfacher praktischer Realisierbarkeit ausgewählt. Die sieben Standardschaltungen (wovon eine zur Integration thermischer Solaranlagen) decken Luft und Erdboden als Wärmequelle, unterschiedliche Temperaturniveaus der Wärmeverteilsysteme, kombinierte Raumheizung und Warmwasserbereitung ab. Sie wurden durch Computersimulationen untersucht und optimiert. Die Resultate wurden in eine Schritt-für-Schritt-Planungsrichtlinie zur direkten Anwendung in der Praxis komprimiert. Diese Planungsrichtlinien bringen eine deutliche Reduktion der verwirrenden Zahl existierender Schaltungen. Sie erlauben die Auslegung effizienter und kostengünstiger Wärmepumpensysteme mit einem minimalen Planungsaufwand. Dies begünstigt auch eine gute Qualitätssicherung und erleichtert den Vergleich von Offerten verschiedener Hersteller {Afjei et al. 2002, Gathuler et al. 2002b}.

Inzwischen haben die Standardschaltungen von 2002 einige Ergänzungen erfahren. Als „Gegenmittel“ zur Diskrepanz zwischen benötigter und von Luft/Wasser-Wärmepumpen gelieferter Vorlauftemperatur im Ein-/Aus-Betrieb wurde in [21] eine **aussentemperaturgeführte Volumenstromregelung** im Speicherladekreis vorgeschlagen. Die Jahresarbeitszahl entsprechender Anlagen lässt sich damit rund 10% steigern. Die **Warmwasserbereitung mit Wärmepumpen** wird immer häufiger. Lösungen für eine tägliche, einstündige Erhitzung des Warmwassers im Speicher auf 60°C und an den Zapfstellen $\geq 50^\circ\text{C}$

wurden vorgeschlagen und der Antilegionellen-Ladebetrieb mittels sekundärseitiger Speicherladeregelung wurde optimiert [22, 23].

Die Warmwasserbereitung mit Wärmepumpen und die **Verteilung des Warmwassers in Mehrfamilienhäusern** über Zirkulationssysteme und elektrische Begleitheizungen wurden in [24] theoretisch und messtechnisch untersucht. Herkömmliche Zirkulationssysteme erwiesen sich bei optimaler Auslegung und Installation bei grösseren Überbauungen als gute Lösung. Bei kleineren Überbauungen zeichnen sich leichte Vorteile für elektrische Begleitheizungen ab.

Zur optimalen **Einbindung solarthermischer Anlagen** in Wärmepumpenheizungssysteme bedarf die dazu vorgeschlagene Standardschaltung weiterer Abklärungen und Ergänzungen. Diese werden im Rahmen internationaler Projekte (IEA Annex 38) bearbeitet [25]. Speziell auf die dazu geeigneten Kombispeicher wird in [26] eingegangen. Auf Grund der Messresultate wurden verschiedene Varianten der hydraulischen und regeltechnischen Integration der Wärmepumpe in das System simuliert und miteinander verglichen. Varianten mit ungünstig gewählter Hydraulik und/oder Regelung führten zu einem erhöhten Bedarf an elektrischer Energie von bis zu 47% (>1000 kWh/a) gegenüber einer guten Variante mit gleicher Wärmepumpe, gleichem Speicher und gleichem Kollektorfeld.

Wärmepumpentest für kombinierte Heizung und Warmwasser

Im Zuge eines energieeffizienteren Bauens nimmt der Anteil des Wärmebedarfs für die Warmwasserbereitung gegenüber jenem für die Raumheizung stetig zu. Die Warmwasserbereitung erreicht heute einen Anteil von 10% bis 50% des gesamten Jahreswärmebedarfs. Es wurde deshalb immer dringender, einen Wärmepumpentest durchzuführen, welcher die Gesamteffizienz für kombinierte Raumheizung und Warmwasserbereitung liefert. Auf die Initiative des Autors wurde deshalb 2002 ein internationales Vorhaben als **Annex 28 des IEA Wärmepumpenprogramms** gestartet. Projektziel war ein neues Testverfahren, welches die nötigen Daten und Methoden zur korrekten Berechnung der Jahresarbeitszahl kombinierter Heizungs-Warmwasser-Systeme ermöglicht. Das Bilanzgebiet umfasst dabei die Wärmepumpe, den Boiler (oder Durchlauferhitzer) und optionale Zusatzerwärmer für die Spitzendeckung: **Bild 10**. Die Arbeiten wurden inzwischen abgeschlossen. Die Ergebnisse sind bereits in die aktuelle EU-Richtlinie zur Energieeffizienz von Gebäuden EPBD eingeflossen. Die Typenprüfung wird im Rahmen der Europäischen Normenorganisation CEN weiter verfolgt [27].

