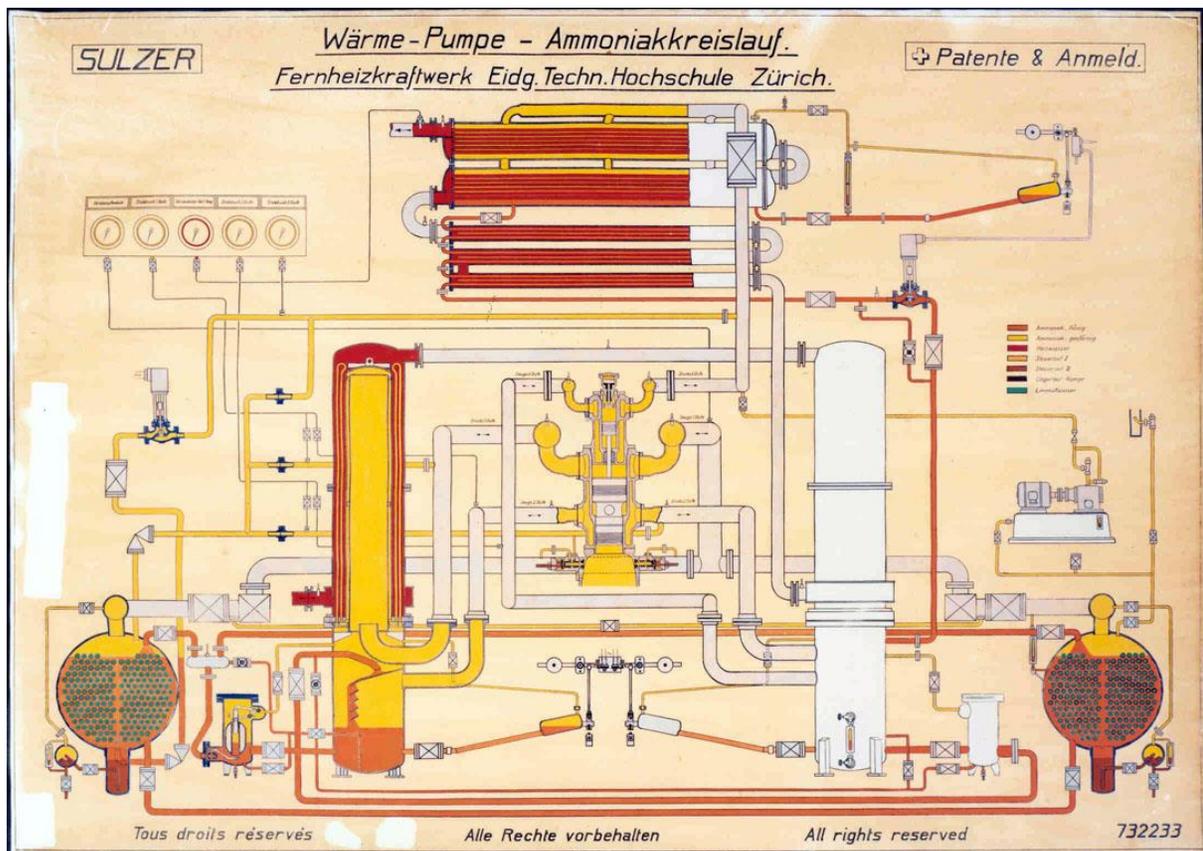




Geschichte der Wärmepumpe

Schweizer Beiträge und internationale Meilensteine



Martin Zogg

Verfahrens- und Energietechnik
CH-3414 Oberburg

mazo@zogg-engineering.ch

Mai 2008

Vorwort

Dieser Bericht entstand aus den Wünschen des Schweizerischen Bundesamts für Energie nach einer umfassenden Entwicklungsgeschichte der Wärmepumpe mit besonderer Berücksichtigung der beachtlichen schweizerischen Pionierleistungen und nach einem Plenarvortrag an der 9. „International Energy Agency Heat Pump Conference“ vom 20. bis zum 22. Mai 2008 in Zürich. Zu den schweizerischen Aktivitäten wurden zahlreiche persönliche Befragungen durchgeführt. Der Bericht ist nach bestem Wissen des Autors geschrieben; er erhebt aber keinen Anspruch auf Vollständigkeit und Fehlerfreiheit.

Der Autor dankt den nachstehenden Personen für ihre grosszügige Informationsbereitschaft, ihre Unterstützung und ihren Rat herzlich: Karin Äbi, Marco Andreoli, Peter Bailer, Heinz Baumann, Franz Beyeler, Pierre Binggeli, Rudolf Bolliger, Otto Bosshart, Carlo Brugnoli, Georg Dubacher, Fredy Eberhard, Max Ehrbar, Hans-Rudolf Fankhauser, Daniel Favrat, Peter Fluri, Pirmin Frei, Rolf Frischknecht, Herbert Giger, Martin Graf, Heinz Grimm, Gerald C. Groff, Emil Grüninger, Hans Grüter, Günther Reiner, Daniel Gut, Karl-Heinz Handl, Franz Hansen, Filip Hauptmann, Hans-Peter Hemmi, Fredy Hoyer, Peter Hubacher, Hans Huber, Max Hutter, Beda Huwyler, Dieter Imboden, Walter Janach, Bruno Jordi, Daniel Kalberer, Bruno Kemm, Christine Klinger, Heinz Lattmann, Urs Leibundgut, Franz Lenz, Jürg Lieberherr, Daniel Mani, Gabriella Mariani, Werner Mendler, Istvan Meszaros, Rolf Mielebacher, Ernst A. Müller, Marco Nani, Karl Ottinger, Ulrich Pietrucha, Jürg Rechsteiner, Kurt Riesen, Andreas Rindisbacher, Therese Rochat, Ernst Rohner Sr., Stefan Roth, Ladislaus Rybach, Marco Scanderbeg, Felix Schmid, Max Schultheiss, Heiko Stegmaier, René Steiner, Rolf Steiner, Urs Studer, Gyula Szokody, Paul Truninger, Rolf Truninger, Daniel Trüssel, Kurt Trüssel, Carl Wassermann, Bruno Weber, Bruno Wermelinger, Stefan Zeller, Hans Zogg.

Ein spezieller Dank geht an Thomas Kopp, Fabrice Rognon und Hans Ulrich Schärer vom Schweizerischen Bundesamt für Energie für ihre Anregungen und ihr Verständnis sowie ans Bundesamt für Energie für die finanzielle Unterstützung. Nicht zuletzt danke ich auch meiner Frau Blanca für ihre Mithilfe während den ersten Monaten meiner „Pensionierung“.

Oberburg, im Mai 2008

Martin Zogg

Zogg, Martin: Geschichte der Wärmepumpe - Schweizer Beiträge und internationale Meilensteine, Oberburg, Zogg - Verfahrens- und Energietechnik, 2009.

ISBN 978-3-033-02154-9.

Satz und Umschlag: Martin Zogg, CH-3414 Oberburg.

Druck: Reprozentrale Höggerberg, ETH Zürich.

Copyright: Bundesamt für Energie, CH-3003 Bern.

Text und Abbildungen wurden mit grosser Sorgfalt erarbeitet. Der Autor kann jedoch für eventuell verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgend eine Haftung übernehmen.

Die vorliegende Publikation ist urheberrechtlich geschützt. Kein Teil dieser Publikation darf ohne schriftliche Genehmigung des Autors in irgend einer Form reproduziert werden. Vertrieb durch www.fws.ch

Zusammenfassung

Mit Heizen durch Wärmepumpen kann der Brennstoffverbrauch und damit die CO₂ Emission im Vergleich zu einer konventionellen Kesselheizung auf rund die Hälfte gesenkt werden. Gegenüber einer elektrischen Widerstandsheizung ergibt die Wärmepumpenheizung sogar eine Reduktion des Energiebedarfs um bis zu 80%. Die Wärmepumpenheizung wird sich deshalb künftig noch vermehrt durchsetzen. Schweizer Pioniere haben als erste funktionierende Brückenkompressionsanlagen gebaut. Die ersten Wärmepumpen in Europa wurden in der Schweiz realisiert. Die Schweiz ist in der Wärmepumpentechnik bis heute bei den führenden Ländern geblieben. Ihre Pionierarbeiten in der Entwicklung von Erdwärmesonden, der Nutzung von Abwasser als Wärmequelle, der Entwicklung ölfreier Kolbenkompressoren sowie von Turbokompressoren sind allgemein bekannt. Die grösste je gebaute Wärmepumpe stammt aus der Schweiz. Obwohl ein umfassendes Gasverteilnetz besteht, werden heute rund 75% der neuen Einfamilienhäuser mit Wärmepumpen beheizt. Dieser Bericht präsentiert einige „Highlights“ aus dieser Erfolgsgeschichte. Dabei werden die Schweizer Entwicklungen ins Zentrum gerückt und ihre Beziehungen zu den internationalen Meilensteinen aufgezeigt. Um anzudeuten, in welcher Richtung die künftigen Entwicklungen gehen könnten, werden auch einige neuere Arbeiten aus der Schweizer Wärmepumpenforschung vorgestellt.

Eine Kurzfassung wurde in Englisch publiziert [Zogg 2008a].

Abstract

Compared to conventional boilers, heating by heat pumps cuts down fuel consumption and CO₂ emissions to some 50%. Compared to electric resistance heating, the energy consumption is even reduced up to 80%. Therefore the impressive market penetration growth of heat pumps will continue. Swiss pioneers were the first to realize functioning vapour recompression plants. The first European heat pumps were realized in Switzerland. To date it remains one of the heat pump champions. Its pioneering work in the development of vertical borehole heat exchangers, sewage heat recovery, oil free piston compressors and turbo compressors is well known. The biggest heat pump ever built comes from Switzerland. Although there is a fairly comprehensive natural gas distribution grid, 75% of the new single-family homes built in Switzerland are currently heated by heat pumps. This paper presents some of the highlights of this success story focusing on Swiss developments and relating them to the international milestones. In order to indicate the direction in which the future development might go to, some recent Swiss research projects are presented as well.

*The full English version of this report [Zogg 2008b]
and an English summary [Zogg 2008a] are available as well.*

Anstelle eines **Glossars** sei auf
<http://de.wikipedia.org/wiki/Hauptseite> oder
http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page verwiesen.

Schlüsselworte: Wärmepumpe, Geschichte, Pionier, Kompressionskältemaschine, Kaldampfprozess, Absorptionsprozess, Schweiz

Einführung	6
1 WARUM HEIZUNG MIT WÄRMEPUMPEN?	7
2 GRUNDLAGEN DER WÄRMEPUMPENTECHNIK	8
3 DIE PIONIERE VOR 1875	11
3.1. Komponenten und Kältetechnik	11
3.1.1 .Dampfkompessionsprozess	11
3.1.2 .Absorptionsprozess	12
3.2. Brüdenkompression	13
4 INDUSTRIALISIERUNG 1876-1918	14
4.1. Komponenten und Kältetechnik	14
4.1.1 .Dampfkompessionsprozess	15
4.1.2 .Absorptionsprozess	17
4.2. Brüdenkompression - Schweizerische Pionierleistungen	17
5 WÄRMEPUMPENHEIZUNG WIRD INTERESSANT 1919-1950	19
5.1. Komponenten und Kältetechnik	19
5.1.1 .Dampfkompessionsprozess	19
5.1.2 .Absorptionsprozess	23
5.2. Wärmepumpenheizung – eine Schweizerische Pionierleistung	24
5.2.1 .Historische Wärmepumpen der Stadt Zürich	26
5.2.2 .Ausgewählte weitere Wärmepumpen	33
5.3. Internationale Meilensteine der Wärmepumpenheizung	35
5.4. Brüdenkompression – eine Schweizer Erfolgsgeschichte	36
6 DIE PERIODE TIEFER ENERGIEPREISE 1951-1972	39
6.1. Komponenten und Kältetechnik	39
6.1.1 .Dampfkompessionsprozess	39
6.1.2 .Absorptionsprozess	41
6.2. Wärmepumpen in der Schweiz	41
6.2.1 .Seltene Wärmepumpen zu Heizzwecken	41
6.2.2 .Erfolg bei der Brüdenkompression	42
6.3. Internationale Meilensteine der Wärmepumpenheizung	42

7	ENTHUSIASMUS UND ENTTÄUSCHUNG 1973-1989	44
7.1	Komponenten und Kältetechnik	45
7.1.1	Dampfkomppressionsprozess	45
7.1.2	Absorptionsprozess	46
7.2	Schweizer Beiträge zur Wärmepumpenheizung	47
7.2.1	Wärmepumpenpioniere im Einfamilienhausbereich (10-50 kW)	48
7.2.2	Wärmepumpensysteme mittlerer Grösse (50-1000 kW)	51
7.2.3	Grosse Wärmepumpensysteme (> 1 MW)	54
7.2.4	Pioniere der Erdwärmesonden	58
7.2.5	Pioniere der Nutzung von Rohabwasser	59
7.2.6	Qualitätssicherung für Kleinwärmepumpen	60
7.2.7	Unterstützung durch öffentliche Forschung und Entwicklung	61
7.2.8	Unterstützung durch Verbände, Bundesverwaltung und Medien	63
7.3	Internationale Meilensteine der Wärmepumpenheizung	64
7.4	Rektifikation mit Brüdenkompression - Schweizer Pionierarbeit	66
8	DIE ERFOLGSGESCHICHTE 1990 – HEUTE	67
8.1	Komponenten und Kältetechnik	67
8.2	Schweizer Beiträge zur Wärmepumpenheizung	69
8.2.1	Ausgewählte Anlagen und Entwicklungen	73
8.2.2	Wärmepumpe für den Einfamilienhaus-Sanierungsmarkt	81
8.2.3	Weitere Unterstützung durch öffentliche Forschung und Entwicklung	85
8.2.4	Unterstützung durch Verbände und den Bund	94
8.2.5	Qualitätssicherung	96
8.2.6	Brüdenkompression	99
8.3	Internationale Meilensteine der Wärmepumpenheizung	99
9	SONDERPRINZIPIEN	102
10	REFERENZEN	105

EINFÜHRUNG

Seit der Steinzeit hat die Menschheit Wärme durch künstlich entzündete Feuer erzeugt. Aber das Problem der künstlichen Kälteerzeugung war viel komplexer und wurde erst um 1850 gelöst. Zu dieser Zeit haben Pioniere die ersten Kältemaschinen erfunden. Die gleiche Maschine kann auch als Wärmepumpe zu Heizzwecken verwendet werden. Aber es war der enorme Wunsch nach Kühlung, welcher die Weiterentwicklung der neuen Erfindungen rasch vorantrieb und zu einer triumphalen weltweiten Verbreitung führte. Um 2005 waren weltweit über 130 Millionen Klimatisierungsgeräte (Einheiten zum Kühlen und Heizen) in Betrieb und der Jahresabsatz lag um 15 Millionen Geräten in Asien, 2 Millionen in Nordamerika und einige Hunderttausend in Europa [Groff 2005]. Dies illustriert die grosse internationale Bedeutung der Wärmepumpentechnik.

In Europa ist der Hauptbedarf für Raumkühlung auf die südlicheren Regionen beschränkt. In Zentral- und Nordeuropa überwiegt für gut ausgelegte Gebäude der Bedarf für die Raumheizung und die Warmwasserbereitung. Die Anzahl der Wärmepumpen für reine Heizzwecke liegt deutlich unter den oben erwähnten Zahlen für Klimatisierungsgeräte. Der Grund dafür liegt in der Tatsache, dass Wärme - im Gegensatz zu Kälte - auch durch kostengünstige Erdgas- und Heizölkessel erzeugt werden kann. Wärme kann sogar wie in der Steinzeit durch ein offenes Feuer erzeugt werden. Damit die komplexeren Wärmepumpen mit höheren Investitionskosten mit den einfachen Kesseln konkurrieren können, müssen sie hohen Effizienz- und Gesamtkostenanforderungen standhalten. Es ist für Wärmepumpen trotz steigenden Energiepreisen immer noch eine Herausforderung, diesen Wettbewerb im Interesse einer bedeutend besseren Primärenergienutzung zu gewinnen. **Dieser Bericht konzentriert sich auf die Entwicklung von Wärmepumpen zur ausschliesslichen oder hauptsächlichen Erzeugung von Wärme.** Die zusätzliche Nutzung der kalten Seite der Wärmepumpe (Kühlung) wird ebenfalls in die Betrachtungen einbezogen. Die Schweizer Beiträge zur internationalen Entwicklung werden hervorgehoben und ihr Zusammenhang mit den internationalen Meilensteinen der Wärmepumpen- und Kältetechnik wird aufgezeigt. Die Letztere hat die Entwicklung der Wärmepumpe wesentlich begünstigt. Dank der Massenproduktion für die Raumkühlung und die Kältetechnik stehen für Wärmepumpen kostengünstige Komponenten zur Verfügung. Soweit diese für die Wärmepumpentechnik relevant sind, werden deshalb auch ausgewählte Entwicklungen aus der Kältetechnik vorgestellt.

Zur Kältetechnik gibt es bereits zahlreiche detaillierte und zusammenfassende Publikationen. Die Umfassendste ist das Buch von [Thevenot 1979]. Dieser Bericht konzentriert sich auf den für die Wärmepumpentechnik wichtigeren Dampfkompessionsprozess (auch Kaltdampfprozess oder umgekehrter Rankine-Prozess). Im Hintergrund werden auch einige ausgesuchte Entwicklungen aus der Absorptionstechnik verfolgt. Auf Sonderlösungen wie den umgekehrten Stirling-Prozess, den magnetokalorischen Effekt und den thermoelektrischen Effekt wird im Kapitel 9 kurz eingegangen. Kälteprozesse ohne Bedeutung für Heizzwecke wie den Gaszyklus¹ (auch Brayton-Zyklus → Joule-Thomson Effekt), die Verdampfungskühlung und die Mischwärmeeffekte werden dagegen ausgeklammert.

¹ Es ist allgemein bekannt, dass der Gaszyklus weniger effizient ist als der Dampfkompessionsprozess. Dies wurde 1979 durch einen Gaszyklus-Wassererwärmer demonstriert. Dieser erreichte eine Leistungszahl von lediglich 1.29.

1 WARUM HEIZUNG MIT WÄRMEPUMPEN?

Bei der Heizung mit elektrischer Energie aus Wasserkraftwerken, Kernenergie oder Photovoltaik ist der Vorteil der Wärmepumpen mit einer Einsparung an elektrischer Energie bis zu 80% offensichtlich. Es gibt aber immer noch Skeptiker, wenn von Brennstoffen ausgegangen wird.

Das **Feuer** ist eher eine Entdeckung aus Zufall als eine Innovation. Vor rund 1.5 Millionen Jahren führte die prähistorische Menschheit das kontrollierte Feuer ein. Dies war für unsere Urahnen ein grosser Fortschritt, vergleichbar mit der Bedeutung der Erfindung der Dampfmaschinen oder der Elektrizität für uns. Das prähistorische offene Feuer wurde laufend verbessert und führte schliesslich zum modernen, kondensierenden Kessel. Solange es keine Nachschubprobleme für die Brennstoffe gab, war man mit der Verbrennung aller Arten von Brennstoffen zur Wärmeerzeugung zufrieden.



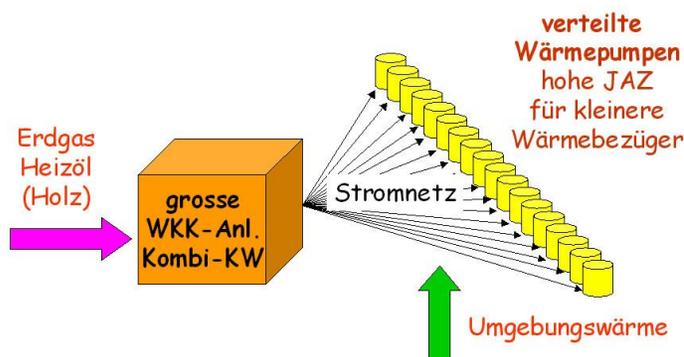
Aber auch ein moderner Kessel hat immer noch Verluste, und das einfache Verbrennungsprinzip erreicht deshalb nur einen Primärenergienutzungsgrad von etwas weniger als 100%. Oder anders ausgedrückt: Ein Kessel erzeugt von 100% Brennstoffenergie (Heizöl, Erdgas oder Biomasse) weniger als 100% Nutzwärme. Diese konventionelle Lösung zur Wärmeerzeugung ist eine Verschwendung von Exergie². In der Flamme eines Kessels mit einer Temperatur von 1800 °C und einer angenommenen Raumtemperatur von 20 °C beträgt der Anteil an Exergie 85.9% der Wärme. Ein Kessel nutzt diese hohe Qualität der Flammenenergie sehr schlecht. Bei einer Heizungsvorlauftemperatur von 40 °C beträgt

der Anteil an Exergie nur 6.4% der produzierten Wärme. Der Kessel vernichtet 92.5% der Exergie!

Das Grundkonzept einer effizienten Erzeugung von Niedertemperaturwärme

Das oben beschriebene „Steinzeitprinzip“ muss durch eine Kombination von Blockheizkraftwerken (oder effizienten Kombikraftwerken) mit Wärmepumpen gemäss dem Bild 1-1 ersetzt werden. Im Allgemeinen sind grössere Blockheizkraftwerke (BHKW) zur Beheizung grösserer Gebäude wie Schulen oder Bürogebäuden effizienter und wirtschaftlicher. Die dabei erzeugte elektrische Energie wird dann durch das Elektrizitätsnetz zu kleineren Gebäuden in der Nachbarschaft transportiert. Dort werden damit elektrische Wärmepumpen zur Gebäudeheizung und zur Warmwasserbereitung unter Nutzung der Umgebungswärme betrieben. Mit einem Einsatz von 100% an Brennstoffenergie (Heizöl, Erdgas oder Biomasse) können mit dieser Anordnung schon mit heutiger Technologie 150% bis 200% an Nutzwärme produziert werden (Nutzungsgrad 150% bis 200%). Das Bild 1-2 illustriert dies durch ein numerisches Beispiel mit den folgenden konservativen Annahmen:

Bild 1-1 Grundkonzept einer effizienten Produktion von Niedertemperaturwärme



² Exergie ist die maximale Arbeit, die aus Wärme produziert werden kann. Für Einzelheiten dazu sei auf Lehrbücher zur technischen Thermodynamik wie [Baehr 2005] oder [Moran and Shapiro 2007] verwiesen.

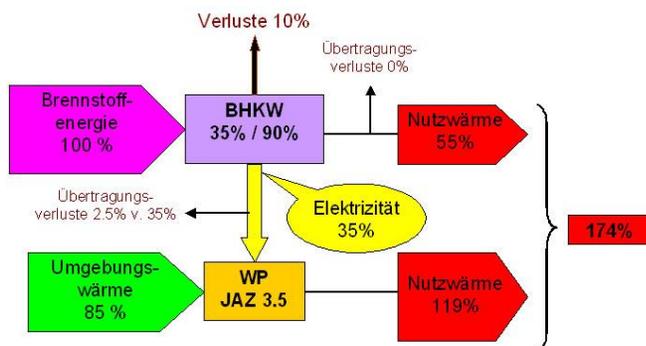


Bild 1-2 Beispiel für effiziente Heizung durch die Kombination BHKW–Wärmepumpe mit einem Nutzungsgrad von 174%

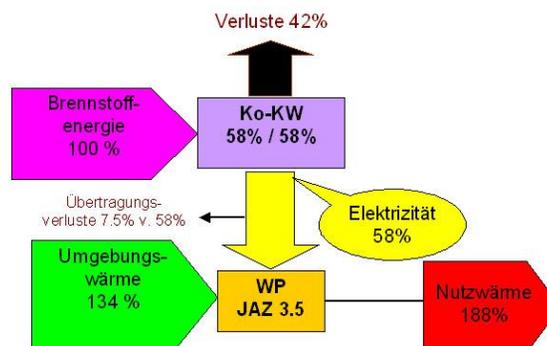


Bild 1-3 Beispiel für effiziente Heizung durch die Kombination Ko-KW–Wärmepumpe mit einem Nutzungsgrad von 188%

BHKW mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 35% und einem Gesamtwirkungsgrad von 90%, elektrische Leitungsverluste im Nahbereich 2,5% der elektrischen Energie, Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe 3,5. Künftig werden Nutzungsgrade dieses Systems über 200% zum Standard werden. Selbstverständlich können Blockheizkraftwerke mit Verbrennungsmotoren künftig auch durch Brennstoffzellen ersetzt werden. Hohe Nutzungsgrade in der gleichen Größenordnung liefert auch die Kombination moderner Kombikraftwerke (Ko-KW oder GuD) - selbst ohne Abwärmenutzung - mit Wärmepumpen: Bild 1-3 [Zogg 2002b].