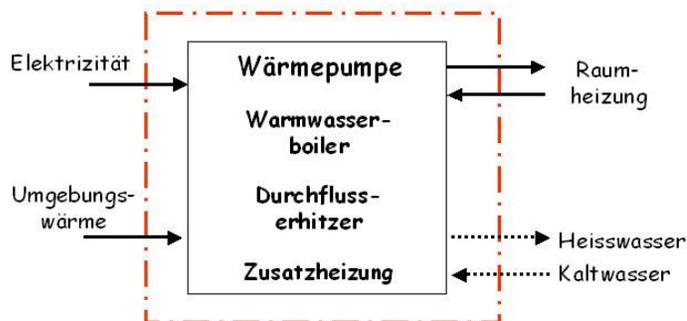


Bild 10: Bilanzgrenzen für den Test von Wärmepumpen mit kombinierter Raumheizung und Warmwasserbereitung ([1], Bild 8-27)

Regelung, Fernbedienung und Fehlerdiagnose

Um 1990 kam die **digitale Regelung** auf. Mikrocomputer ermöglichten, Regler mit komplizierteren Konzepten wie dem modellbasierten Ansatz zu programmieren und ganze Prozesse zu automatisieren. Nur wenig später folgte das Zeitalter der Datenkommunikation über längere Distanzen. Die Mensch-Maschinen-Kommunikation wurde damit auf eine völlig neue Ebene gehoben. Die Fernüberwachung und dann die **Fernbedienung** über Modems wurden möglich. **Neue Diagnosemethoden** ermöglichten einen Übergang vom periodischem Unterhalt zu einem Unterhalt nach effektivem Bedarf. All dies führte zu einer deutlichen Verbesserung der Verlässlichkeit und Effizienz des Anlagenbetriebs und zu einer Reduktion der Unterhaltskosten. Schliesslich wurden all diese Entwicklungen durch das **Internet** enorm beschleunigt.

Der übliche Ein/Aus-Betrieb zur Heizleistungsregulierung von Wärmepumpen ergibt oft zu häufige Ein- und Ausschaltvorgänge mit zu kurzen Betriebsperioden. Dies hat nicht nur eine geringere Effizienz, sondern auch eine Beeinträchtigung der Lebensdauer der Wärmepumpen zur Folge. Deshalb wurde an der ETH-Zürich die **modellbasierte Pulsbreitenmodulation** entwickelt und getestet. Grundidee dieses neu-

en Konzepts ist die volle Nutzung der thermischen Trägheit von Gebäude und zentralem Wärmeverteilungssystem zum Erreichen möglichst langer Wärmepumpenbetriebszeiten ohne merklichen Komfortverlust. Gegenüber der herkömmlichen, aussentemperaturgeführten Rücklauftemperaturregelung (ARL) ergaben sich mit der Pulsbreitenmodulation bei vergleichbarem Komfort in den beheizten Räumen zahlreiche Vorteile: Höherer Niedertarifanteil, längere Wärmepumpenlaufzeiten, Ausschalten der Umwälzpumpe zwischen den Pulsen, einfache Einknopfeinstellung {Gabathuler et al. 1998, 2002a, Shafai et al. 1999, 2002}.

Während dem Betrieb einer Wärmepumpe können Fehler, wie die Belagsbildung auf Wärmeübertrageroberflächen (Fouling), Komponentenversagen oder Arbeitsmittelverlust durch Leckage auftreten. Diese Fehler reduzieren die Effizienz der Wärmepumpe bereits in einem frühen Stadium. Um sie auch früh zu erkennen, wurde ein **Diagnosesystem** entwickelt und auf dem Wärmepumpenprüfstand getestet. Mit diesem werden die Parameter einer Wärmepumpe laufend identifiziert und während dem Betrieb klassifiziert. Damit ist eine **laufende Überwachung der optimalen Funktion** einzelner Komponenten einer Wärmepumpenanlage möglich geworden. Dies erlaubt es, anstelle eines periodischen Wärmepumpenservices auf einen **gezielten Unterhalt nach Bedarf** überzugehen. Das entwickelte Diagnosesystem kann auch für Kältemaschinen angewendet werden {Zogg und Shafai 2001, Zogg et al. 2001, 2005}. Es wird zur Zeit in einem laufenden KTI-Projekt in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner an der Fachhochschule Nordwestschweiz weiter entwickelt.