2 GRUNDLAGEN DER WÄRMEPUMPENTECHNIK

Der Franzose Nicolas Léonard Sadi Carnot hat als erster eine präzise **Beziehung zwischen Wärme und Arbeit** formuliert. Erst 1871 wurden seine Manuskriptnotizen durch seinen Bruder gefunden. 1832 starb Carnot im frühen Alter von 36 Jahren an einer ansteckenden Krankheit. Sein Büchlein aus dem Jahr 1824 blieb unbekannt, da es nur privat publiziert wurde. Der entscheidende Beitrag von Carnots „Reflections“ ist, dass sich mechanische Energie vollständig in Wärme umwandeln lässt – dass Wärme aber nur teilweise in mechanische Energie umgewandelt werden kann. Der Franzose Benoît Paul Émile Clapeyron holte Carnots „Reflections“ aus dem Verborgenen und analysierte sie 1834 in einer Denkschrift. Clausius hat Carnots Ideen 1850 neu formuliert.

1842 fand der Deutsche Robert Julius von Mayer das Prinzip der **Äquivalenz zwischen Arbeit und Wärme**. Der Engländer James Prescott Joule hat 1843 dafür den experimentellen Nachweis erbracht. Der Deutsche Hermann von Helmholtz hat 1847 das **Energieerhaltungsgesetz** in allgemeiner Form publiziert. Damit war das **erste Gesetz der Thermodynamik** gesichert. Der deutsche Physiker und Mathematiker Rudolf Julius Emanuel Clausius ist einer der Begründer der modernen Thermodynamik [Cardwell 1971]. Durch seine bereits erwähnte Neuformulierung des Carnot'schen Kreisprozesses stellte er die Theorie der Wärme auf eine wissenschaftlich klare Basis. Mit seiner wichtigsten Publikation zur mechanischen Theorie der Wärme formulierte er 1850 als erster die Grundidee des **zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik**. In dieser Publikation war auch bereits das Konzept der **Entropie** enthalten. Diesen Begriff führte er aber erst 1865 ein [Clausius 1865]. Clausius war übrigens von 1855 bis 1867 Professor an der ETH Zürich [Thevenot 1979], [Carnot et al. 2003].

Unabhängig von Clausius (und ohne dessen Priorität zu bezweifeln) fand William Thomson, der spätere Lord Kelvin, 1851 eine allgemeinere Formulierung des zweiten Hauptsatzes und

führte 1852 die **thermodynamische Temperaturskala** ein. 1866 gab der österreichische Physiker, Ludwig Eduard Boltzmann, eine neue Bedeutung, indem er das Konzept der Entropie mit dem Konzept der Wahrscheinlichkeit in der statistischen Physik verband. Die Entropie repräsentiert danach den Grad der Unordnung und das Carnot-Prinzip wurde damit verständlicher.

Carnot³

Mayer



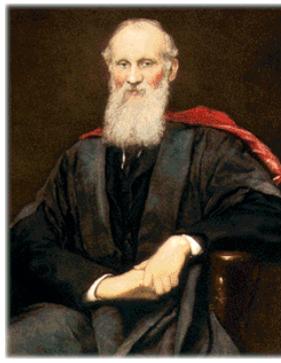
Joule



Helmholtz



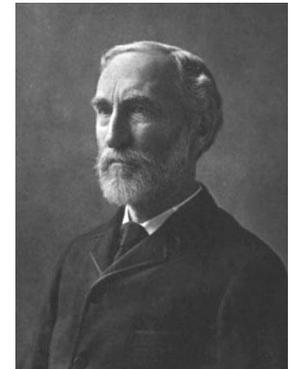
Clausius



Thomson/Kelvin



Boltzmann



Gibbs

1873 bis 1878 führte der Amerikaner Josiah Willard Gibbs den Begriff der **Enthalpie** in die theoretische Thermodynamik ein. Richard Mollier brachte diese Grösse dann 1902 in die angewandte Thermodynamik und benutzte sie als eine Koordinate (die andere war die Entropie oder der Druck) in seinen thermodynamischen Diagrammen für Ammoniak und CO₂. Ab 1904 führte er mit seinen Diagrammen eine graphische Visualisierung des Dampfkompansionszyklus ein und trug damit zur Verständlichkeit und leichten Berechenbarkeit dieses Prozesses bei.

Aus den Überlegungen von G. Zeugner (1859) und Hans Lorenz (1896) entstand das Konzept der **Exergie**, der maximalen Nutzarbeit, welche bei einer Zustandsänderung von einer konstanten Wärmequellentemperatur auf eine konstante Endtemperatur gewonnen werden kann. Diese Idee wurde wieder aufgegriffen von Fran Bosnjakovic (1935) und nach 1950 von Peter Grassmann und Kurt Nesselmann.

1870 hielt Carl von Linde⁴ Vorlesungen zur Theorie der Kältemaschinen an der "Königlichen Polytechnischen Schule" in München. Er legte in seiner Arbeit zum Wärmeentzug bei tiefen Temperaturen mit mechanischen Mitteln den Grundstein zu einer sauberen thermodynamischen **Theorie der Kältetechnik**. Aufgrund eines thermodynamischen Vergleichs zeigte Linde bereits die Überlegenheit der Dampfkompansion gegenüber dem damals noch üblichen Absorptionsprozess und anderen Prinzipien zur Kälteerzeugung.

Der belgische Chemiker Frederic Swarts legte zwischen 1890 und 1893 mit seinen Arbeiten zu den aliphatischen Fluorkohlenstoffen den Grundstein zur organischen **Fluorchemie**. In den

³ Alle Bilder aus *Wikipedia*.

⁴ von Linde studierte von 1861 bis 1863 an der ETH Zürich (sie hiess damals "Polytechnikum"). Clausius war dort einer seiner Lehrer.

1910er Jahren führte Edmund Altenkirch umfassende thermodynamische Studien zu Zweistoffgemischen für **Absorptionskältemaschinen** durch. Sein zweistufiges Absorptionsaggregat hatte bereits eine hohe Effizienz.

[Thevenot 1979], [Burget et al. 1999], [Nagengast et al. 2006].

Aus den Erkenntnissen der erwähnten Wissenschaftler werden in diesem Bericht die folgenden Grössen benötigt:

Die **Leistungszahl** oder der "coefficient of performance" eines idealen Carnot-Wärmepumpen-Prozesses COP_{rev} (theoretischer Maximalwert des COP) beträgt mit den absoluten Temperaturen auf der warmen Seite T_H (Wärmesenke) und auf der kalten Seite (Wärmequelle) T_C :

$$COP_{rev} = \frac{T_H}{T_H - T_C} \quad (1)$$

Die Leistungszahl oder der "coefficient of performance" einer realen elektrisch angetriebenen Wärmepumpe

$$COP = \frac{\text{abgegebene_Nutzwärmeleistung}}{\text{aufgenommene_elektrische_Leistung}} \quad (2)$$

ist wesentlich kleiner. Bei Wärmepumpenprozessen würden die Temperaturen der Wärmequelle und der Wärmesenke nur bei unendlichen Volumenströmen konstant bleiben. Um Wärmepumpen trotzdem vergleichen zu können, ist es praktisch, mit der Eintrittstemperatur der Wärmequelle T_{Cein} und der Austrittstemperatur der Wärmesenke (Heizungsvorlauftemperatur) T_{Haus} zu rechnen. Dies führt zu einer brauchbaren Näherung für den exergetischen Wirkungsgrad, dem **Lorenz-Wirkungsgrad**:

$$\eta_{Lorenz} = \frac{COP}{\frac{T_{Haus}}{T_{Haus} - T_{Cein}}} \quad (3)$$

Für den Vergleich ganzer Systeme einschliesslich der Produktion an elektrischer Energie dient der Nutzungsgrad des Gesamtsystems oder die "primary energy ratio" PER:

$$\text{Nutzungsgrad} = \text{PER} = \frac{\text{abgegebene_Nutzwärme}}{\text{aufgenommene_Primärenergie}} \quad (4)$$

Der Nutzungsgrad erlaubt den direkten Vergleich elektrisch betriebener Wärmepumpen mit Absorptionswärmepumpen. Bei mit Brennstoffen betriebenen Systemen entspricht die aufgenommene Primärenergie der zugeführten Brennstoffenergie⁵.

⁵ In Anpassung an die internationale Verwendung der Kennzahl "PER" wird hier nicht zwischen der eigentlichen Primärenergie und der Endenergie unterschieden.

3 DIE PIONIERE VOR 1875

Wie bei vielen anderen Technologien auch zu beobachten ist, gingen Innovationen und erste technische Entwicklungen von geschickten Erfindern und Visionären aus. Die wissenschaftliche Erfassung und Optimierung erfolgte im Allgemeinen erst später. Die fand in der Kälte- und Wärmepumpentechnik erst ab ungefähr 1875 statt.

Lord Kelvin hat die Wärmepumpe bereits 1852 vorausgesagt, in dem er bemerkte, dass eine "umgekehrte Wärmekraftmaschine" nicht nur zum Kühlen, sondern auch für Heizzwecke eingesetzt werden könnte. Er erkannte, dass eine solche Heizeinrichtung dank dem Wärmeentzug aus der Umgebung weniger Primärenergie benötigen würde [Thomson 1852], [Ostertag 1946]. Aber es sollte noch rund 85 Jahre dauern, bis die erste Wärmepumpe für die Raumheizung in Betrieb ging. In der Periode vor 1875 wurden Wärmepumpen zu Heizzwecken erst für die Brüdenkompression in Salzwerken mit ihren offensichtlichen Vorteilen zur Holz- und Kohleeinsparung verfolgt. Die spätere Entwicklung der Wärmepumpe basiert jedoch auf Erfindungen zur Deckung des insbesondere in der Nahrungsmittelindustrie enormen Bedarfs zur Kühlung. Als eine vorbereitende Entwicklung für die späteren Wärmepumpen zur Raumheizung ist die Einführung der Warmwasser-Zentralheizung bedeutend. Zu jener Zeit wurden Zentralheizungen mit Dampf betrieben. Die Firma Sulzer (Winterthur) installierte bereits 1867 die erste **Wasser-Zentralheizung** in einem privaten Wohngebäude im schweizerischen Oberuzwil. Nebst dünneren, kostengünstigeren Rohrleitungen und einem gesteigerten Wohnkomfort brachte dieses neue Heizungssystem den für Wärmepumpen wichtigen Vorteil tieferer Vorlauftemperaturen. Dies vermochte den Anforderungen einer Wärmepumpenheizung allerdings noch nicht zu genügen. Die ersten Warmwasser-Zentralheizungen wurden nämlich mit freier Konvektion ohne Umwälzpumpen betrieben. Dies funktioniert erst oberhalb von Vorlauftemperaturen um 50°C einwandfrei [Brügger et al. 1991].

Gegenüber der seit über mehr als einer Million Jahren bekannten Wärmeproduktion durch Verbrennung gab es noch keine Lösung für die künstliche Kühlung. Einzige Ausnahme war die Verdunstungskühlung, die bereits durch die Zivilisationen Indiens und Ägyptens angewandt wurde. Dies änderte erst durch die Erfindung der Kältemaschinen vor rund 150 Jahren. Zur Kühlung diente natürliches Eis, das sogar über internationale und interkontinentale Distanzen transportiert wurde. Noch 1890 wurde von einer Knappheit an natürlichem Eis berichtet. Deshalb lag die **Priorität** der ersten Entwicklungen bei der **künstlichen Kälteerzeugung**. Die einzige Ausnahme war wie bereits erwähnt die Brüdenkompression mit ihrem enormen Einsparpotenzial. Wärmepumpen zur Raumheizung und zur Warmwasserbereitung waren damals infolge der geringen Effizienz des Dampfmaschinenantriebs nicht attraktiv.

3.1 Komponenten und Kältetechnik

Im Hinblick auf die Entwicklung der Wärmepumpen ist der Dampfkompessionsprozess wesentlich wichtiger als der Absorptionsprozess. Deshalb werden Absorptionsprozesse nur am Rande erwähnt.

3.1.1 Dampfkompessionsprozess

Jacob Perkins, ein amerikanischer Erfinder, der in England lebte, hat 1834 die **erste funktionierende Dampfkompessionsmaschine** zur künstlichen Eisproduktion gebaut. Es wird angenommen, dass damit erstmals eine mechanische Kälteerzeugung erfunden wurde. Die Erfindung von Perkins blieb beinahe 50 Jahre lang unbekannt. Die mit Ether betriebene Kältema-

schine enthielt aber die vier Hauptkomponenten einer modernen Kältemaschine: einen Kompressor, einen Kondensator, einen Verdampfer und ein Expansionsventil. Perkins hatte sehr weitreichende technische Interessen und befasste sich insbesondere auch mit Dampfmaschinen, dem Gravieren für die Banknotenherstellung, der Massenfertigung von Nägeln und der Herstellung eines Barometers.

1849 begann der Amerikaner Alexander C. Twining mit der Dampfkomppressionskühlung und der Eisherstellung. 1855 präsentierte er die **erste kommerzielle Eisproduktionsanlage**. In Australien begann James Harrison mit Versuchen zur Dampfkomppressionskühlung für die Herstellung von Eis. Er entwickelte 1856 den ersten praktisch einsetzbaren Kompressor und führte die Dampfkomppressionskühlung in das Bierbrauen und die Fleischverpackung ein. 1861 waren bereits ein Dutzend seiner Maschinen im Einsatz.

Charles Tellier führte 1863 **Methylether** als Kältemittel ein. Auch die erste 1875 durch den Deutschen von Linde konstruierte Kältemaschine verwendete Methylether als Kältemittel. Sie wurde 1877 in einer Brauerei in Italien installiert [Linde 2004]. Der Amerikaner Thaddeus S.C. Lowe führte 1866 mit der Erfindung eines funktionierenden **CO₂ Kompressors Kohlendioxid** als Kältemittel ein. 1867 patentierte er sein Kohlendioxid-Kältesystem. Es erfuhr allerdings erst nach 1990 zur Kühlung auf Schiffen einen grossen Erfolg und ersetzte dort die Luftexpansionsmaschinen. In Amerika haben John Beath 1858 eine Anlage zur Eisherstellung mit einer **Ammoniak** – Dampfkomppressionsmaschine und Francis DeCoppet 1869 einen **doppelt wirkenden Ammoniak-Kompressor** konstruiert. Der in Schottland geborene Amerikaner David Boyle baute seinen ersten Ammoniakkompressor 1873 im Alter von 23 Jahren! Die Maschinen von Boyle entsprachen jenen eines geschickten Mechanikers. Der **Schweizer** Roul Pictet befasste sich als Professor in Genf mit der Verflüssigung von Gasen. Er führte 1874 **Schwefeldioxid SO₂** als Kältemittel ein. Dieses hatte den Vorteil, selbstschmierend zu wirken und es war auch unbrennbar. Allerdings entstand im Kontakt mit Feuchtigkeit schweflige Säure und anschliessend Schwefelsäure. Damit ergaben sich grosse Korrosionsprobleme. Erwähnenswert ist auch die Erfindung eines **thermostatisch geregelten** Kälteprozesses durch Peter Van der Weyde im Jahr 1870.

[Thevenot 1979], [Nagengast et al. 2006], [Cleveland und Saundry 2007].

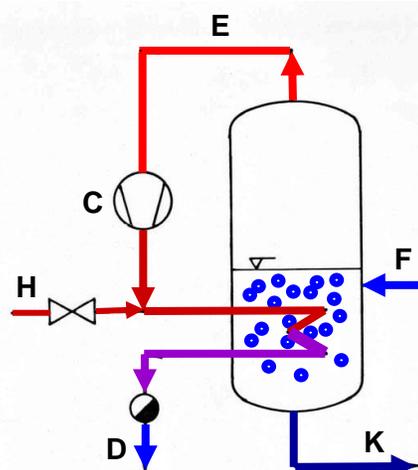
3.1.2 Absorptionsprozess

1851 legte der Franzose Ferdinand Carré das **erste** kommerziell erfolgreiche Ammoniak-**Absorptionskältesystem** aus und führte **Ammoniak** als Kältemittel ein. Zum einen wurde ein kleines, absatzweise arbeitendes Aggregat für die Produktion von 0.5 bis 2 kg Eis pro Ansatz produziert. Allerdings verhinderten Kosten, Grösse und Komplexität des Kälteaggregats gekoppelt mit der Toxizität von Ammoniak eine allgemeine Verbreitung bei privaten Anwendern. Zum andern wurde eine **Version für kontinuierlichen Betrieb** gebaut. Diese war erfolgversprechender und wurde 1859/1860 in Frankreich, England und in den U.S.A. patentiert. Carré's Maschinen wiesen alle Elemente moderner Absorptionsaggregate einschliesslich eines Verdampfers mit Rektifikator auf. Diese Kältemaschine wurde bereits 1860 durch Migon&Rouart in Paris gebaut. Zunächst wurden fünf Modelle zur Produktion von 12 kg bis 100 kg Eis pro Stunde hergestellt. Die kontinuierliche Absorptionskältemaschine wurde zur **ersten Kältemaschine**, die eine allgemeine **industrielle Bedeutung** erlangte. Die erfolgreiche Maschine wurde verschiedentlich verbessert, in mehrere Länder exportiert und auch in mehreren Ländern produziert. Im nördlichen Teil der U.S.A. wurde die künstliche Kälteerzeugung zuerst in Brauereien genutzt. Den Anfang machte 1870 die S. Liebmann's Sons Brewing Company in Brooklyn, New York, mit einer Absorptionsmaschine. Die Entwicklungen waren meist empirischer Art. Eine theoretische Erfassung des Absorptionsprozesses erfolgte erst sehr viel später – insbesondere durch den Deutschen Altenkirch im Jahr 1913 [Thevenot 1979].

3.2 Brüdenkompression

Konzentrieren und Verdampfungskristallisation ist ein wichtiger verfahrenstechnischer Prozess mit weltweiter Anwendung in grossen Anlagen. Bei der Brüdenkompression wird der beim Eindampfen einer Lösung entstehende Dampf – der Brüden – auf einen höheren Druck komprimiert. Dadurch kann die Kondensationstemperatur über den Siedepunkt der einzudampfenden Lösung angehoben werden. Damit kann die Kondensationswärme der Brüden der zu verdampfenden Lösung zugeführt werden: Bild 3-1. Obwohl dabei die Erhöhung des Siedepunktes der Lösung gemäss dem Raoult'schen Gesetz⁶ berücksichtigt werden muss, genügt oft schon eine geringe Temperaturdifferenz. Dies ist natürlich ideal für einen Wärmepumpenprozess. Stand der Technik sind heute Leistungszahlen über 15. Das ist der Grund, weshalb die Brüdenkompression schon viel früher realisiert wurde als Wärmepumpen zur Raumheizung und andere Niedrigtemperaturanwendungen.

Bild 3-1 Vereinfachtes Prinzip der Brüdenkompression ohne zusätzliche Wärmerückgewinnung durch Vorwärmen des Zulaufs mit dem Kondensat.
C Kompressor, D Kondensat, E Brüden, F Zulauf, H Heizdampf, K Konzentrat



Eine der Hauptanwendungen der Brüdenkompression ist die **Produktion von Kochsalz** aus einer Salzlösung. Der enorme Energiebedarf solcher Prozesse lässt sich aus der Tatsache erkennen, dass für die Gewinnung von 1 kg Kochsalz etwa 3 kg Wasser verdampft werden müssen. Dafür wurden früher ganze Wälder abgeholzt.

Der österreichische Ingenieur Peter von Rittinger versuchte als erster, die Idee der Brüdenkompression in einer kleinen Pilotanlage zu realisieren. Seine theoretischen Überlegungen aus dem Jahr 1855 ergaben gegenüber direkter Beheizung mit einer Holzfeuerung durch die Brüdenkompression eine mögliche Energieeinsparung von 80%. Er legte eine entsprechende Anlage aus und baute sie. Er realisierte damit die **erste bekannte Wärmepumpe für reine Heizzwecke** mit einer Leistung von 14 kW für die Saline Ebensee in Oberösterreich. Die Inbetriebnahme von Rittingers „Dampfpumpe“ erfolgte **1857**. Aber es blieb mit seinem geschlossenen Kreislauf bei einem Experiment. Die technische Reife war noch nicht erreicht. Neben dem etwas eigenartigen geschlossenen Kreisprozess traten zu viele Prozessprobleme auf. Davon sind der ungeeignete Batch-Verdampfer mit zu zahlreichen Unterbrechungen für die Salzentnahme oder die Belagsbildung auf den Verdampferoberflächen durch Gips und Kalk zu erwähnen [Wirth 1955, 1995], [Lieberherr 2007].

⁶ Raoult'sches Gesetz für ideale Lösungen: Der Partialdruck p_i einer Komponente i ist proportional zu ihrem molaren Anteil in der Lösung x_i (< 1) und dem Dampfdruck der reinen Komponente p_{bi} : $p_i = p_{bi} \cdot x_i$. Bei nur einer flüchtigen Komponente (z.B. Wasser) in der Lösung ist der Gesamtdruck gleich dem Partialdruck dieser Komponente ($p_i = p$). Der Dampfdruck dieser Komponente beträgt dann $p_{bi} = p / x_i$. Er ist also grösser als bei der Verdampfung der reinen Komponente. Entsprechend höher ist die Siedetemperatur. Man nennt diesen Effekt Siedepunkterhöhung. Beispiel in [Zogg 1983].

4 INDUSTRIALISIERUNG 1876-1918

In dieser Periode wurden die Funktionsmuster der Pioniere auf der Basis einer rasch fortschreitenden wissenschaftlichen Durchdringung und dem Fortschritt der industriellen Produktion durch **verlässlichere** und besser ausgelegte **Maschinen** ersetzt. Die Kältemaschinen und –anlagen wurden zu industriellen Produkten und im industriellen Massstab gefertigt. Die bedeutendste Persönlichkeit, die diesen Wandel einleitete, war der Deutsche Carl von Linde. Er war nicht nur ein talentierter Ingenieur und Unternehmer, sondern auch ein hervorragender akademischer Lehrer und Forscher. Im Mittelpunkt der Aktivitäten seines Münchner Instituts standen die praktischen Anwendungen. Bereits 1875 führte die Polytechnische Gesellschaft von München unter der Leitung von M.Schröter erste Vergleichstests mit Kältemaschinen durch.

Um 1900 lagen die meisten fundamentalen Innovationen der Kältetechnik bereits vor. 1918 gab es schon viele Kompressorhersteller in den U.S.A. und in Europa. In der Schweiz waren dies Escher Wyss in Zürich, Sulzer in Winterthur und die Société Genevoise in Genf [Thevenot 1979].