Energie-Contracting

Bei Heizleistungen über 50 kW wird die Wärmepumpenheizung auf der Basis des Energie-Contractings immer populärer. Es verlagert das Risiko vom Nutzer zum Vertragspartner. Die grössten Energie-Kontraktoren in der Schweiz sind die Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ) und der Stadt Zürich (EWZ). Nachfolgend sei ein interessantes Beispiel dazu erwähnt:

2006 wurde für das Palace Hotel (Bild 11) und das Schulgebäude "Grevas" in St.Moritz ein Wärmepumpenheizungssystem mit dem St.Moritzer See als Wärmequelle gebaut. Das Engadin gehört zu den Regionen mit den tiefsten Wintertemperaturen. Die mittlere Januar Temperatur erreicht in St.Moritz nur rund -10°C . Deshalb ist hier besonders auf eine effiziente Raumheizung zu achten. Die neue Ammoniak-Wärmepumpe mit einer Jahreswärmeproduktion von 4'000 MWh deckt 80% des Bedarfs des Hotel Palace und 70% des Wärmebedarfs der Schule. Während die Oberfläche des St.Moritzer Sees mit einer bis zu 75 cm dicken Eisschicht bedeckt ist, beträgt die Wassertemperatur an der Entnahmestelle für die Wärmepumpe im Winter etwa 4°C . Obwohl die erforderliche maximale Heizungsvorlauftemperatur 70°C beträgt, erreicht die Wärmepumpe noch eine Jahresarbeitszahl von rund 3. Die Anlage wurde durch die Elektrizitätswerke der Stadt Zürich EWZ im Contracting-Verfahren gebaut. Sie wird in der EWZ-Zentrale in Zürich überwacht und vollständig ferngesteuert {Dubacher 2007}.



Bild 11: Hotel Palace in St.Moritz mit dem eisbedeckten See (rechts im Bild) als Wärmequelle {Dubacher 2007}

Qualitätssicherung

Der Erfolg der Wärmepumpen ist nicht nur auf technische Entwicklungen zurückzuführen. Ohne umfassende Massnahmen zur Qualitätssicherung wäre er nie eingetreten. Näheres dazu findet man in [1], Abschnitt 8.2.5 und aktuell bei [www.fws.ch]. Auf die umfassende Feldanalyse ausgeführter Wärmepum-

penanlagen wurde oben bereits eingegangen. Aus Platzgründen können die weiteren Massnahmen nur kurz aufgezählt werden:

- Wärmepumpen-Testzentrum mit laufend publizierten Testresultaten [www.wpz.ch]
- Gütesiegel für Wärmepumpen
- Gütesiegel für Erdwärmesondenbohrfirmen
- Ausbildung der Installateure – Zertifikat für FWS-Fachpartner
- Wärmepumpendoktor

Quellen

{...} Angaben zu diesen Referenzen aus Platzgründen in [1],S.105/119.

Die **Tagungsbände früherer Jahre** können als pdf-Files wie folgt heruntergeladen werden:

www.bfe.admin.ch/forschungwkk/index.html?lang=de → Datenbanken → Datenbank Forschungsprogramme Wärmepumpen und Kälte → „Tagung“ eingeben

[1] Zogg, M.: Geschichte der Wärmepumpe - Schweizer Beiträge und internationale Meilensteine, Bundesamt für Energie, Bern 2008.

Gratisdownload ab www.zogg-engineering.ch/publi/GeschichteWP.pdf

oder www.bfe.admin.ch/dokumentation/energieforschung/index.html?lang=de&publication=9824

Gedruckte Version: 1. Aufl., Zogg Verfahrens- und Energietechnik, Oberburg 2009, ISBN 978-3-033-02154-9 (zu beziehen bei www.fws.ch).

[2] Eggenberger, H.J.: Stetig geregelte Sanierungs-Wärmepumpe „PIONEER“, Tagungsband 2005, S.69/76.

[3] Gasser,L.,Wellig,B.,Hilfiker,K.: Mit Exergie-Analyse das Verbesserungspotenzial von Luft-Wasser-Wärmepumpen aufzeigen, Tagungsband 2007, S.87/97.