Zu jener Zeit blieben Wärmepumpen Visionen einiger Ingenieure. Der Schweizer Turbineningenieur Heinrich Zoelly⁷ hat als erster eine elektrisch angetriebene **Wärmepumpe mit Erdwärme** als Wärmequelle vorgeschlagen. Er erhielt dafür 1919 das Schweizer Patent 59350. Aber der Stand der Technik war noch nicht bereit für seine Ideen [Wirth 1955].

4.1 Komponenten und Kältetechnik

Die **Drehzahl der Kompressoren** wurden langsam gesteigert. Um 1890 lag in den U.S.A. die mittlere Drehzahl für einen 350 kW Kompressor bei 40 U/min. 1916 erreichte sie bereits 220 U/min. Die schweren Kompressoren beanspruchten viel Raum und ihre Effizienz war ziemlich bescheiden. Sie waren aber meist überraschend langlebig. Es sind Maschinen bekannt, welche während 75 Betriebsjahren nie gewartet wurden. **Dampfmaschinen** dienten zu jener Zeit als Hauptantrieb von Kompressoren: Bild 4-1. Die Elektromotoren steckten noch in den Kinderschuhen. Die Entwicklung in den U.S.A. ist dafür typisch: 1914 wurden 90% der Kompressoren durch Dampfmaschinen angetrieben. Aber nach 1920 ging dieser Anteil rasch zurück.

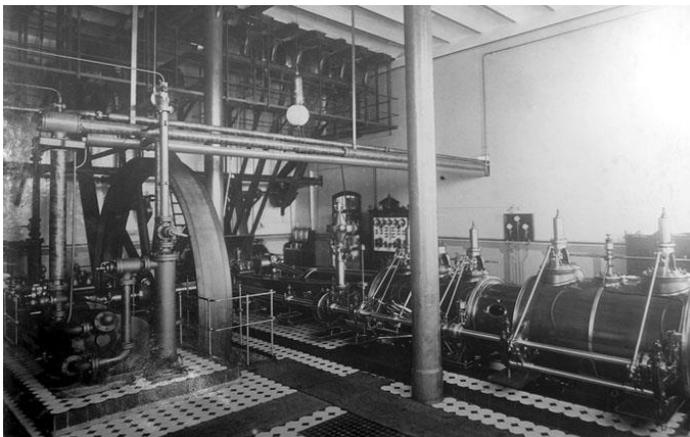


Bild 4-1 Ein durch eine Sulzer Dampfmaschine (rechts) angetriebener Sulzer Kolbenkompressor (links), um 1905
[Archiv Sulzer, CH-8401 Winterthur]

⁷ Heinrich Zoelly konstruierte 1903 die erste Impuls-Dampfturbine (Gleichdruck-Dampfturbine) der Welt.

Gegen das Ende dieser Periode war Ammoniak das dominierende **Kältemittel**. Kohlendioxid (CO_2) war für die Kühlung auf englischen Schiffen üblich. Schwefeldioxid (SO_2) wurde in grösseren industriellen Anlagen immer weniger gebraucht. In kleineren gewerblichen Kompressoren wurde es aber weiterhin verwendet. Methylchlorid (CH_3Cl) wurde hauptsächlich in Frankreich für kleine und mittlere Anlagen eingesetzt. In begrenztem Umfang wurden aber noch weitere Kältemittel wie die Kohlenwasserstoffe Propan (C_3H_8) und Isobutan (C_4H_{10}) verwendet [Thevenot 1979], [Fischer 2004].

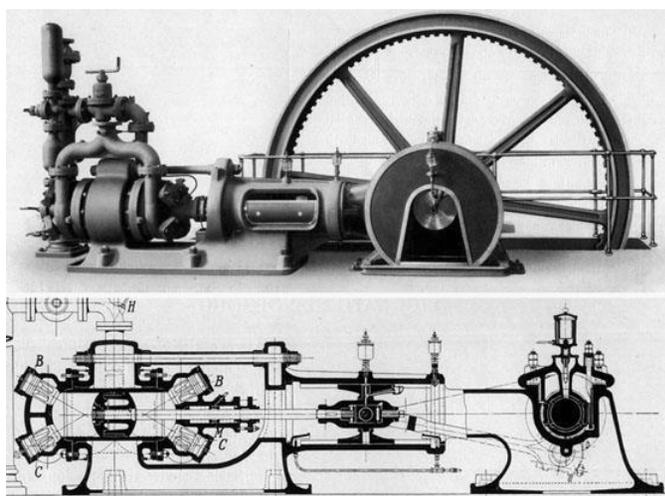
4.1.1 Dampfkompessionsprozess

AMMONIAK

Carl von Linde verhalf dem **Ammoniakkompressor** zum eigentlichen Durchbruch. Im Gegensatz zu seinen Vorgängern entwickelte er seine Maschinen mit einem wissenschaftlichen Ansatz, und er verfolgte eine hohe Qualität in der Fertigung. Linde's neuer Ammoniakkompressor wurde 1877 in einer Brauerei in Triest installiert und war dort bis 1908 in Betrieb. 1877 konstruierte Linde einen verbesserten Kompressor mit horizontalem, doppelt wirkendem Zylinder. Diese Maschine wurde sofort zum grossen Erfolg und war Gegenstand zahlreicher Patente. Später haben viele Konstrukteure auf diesem Vorbild aufgebaut. Der Kompressor wurde unter **Linde-Lizenz** durch viele Firmen gebaut: in Deutschland durch Augsburg (spätere MAN), in der Schweiz von Sulzer, in Belgien durch Carels, in England durch Morton & Burton und in den U.S.A. durch Fred Wolf. Damit wurde Ammoniak rasch zum wichtigsten Kältemittel.

1867 und 1885 wurde durch den Australier W.G.Lock ein Zweistufen-Verbundkompressor für Ammoniak patentiert. Aber die erste industrielle Anwendung erfolgte 1889 mit dem Bau eines Ammoniak-**Zweistufenkompressors** durch die Schweizer Firma **Sulzer**. Ein weiterer Zweistufenkompressor wurde von Stuart Saint Clar konstruiert und durch York in den U.S.A. gefertigt.

Bild 4-2 Sulzer Kompressor,
Lizenz Linde,
um 1905
[Archiv Sulzer,
CH-8401 Winterthur]



Um die Jahrhundertwende war der horizontale Zweistufen-Ammoniakkompressor von Linde die übliche Ausführung für die wichtigsten Kälteanlagen: Bild 4-2. Sulzer Winterthur gehörte zu den wichtigsten Herstellern für Linde. **Sulzer** begann mit der Konstruktion von Kältekompressoren und Kälteanlagen im Jahr 1878. Dies als logische Erweiterung ihrer Aktivitäten in den Abteilungen Dampfmaschinen⁸ und Kompressoren. Obwohl Kälteanlagen zu jener Zeit gross und schwer waren, exportierte Sulzer 1878 eine Anlage zur Produktion von Eis nach Bombay in Indien. Ihre beiden Kolbenkompressoren wurden durch zwei Sulzer Dampfmaschinen mit je 37 kW Leistung angetrieben. Die **erste Kälteanlage in der Schweiz** wurde 1879 in der Braue-

⁸ Sulzer begann bereits 1851 mit dem Bau von Dampfmaschinen und baute 1867 die erste horizontale Ventil-Dampfmaschine [Kläy 1994].

rei Hürlimann in Zürich installiert. 1909 baute Sulzer einen 1.45 MW Kältekompressor und 1914 eine Klimaanlage für ein Hotel in Buenos Aires.

[Thevenot 1979], [Kläy 1994], [Nagengast et al. 2006], [Friothersm 2008].

ANDERE KÄLTEMITTEL

Franz Windhausen legte 1880 eine **CO₂- Kältemaschine** aus und konstruierte 1886 einen funktionierenden CO₂ Kältekompressor. 1889 entwickelte J.& E. Hall eine sehr erfolgreiche **zweistufige CO₂ – Maschine** für industrielle Anwendungen.

1876 baute der Schweizer Raoul Pictet einen neuen horizontalen **SO₂ Kompressor**, der ohne Schmiermittel auskam. Die sogenannte „Pictet Maschine“ war ein sofortiger Erfolg und fand in Europa eine recht grosse Verbreitung. Sie wurde gleichzeitig in Genf (durch die Genfer Gesellschaft für physikalische Instrumente „Société Genevoise“) und Paris und anschliessend noch in einigen weiteren Ländern gebaut. Bei grossen Anlagen verdrängte Ammoniak allerdings zusehends das Schwefeldioxid als Kältemittel.

Vincent führte 1878 das Kältemittel **Methylchlorid** (CH₃Cl, auch Chlormethan) ein. Methylchlorid-Kompressoren wurden ab 1885 durch die Pariser Firma Crespin & Marteau hergestellt. Aus dieser wurde später die Firma Douane. 1900 konstruierte Douane einen neuen 70 kW Kompressor. Er wurde in der Schweiz ab 1913 durch die Firma **Escher Wyss** und ab 1920 auch in den U.S.A. gefertigt.

Cassius Palmer führte 1883 Ethylchlorid (C₂H₅Cl, Chlorethan) als Kältemittel ein und ab 1884 verbreitete Raoul Pictet ein **Gemisch aus SO₂ und CO₂**, die sogenannte **Pictet-Flüssigkeit** [Thevenot 1979], [Nagengast et al. 2006].

KOMPRESSOREN

In Deutschland wurde 1878 das Prinzip des **Schraubenkompressors** durch Heinrich Krigar patentiert. Später verbesserte er seine Konstruktion und meldete ein zweites Patent an. Beide Patente zählen zu den frühesten deutschen Patenten, da das Deutsche Patentamt erst ein Jahr zuvor gegründet wurde. Es war zu jener Zeit allerdings noch nicht möglich, die Erfindung umzusetzen, da die Fertigungstechnik dafür noch nicht bereit war. Bis zur praktischen Realisierung eines Schraubenkompressors sollte es noch rund fünfzig Jahre dauern.

Eine der ersten **Flügelzellenmaschinen**, das Lemielle-Gebläse, wurde in den frühen 1880er Jahren in Frankreich erfunden. Es fand in Belgien eine weite Verbreitung zur Lüftung von Kohlebergwerken. Der Übergang von schwenkbaren Flügeln zu im Rotor gleitenden Flügeln war dann nur noch ein relativ kleiner Schritt. Das Prinzip der **Flügelzellenkompressoren** mit gleitenden Flügeln geht auf die frühen 1900er Jahre zurück, als der Amerikaner Robert Blackmer die erste Flügelzellenpumpe erfand. 1909 wurde aus diesem Pumpenprinzip ein mit Methylchlorid betriebener Flügelzellenkompressor für Kühlzwecke auf dem amerikanischen Schiff „Carnegie“ entwickelt. Aber es dauerte noch bis 1920, bis der moderne Flügelzellenkompressor für den praktischen Gebrauch bereit war.

Die ersten **Turbokompressoren** wurden anfangs der 1900er Jahre gefertigt. Sie wurden ursprünglich durch Dampfturbinenhersteller entwickelt und fanden verbreiteten Einsatz zur Belüftung von Bergwerken, insbesondere im Kohlenabbau. Zu jener Zeit waren die Herstellungsmöglichkeiten von Rotoren aber durch die damals verfügbare Fertigungstechnik noch sehr beschränkt. Bis zur Herstellung effizienter Turbokompressoren dauerte es noch Jahrzehnte. Der Amerikaner Willis Carrier (1876-1950) suchte nach einem kompakteren Kompressortyp als den damals üblichen, voluminösen Kolbenkompressoren. Er hat sich deshalb ab 1911 als erster eingehend mit **Radialkompressoren** für Klimaanlagen befasst. Um 1919 versuchte er es zuerst mit einem Radialkompressor für Dichlorethylen (C₂H₂Cl₂) aus deutscher Fertigung und dann mit einem solchen von Eastman Kodak aus den U.S.A. für Dichlormethan (CH₂Cl₂).

Bei kleinen Kompressoren wurde ein viel zu hoher Anteil der Antriebsenergie in den Stopfbuchs-Dichtungen vernichtet. Zur Überwindung dieses Problems begannen sich die Erfinder mit dem Prinzip **hermetischer Kompressoren** mit Antriebsmotor und Kompressor in einem einzigen Gehäuse zu befassen. Der Franzose Marcel Audiffren hat das Prinzip 1905 mit einer noch etwas kuriosen technischen Lösung realisiert. Aber die Elektromotoren jener Zeit waren mit ihren Bürsten, Kommutatoren und einer rudimentären Isolation für den Bau hermetischer Kompressoren noch ungeeignet. Zu einem kommerziellen Durchbruch kam es erst nach dem ersten Weltkrieg. 1920 baute der Australier Douglas Stokes den ersten hermetischen „Motor-Kompressor“.

Das Prinzip des **Scrollkompressors** wurde bereits 1905 durch den Franzosen Leon Creux patentiert. Wie beim Schraubenkompressor ermöglichte die damalige Fertigungstechnik aber noch keine wirtschaftliche Herstellung der komplizierten spiralförmigen Flügelräder. Die kommerzielle Umsetzung erfolgte erst in den späten 1980er Jahren. Weiter ist erwähnenswert, dass der französische Ingenieur Henri Corblin 1919 den **Membrankompressor** patentierte. [Thevenot 1979], [Cashflo 2007], [Nagengast et al. 2006].

VERSCHIEDENES

1895 setzte De la Verne in den U.S.A. vermutlich erstmals einen **Dieselmotor** zum Antrieb des Kompressors ein. Bemerkenswert ist auch die Einführung von **Kork** als Isolationsmaterial durch Grünzweig im Jahr 1880. Gegen 1900 erschien in der Kältetechnik nach den Doppelrohr- und Mehrrohrkonstruktionen der **Rohrbündelkondensator**. Darin strömte das Wasser in den Rohrleitungen und das Kältemittel kondensierte auf der Aussenseite der Rohre. 1902 installierte Vilter in den U.S.A. einen **Flüssigkeitsabscheider** in der Ansaugleitung der Kompressoren, um den Kompressor trocken betreiben zu können [Thevenot 1979], [Nagengast et al. 2006].

4.1.2 Absorptionsprozess

Der direkte Antrieb durch Dampf war einer der Hauptgründe für die Dominanz der Absorptionskältesysteme bis ungefähr 1890. Die Elektrizität musste damals unter geringem Wirkungsgrad durch Dampfmaschinen produziert werden. Das **Hybridsystem** (Kombination von Absorptions- und Kompressionsprozess) wurde in Australien und Deutschland bereits 1895, in Paris 1900 und in den U.S.A. 1916 eingeführt.

Auch der kontinuierliche Diffusions-Absorptionsprozess, welcher ohne Lösungsmittelpumpe auskommt, wurde von H. Geppert bereits im Jahr 1899 patentiert. Er benutzte dafür aber noch Luft anstelle von Inertgasen, was einem Erfolg der Erfindung im Wege stand [Thevenot 1979], [Burget et al. 1999].

4.2 Brüdenkompression - Schweizerische Pionierleistungen

Vermutlich angeregt durch die Experimente von Rittinger in Ebensee, wurde in der Schweiz 1876 von Antoine-Paul Piccard⁹ von der Universität Lausanne und dem Ingenieur J.H. Weibel von der Firma Weibel-Briquet in Genf die **weltweit erste wirklich funktionierende Brüdenkompressionsanlage** gebaut. **1877** wurde diese **erste Wärmepumpe der Schweiz** in der

⁹ Antoine-Paul Piccard wurde 1844 in Lausanne geboren. Von 1869 bis 1881 war er Professor an der technischen Fakultät der Universität (Akademie) Lausanne. Seine Innovationen umfassten auch Wasserturbinen (Niagara und andere). Als Unternehmer gründete er die Firma "Piccard et Pictet" in Genf, aus der später die "Atelier des Charmilles" hervorgingen. Piccard starb im Jahr 1929 [Kemmer 2008].

Saline Bex installiert. Diese Anlage (Bild 4-3) war wesentlich grösser als der Prototyp von Rittinger und produzierte in kontinuierlichem Betrieb rund 175 kg Kochsalz pro Stunde: Bild 4-4. Diese Anlage wies nun einen echten offenen Wärmepumpenprozess auf. Als Kompressor diente ein zweistufiger Kolbenkompressor: Bild 4-5.

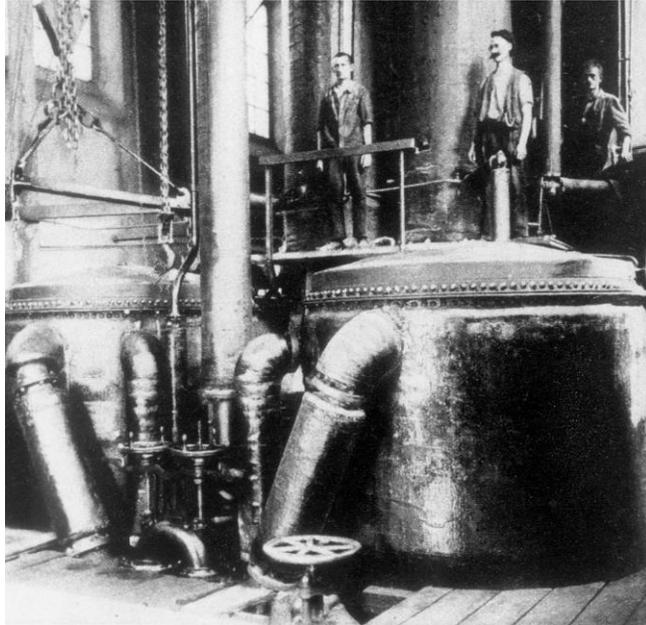
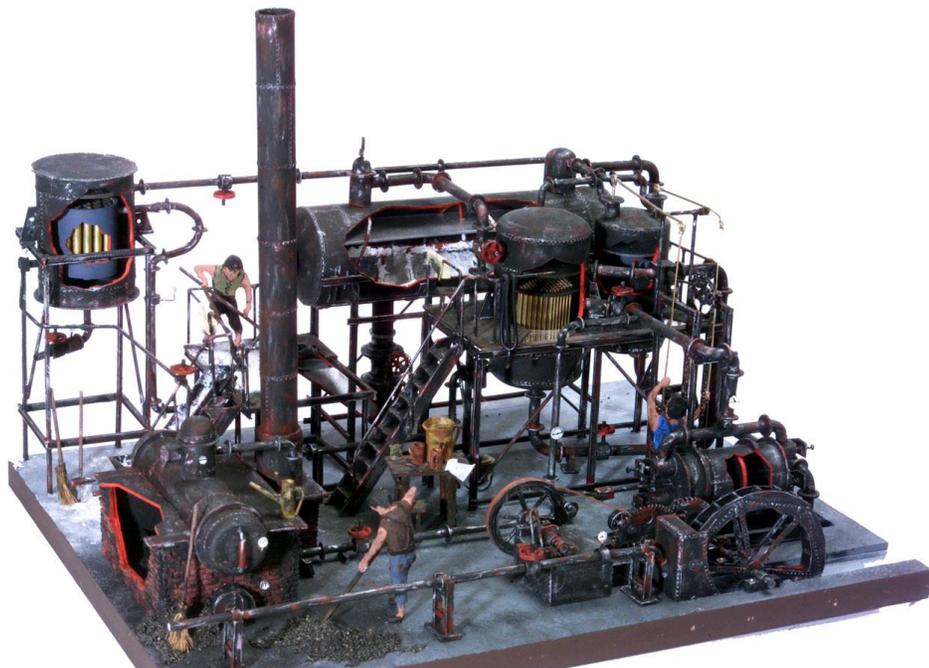


Bild 4-3 Verdampfer der Brüdenkompressionsanlage von Piccard in der Saline Bex [Kemm 2008]

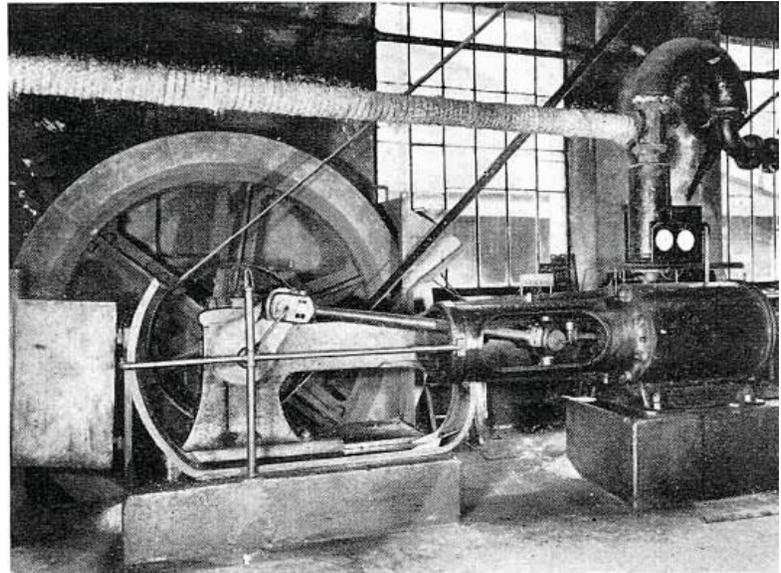
Zur Vermeidung einer Belagsbildung (Fouling) auf den Wärmeübertragungs-Oberflächen war der neue Kristallisor mit einem mechanischen Schälwerkzeug ausgerüstet. Nach der Inbetriebnahme traten allerdings auch einige bedeutende Probleme auf. Aber sie wurden durch das Talent und den grossen Einsatz von Piccard überwunden. So konnte der reguläre kontinuierliche Betrieb im Jahr 1878 aufgenommen werden. Das System von Piccard war ein grosser Erfolg, obwohl die Produktionskapazität auch nach den zahlreichen Verbesserungen nur etwa 70% des vorausgesagten Werts erreichte. 1881 wurde für die Saline Ebensee eine gleiche Anlage gebaut. Vier weitere Anlagen wurden in den französischen Salines du Salat und eine Anlage im deutschen Schönbeck in Betrieb genommen. 1917 wurde in Bex eine zweite, grössere Anlage in Betrieb genommen [Winkler 1995].

Bild 4-4 Modell von Piccard's Salzanlage mit Brüdenkompression von 1878 an der Saline Bex [Hergestellt von Jürg Lieberherr, CEO Schweizerische Rheinsalinen Schweizerhalle, CH-4133 Pratteln]



Erstaunlicherweise wurde Piccard's System 1877, also ein Jahr nach seinen Arbeiten, in leicht modifizierter Form von den Deutschen Schäffer und Budenberg als Deutsches Reichspatent 191 patentiert. Die Beiden brachten ihre „Erfindung“ aber nie zum Funktionieren [Winkler 1995].

Bild 4-5 1878 in der Saline Bex installierter Kolbenkompressor [Wirth 1955]



Während dem ersten Weltkrieg litt die Schweiz unter exorbitanten Brennstoffpreisen. Aber es war genügend elektrische Energie aus Wasserkraft vorhanden. Unter diesen Umständen wurde 1917 durch die Schweizer Firma **Kumler & Matter** eine kleinere Brüdenkompressionsanlage für die Färberei Jenny in Aarau gebaut. In dieser weltweit **ersten Brüdenkompressionsanlage mit elektrischem Antrieb** wurde der Brüden von 100°C auf einen Druck für eine Kondensationstemperatur von 114 °C verdichtet. Dabei wurde eine Leistungszahl von 11.7 gemessen. Nebenbei sei bemerkt, dass die Abnahmeprüfung der Anlage durch den berühmten Aurel Boreslav Stodola von der ETH Zürich durchgeführt wurde. Stodola, dessen Büste am Eingang zum Maschinenlaboratorium der ETH-Zürich steht, war ein weltbekannter Dampf- und Gasturbinenexperte. Aufgrund der erfreulichen Resultate wurden in der Schweiz in den folgenden Jahren diverse weitere Brüdenkompressionsanlagen gebaut [Wirth 1936, 1955].