[4] Friedl,M.: Exergieanalyse der Propan-Wärmepumpe im Schulhaus Limmat in Zürich, Tagungsband 2009, S.75/88.

[5] Gasser,L., Wellig, B.: Effiziente Heizsysteme mit leistungsgeregelten Luft/Wasserwärmepumpen, Tagungsband 2012, S.16/29.

[6] Gasser,L.,Wyssen, I.,Brun,A.,Wellig,B.: Leistungsgeregelte Wärmepumpen - Erfahrungen und Potenzial, Tagungsband 2013, S.79/93.

[7] Wyssen,I., Gasser,L., Wellig,B.: Effiziente Niederhub-Wärmepumpen und –Klimakälteanlagen, Tagungsband 2013, S.22/35.

[8] Demierre, J., Favrat,D.: Pompe à chaleur tritherme à double cycle de Rankine et groupe turbine-compresseur sans huile, Tagungsband 2012, S.114/127.

[9] Wemhöner,C., Kluser, R.: Wärmepumpenkonzepte für Nullenergiegebäude (IEA HPP Annex 40), Tagungsband 2013, S.94/107.

[10] Schiefelbein,K., Friedl, M.: CO₂-Wärmepumpe für Heiz- und Gebrauchswarmwasser, Tagungsband 2005, S.103/114.

[11] Anstett,P.: Mesures des données énergétiques d'une pompe à chaleur air/eau au CO₂ (R744) pour préparation d'eau chaude sanitaire dans un hôpital, Tagungsband 2007, S.65/74.

[12] Stauffer,D.: Ammoniak-Kleinwärmepumpe mit hohem Temperaturhub, Tagungsband 2005, S.93/102.

[13] Liechti, J.: Entwicklung und Problematik bei den Kältemitteln, Tagungsband 2012, S.53/59.

[14] Gerber, R.: Natürliche Kältemittel als Lösung für die Umweltproblematik synthetischer Kältemittel, Tagungsband 2013, S.36/49.

[15] Hubacher,P., Ehrbar,M.: Abtauen – Erkenntnisse aus Prüf- und Feldmessungen, Tagungsband 2005, S.31/48.

[16] Sahinagic,R., Imholz, M., Berlinger,L., Huber,H., Hilfiker,K.: Luftkühler-Optimierung mit Reduktion der Eis- und Frostbildung – LOREF, Tagungsband 2005, S.19/30.

- [17] Wellig,B., Albert, M., Hilfiker, K.: Effiziente Luft-Wasser-Wärmepumpen trotz Eis & Frost – Projekt LOREF, Tagungsband 2007, S.99/113.
- [18] Rognon,F.: Meilleure valorisation de la géothermie par des sondes géothermiques profondes, Tagungsband 2012, S.129/138.
- [19] Wellig,B., Grüniger,A.: Potential von CO₂-Erdwärmesonden, Tagungsband 2010, S.140/151.
- [20] Müller,E.A., Kernen,M., Kobel,B.: Einsatz der Abwasserwärmenutzung - Grenzkriterien und Wirtschaftlichkeit, Tagungsband 2011, S.98/107.
- [21] Hubacher,P., Ehrbar,M.: Witterungsgeführter Massenstrom im Ladekreis, Tagungsband 2009, S.130/142.
- [22] Gabathuler,H.R., Mayer,H.: Optimierte Warmwasserbereitung mit Wärmepumpen, Tagungsband 2007, S.115/130.
- [23] Gabathuler,H.R., Mayer,H., Baumgartner,Th.: Warmwasserbereitung mit Wärmepumpe und sekundärseitiger Laderegelung, Tagungsband 2009, S.102/116.
- [24] Bertsch,S., Vetsch,B., Gschwend,A.: Optimierte Warmwasser-Produktion mit Wärmepumpen im Mehrfamilienhaus, Tagungsband 2012, S.31/42.
- [25] Afjei,Th., Dott,R., Genkinger,A.: Wärmepumpe und Solarthermie – Kurzberichte zu den Projekten SOFOWA und EFKOS, Tagungsband 2012, S.76/87.
- [26] Haller,M, Haberl,R, Frank,E.: Integration von Kombispeichern in Solar-Wärmepumpenanlagen, Tagungsband 2013, S.118/130.
- [27] Wemhöner,C: IEA HPP: Berichte aus dem Annex 28 und Annex 32, Tagungsband 2007, S.19/30.