5 WÄRMEPUMPENHEIZUNG WIRD INTERESSANT 1919-1950

In dieser Periode haben sich Wärmepumpen zur Raumheizung und für die Warmwasserbereitung von seltenen, ersten Prototypen zu einer verlässlichen, effizienten und – je nach den herrschenden Randbedingungen – sogar ökonomischen Heizungsvariante entwickelt.

5.1 Komponenten und Kältetechnik

5.1.1 Dampfkompessionsprozess

Die **Drehzahlsteigerung** bei den Kolbenkompressoren hat sich verstärkt fortgesetzt. Die alten, oft doppelt wirkenden Kolbenkompressoren drehten mit etwa 40 U/min bis 60 U/min. Um 1920

erreichten „schnelle“ Kompressoren 500 U/min. Dies hatte selbstverständlich auch eine Reduktion des Volumens und des Gewichts der Kompressoren zu Folge. Dies illustriert die Tabelle 5-1 am Beispiel eines 350 kW Kompressors.

Tabelle 5-1 Evolution der Kolbenkompressoren am Beispiel der 350 kW Kompressoren von York [Thevenot 1979]

Jahr	Drehzahl U/min	Anzahl Zylinder	Spezifische Leistung W/kg	Kältemittel
1910	70	2	7.6	NH ₃
1940	400	4	49	NH ₃
1975	1750	16	233	R-22

Nach 1918 wurde der **Elektromotor** zur ersten Wahl für den Kompressorantrieb. 1925 ergab eine Umfrage in den U.S.A., dass noch 36% der Kompressoren durch Dampfmaschinen und bereits 58% durch Elektromotoren angetrieben wurden. Weitere 4% wurden durch Dieselmotoren und 2% durch Gasmotoren betrieben. Um 1920 wurde der ohne Riementrieb direkt an den Kompressor **gekoppelte elektrische Synchronmotor** populär [Thevenot 1979].

KÄLTEMITTEL

Trotz den offensichtlichen Vorteilen hatte die künstliche Kühlung auch mit Problemen zu kämpfen. Kältemittel wie Schwefeldioxid oder Methylchlorid waren lebensgefährlich. Auch Ammoniak hatte im Leckagefall verheerende gesundheitliche Konsequenzen. Deshalb suchten die Kälteingenieure vehement nach ungefährlichen Ersatzkältemitteln. Sie wurden gegen das Ende der 1920er Jahre mit einer ganzen Anzahl synthetischer Kältemittel gefunden. **1928** wurden durch Thomas Midgley, Albert Henne und Robert McNary in den Forschungslaboratorien von General Motors für Frigidaire erstmals **Fluorchlorkohlenstoffe synthetisiert**. Die Entwicklung der Kältemittel R-11 und R-12 als Ersatz für Ammoniak (NH₃), Schwefeldioxid (SO₂) und Methylchlorid (CH₃Cl) wurde 1930 öffentlich angekündigt. Die bekanntesten Fluorchlorkohlenstoffe wurden von DuPont unter dem Markennamen Freon patentiert. Fluorierte, chlorierte und in einigen Fällen bromierte Kohlenwasserstoffe sind unbrennbar, geruchlos, nur in grossen Konzentrationen toxisch wirkend, schmiermittelverträglich und relativ kostengünstig zu produzieren. Zudem weisen sie auch vorteilhafte thermodynamische Stoffwerte auf.

Diese Entwicklung bedeutete einen grossen Schritt vorwärts – wenigstens bis lange nachher die durch die Fluorchlorkohlenstoffe verursachten Umweltschäden bekannt wurden. Ausserhalb der U.S.A. fand die Hauptverbreitung der halogenierten Kohlenwasserstoffe erst nach 1945 statt. Gleichzeitig stieg die Anzahl der unterschiedlichen synthetischen Kältemittel, und es stand für praktisch jede Anwendung ein ideales Kältemittel zur Verfügung.

1936 hat Albert Henne, ein Miterfinder der Fluorchlorkohlenstoffe, den **Fluorkohlenwasserstoff R-134a** synthetisiert. Dieses Kältemittel erwies sich in den 1980er Jahren als das beste Ersatzkältemittel ohne Abbaupotenzial für die Ozonschicht für die meisten gebräuchlichen Fluorchlorkohlenstoffe. Trotzdem blieben vor allem in Europa NH₃, SO₂ und CH₃Cl in der Zeit zwischen den beiden Weltkriegen noch die wichtigsten Kältemittel.

[Thevenot 1979], [Nagengast et al. 2006].

KOMPRESSOREN

Der **Rollkolbenkompressor** wurde 1920 von W.S.E. Rolaff eingeführt. Er wurde zuerst durch die Firma Norge in Detroit unter der Bezeichnung „Rollator“ für Schwefeldioxid als Kältemittel hergestellt. Ebenfalls um 1920 begann General Electric mit der Massenproduktion **hermetischer Kompressoren** für Haushaltanwendungen.

Sulzer Winterthur startete 1920 eine umfangreichere Produktion von horizontalen Zweizylinder-Kältekompressoren. 1925 folgte die Seriefabrikation von vertikalen Kältekompressoren für NH_3 und CO_2 . 1927 baute Sulzer den **weltweit grössten Kolben-Kältekompressor** mit einer Leistung von 9.4 MW. 1937 folgte eine noch grössere Version mit 11.6 MW (**Bild 5-1**). In den frühen 1930er Jahren führte Sulzer den **ölfreien Labyrinth-Kolbenkompressor** – zunächst für die Verdichtung von Luft - ein: **Bild 5-2** (1: Labyrinthkolben, 2: Zylinderwand, 3: Drosselstelle, 4: Volumenkammer, 5: Wirbel). Ab ungefähr 1955 wurde er für den Gebrauch als Kältekompressor modifiziert. Heute wird der weiter entwickelte Labyrinthkolbenkompressor unter der Bezeichnung „Laby“ durch Burckhardt Compression in Winterthur mit Leistungen bis über 25 MW gefertigt und in die ganze Welt exportiert. Hauptabnehmer ist die petrochemische Industrie.

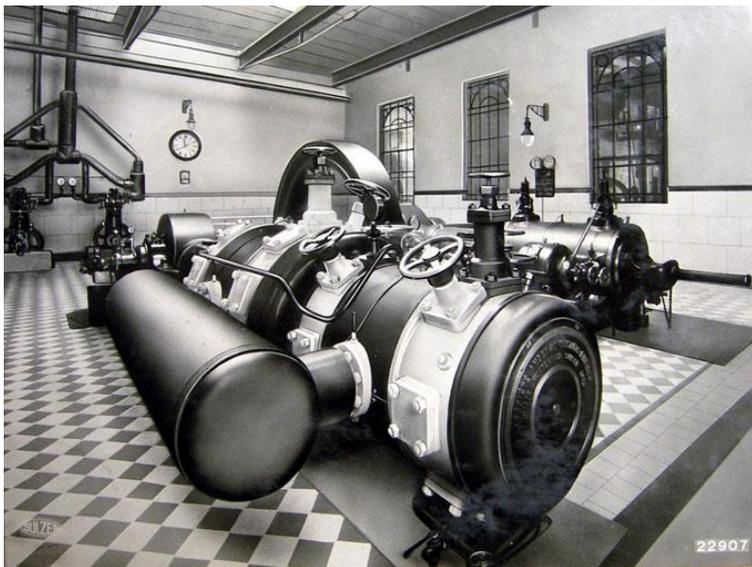


Bild 5-1 Grosser Sulzer Kolbenkompressor mit Dampfmaschine im Hintergrund, um 1925
[Archiv Sulzer, CH-8404 Winterthur]

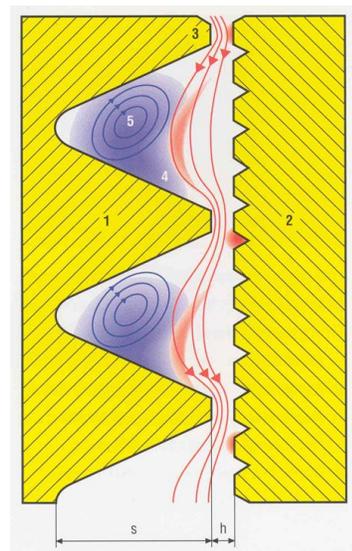


Bild 5-2 Strömung durch die Labyrinthdichtung eines „Laby“ [Burckhardt Compression, CH-8404 Winterthur]

Der früher nur für Luft verwendete **Flügelzellenverdichter** wurde ab 1920 auch für Kältemittel eingesetzt – zuerst in Deutschland, den U.S.A. und der **Schweiz**. Ab 1922 fertigte Sulzer die kompakte Kälteeinheit **„Frigorotor“** und die grössere Version **„Frigocentrale“**. „Frigorotor“ wies eine Kälteleistung von 1.2 – 11.6 kW auf und benützte Methylchlorid als Kältemittel.

Sulzer begann bereits 1909 mit der Herstellung von **Turbokompressoren** und trat 1927 mit einem mehrstufigen Turbokompressor für Ammoniak mit **Dampfturbinenantrieb** in den Kälte-technikmarkt ein. **Brown Boveri**¹⁰ (BBC) konzentrierte sich auf Turbokompressoren und baute **1926** einen **9.3 MW** Ammoniakverdichter. 1927 folgte eine 17.4 MW Ausführung. Später verwendete BBC Ethylchlorid sowie Ethylbromid und dann Fluorchlorkohlenstoffe als Kältemittel. 1935 war ihr Wasser- oder Solekältesatz **„Frigobloc“** mit Kompressoren im Leistungsbereich von 23 kW bis 1.4 MW ausgerüstet. Vor 1940 wurden für die Radial-Turbokompressoren 5 bis 6 Laufräder benötigt. Die Entwicklung in Richtung immer höherer Umfangsgeschwindigkeiten führte in der Zeit von 1940 bis 1960 auf 2 bis 3 Laufräder. Nach 1960 wurden immer mehr Radialverdichter mit einem Laufrad und Umfangsgeschwindigkeiten nahe an der Schallgeschwindigkeit realisiert.

¹⁰ Die relevanten Aktivitäten der früheren Brown Boveri Company gingen 1988 an die Asea-Brown-Boveri (ABB) über.

Escher Wyss baute 1936 einen **Rollkolbenkompressor**, den sogenannten "**Rotasco**". Dieser Kompressor fand eine rasche Verbreitung und wurde aus Lärmgründen auch für die erste europäische Wärmepumpe im Zürcher Rathaus verwendet: [Bild 5-3](#), [Bild 5-4](#).

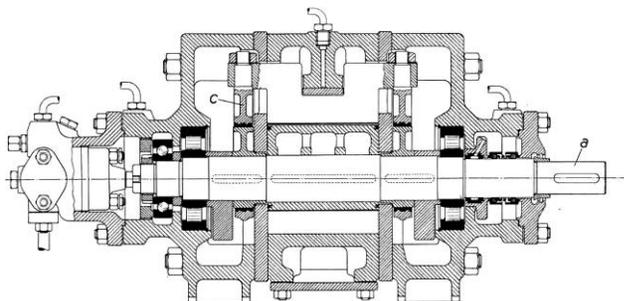


Bild 5-3 Schnitt durch einen
Escher Wyss Rotasco Kompressor
[Egli 1940]

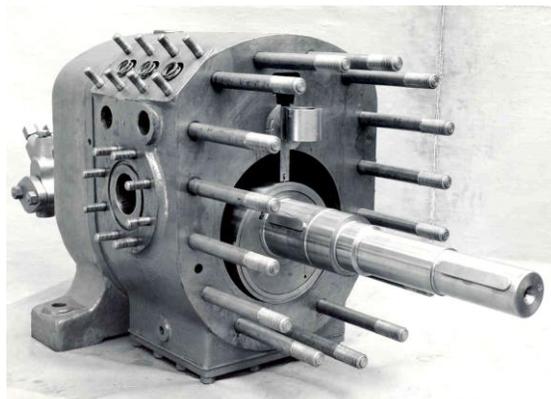


Bild 5-4 Rotasco Kompressor,
Rathaus Zürich, 1938
[Hochbauamt, CH-8090 Zürich]

1923 baute Willis Carrier einen Prototypen eines Radialturbokompressor-Kältesatzes mit Kohlenstofftetrachlorid und Dichlorethylen als Kältemittel. 1927 waren bereits 50 seiner Radialturbokompressoren mit Dichlorethylen in Betrieb. Später wurde das Dichlorethylen durch die für Turbokompressoren geeigneteren FCK¹¹ (R-11, gefolgt von R-12) ersetzt. Die amerikanische Firma Trane verwendete in ihren Radialkompressoren für die Raumklimatisierung R-113. Axiale Turbokompressoren erschienen in der Kältetechnik erst nach dem zweiten Weltkrieg – und dann meist in grossen Anlagen zur Verflüssigung von Erdgas.

Der schwedische Turbinenhersteller Ljungstroms Angturbin suchte 1934 nach leichten Kompressoren für Gas- und Dampfturbinen. Da das ursprüngliche Patent für **Schraubenkompressoren** nicht mehr gültig war, hat Lysholm ein brauchbares Profil von Schraubenkompressoren entwickelt und mehrere Kombinationen von Schraubenrotoren getestet. Lysholm beschäftigte sich aber nicht nur um die Rotorgeometrie – er kümmerte sich auch um die genaue Herstellung der Rotoren und patentierte eine entsprechende Herstellungsmethode. Das Patent aus dem Jahr 1935 zeigt seine asymmetrische Rotorkonstruktion mit 5 männlich und 4 weiblichen Rotorblättern. Obwohl die Geometrie im Laufe der Jahre weiter verfeinert wurde, war dies die Grundlage für die heutigen Schraubenkompressoren. Die Anwendung war noch auf die Verdichtung von Luft beschränkt. Für die Kältetechnik war das erreichbare Druckverhältnis noch zu gering. Es vergingen noch vier weitere Dekaden, bis aus dem Schraubenkompressor ein konkurrenzfähiger Kältekompressor wurde.

Kleinkompressoren für Haushaltenwendungen kamen erst etwa 50 bis 60 Jahre nach den industriellen Kompressoren. Sie konnten erst realisiert werden, als weniger verlustreiche Wellendichtungen und eine genaue und verlässliche automatische Regelung entwickelt waren. In den 1930er Jahren setzte sich der kapazitive Elektromotorstart durch. Damit war der Weg frei für den Bau hermetischer Kompressoren. Nach 1940 wurden die hermetischen Kompressoren namentlich infolge neuer Elektromotortypen kleiner.

[Thevenot 1979], [Kläy 1994], [Nagengast et al. 2006], [Burckhardt Compression 2007], [Cashflo 2007], [Friothersm 2008], [Steiner 2007].

¹¹ Da in diesen synthetischen Kältemitteln gar kein Wasserstoff vorkommt, wird hier die zutreffendere Bezeichnung „FCK“ anstelle der oft benützten Bezeichnung „FCKW“ verwendet.

VERSCHIEDENES

Der **Plattenwärmeübertrager** wurde 1923 durch Richard Seligman von der „Aluminium Plant & Vessel Company Limited (APV)“ erfunden. Infolge der grossen Oberfläche, der kurzen Wärmetransportwege, der durch die Plattenprofile perfekt geführten Strömung und der Freiheit in der Volumenstromaufteilung brachte dieser neue Wärmeübertrager eine revolutionäre Reduktion des Bauvolumens und des Kältemittelinhalts. Zudem wurde im Bedarfsfall eine nachträgliche Vergrösserung der Wärmeübertrageroberfläche leicht möglich. Vorerst waren zur Vermeidung von Kältemittelverlusten noch anspruchsvolle Dichtungen zwischen den Platten erforderlich.

Das erste **thermostatische Expansionsventil** wurde vermutlich durch E. Diffinger von den „Etablissement P. Colombier Fils“ in Paris im Jahr 1923 erfunden. Drei Jahre später erfand H. Thompson ein der heutigen Ausführung entsprechendes thermostatisches Expansionsventil und erhielt dafür 1927 ein U.S.A.-Patent. 1925 meldete R. Bernat ein Patent für die erste Ausführung eines **Schwimmerventils** zur Kältemitteldurchsatzregulierung an. 1927 wurde durch T. Carpenter die **Kapillarrohrregulierung** erfunden. In den späten 1940er Jahren erhielt Kork als Isolationsmaterial eine überlegene Konkurrenz durch **Isolierschäume**. [Thevenot 1979], [Nagengast et al. 2006].

5.1.2 Absorptionsprozess

Zwei Jahrzehnte nach der Erfindung des **Diffusions-Absorptionsprozesses** durch H. Gepert führten die Schweden Carl Munters und Baltazar von Platen das Prinzip zum Erfolg, indem sie Wasserstoff anstelle von Luft als Inertgas einsetzten. Sie erhielten dafür 1920 ein Patent und erste Kühltischfunktionsmuster wurden bereits Ende 1920 hergestellt [Thevenot 1979], [Burget et al. 1999]. Der geräuschlose Ammoniak-Wasser Kühltischprozess arbeitete ohne bewegliche Teile (insbesondere ohne Lösungsmittelpumpe) und konnte mit Gas, Petroleum oder Elektrizität betrieben werden. Ein weiterer Vorteil dieser technischen Revolution war der im Vergleich zu den damaligen Kompressionsprozessen tiefere Preis. **Electrolux** kaufte 1925 die Patente von Munters und Platen und startete 1926 die Produktion von Kühltischen. Der **Absorptionskühltisch** wurde später ein weltweiter Erfolg. Nach 1927 wurde die Produktion durch mehrere Firmen in den U.S.A. ausgeweitet.

Die Patentrechte von Electrolux verfielen zuerst in der Schweiz (als Folge des zweiten Weltkriegs wurden sie für die übrigen Länder Europas um 6 Jahre verlängert). Hans Stierlin – ein späterer Ehrendoktor der ETH Zürich – ergriff die Chance, verbesserte den Prozess und begann ab 1944 mit der Kühltischproduktion in seiner Firma **SIBIR** in Schlieren. Im Vergleich mit den damaligen Kompressor-Kühltischen waren seine SIBIR-Kühltische sensationell preisgünstig. Entsprechend nahm die Nachfrage stark zu. In den 1960er Jahren wurde SIBIR ein Synonym für Kühltisch. 1962 waren in Europa rund 50% der Haushaltskühltische Absorptionskühltische. Stierlin verbesserte die Effizienz des Diffusions-Absorptionsprozesses durch die Rückgewinnung der Wärme des aus dem Rektifikator strömenden Ammoniaks (rund 1/3 der gesamten Wärmezufuhr!). Er hat die erhebliche Prozessverbesserung 1967 zum Patent angemeldet und dieses 1969 erhalten [Stierlin 1969]. Eine vergleichbare Verbesserung des Rektifikationsprozesses wurde auch durch A. Lenning vorgeschlagen [Lenning 1971], [Wassermann 2007]. Als die Kompressionskühltische kostengünstiger, ruhiger und dank hermetischen Kompressoren und künstlichen Kältemitteln effizienter und sicherer wurden, schmolzen die Vorteile der Absorptionskühltische dahin. Die Verkäufe von SIBIR brachen gegen das Ende der 1980er Jahre ein und um 1990 wurde SIBIR an Electrolux verkauft [Wassermann 2007].

Nebenbei sei bemerkt, dass sich der berühmte Albert Einstein am Rande auch für den Absorptionsprozess interessierte. Unfälle mit Kompressionskühltischen motivierten seinen ungarischen

schen Assistenten, Leo Szilard, zur Entwicklung eines Absorptionssystemschranks. Szilard und Einstein haben ein Patent für ein Absorptionssystem zur Kühlung einer Eiskiste eingereicht. Es wurde ihnen 1930 auch erteilt. Aber was immer auch der Grund gewesen sein mag – die Apparatur funktionierte nicht wie vorgesehen.

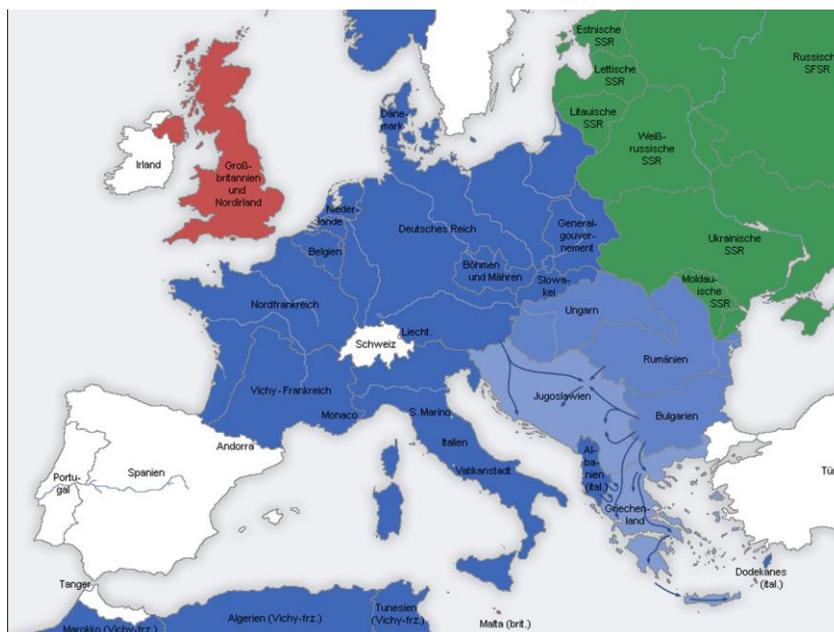
Um 1930 regte sich das Interesse zur Nutzung von Abwärme für den Absorptionskälteprozess. Bereits vor 1935 waren einige Anlagen in den U.S.A., Deutschland und Frankreich in Betrieb. 1932 führte G. Maiuri in England ein Mehrstufen-Ammoniakabsorptions-Aggregat ein.

In den 1930er Jahren begann eine allmähliche Erweiterung vom dominanten Ammoniak-Wasser-System auf andere Arbeitspaare. Um 1937 verwendete Kathaber **Lithiumchlorid-Wasser** in einem offenen Absorptionssystem. Die bedeutendste Veränderung bei Absorptionskälteanlagen war die Einführung der **Lithiumbromid-Wasser-Systeme** um 1940. Eine Studie von Servel, Carrier und anderen zeigte, dass Absorptionsaggregate mit diesem Stoffpaar für die Erzeugung von Kälte bei Temperaturen um $+5^{\circ}\text{C}$ bei tieferen Heiztemperaturen betrieben werden können als mit Ammoniak-Wasser. Allerdings wurden Kristallisation und Korrosion auch als Haupthindernis für dieses Stoffpaar identifiziert. **Carrier** führte ab 1938 zu Lithiumbromid-Wasser-Systemen eingehendere Studien durch und baute 1945 die erste dampfbeheizte 430 kW Anlage. Damit hatte das „Goldene Zeitalter der Absorptionstechnik“ begonnen. Um 1960 hatte Carrier bereits 1'500 grosse Lithiumbromid-Wasser-Anlagen ausgeliefert. Um 1965 betrug in den U.S.A. der Anteil an Absorptionssystemen 30% [Thevenot 1979], [Burget et al. 1999], [Nagengast et al. 2006].

5.2 Wärmepumpenheizung – eine Schweizerische Pionierleistung

Die Schweiz litt während und nach dem ersten Weltkrieg an einer grossen Brennstoffknappheit. Gleichzeitig bestand das Potenzial für einen Ausbau der Wasserkraft. Not macht erfindendisch. So begannen um 1918 ernsthafte Diskussionen über die Aussichten einer Raumheizung mit Wärmepumpen [Wirth 1955]. Sie wurde angeregt durch die **erste Publikation zur Raumheizung mit Wärmepumpen** in einer der bedeutendsten Schweizer Fachzeitschriften [Hottinger 1920]. Sie kam zu folgendem Schluss: „*Allgemeingültige Kostenberechnungen aufstellen zu wollen, hat bei den heutigen labilen Marktpreisen keinen Wert; dagegen lohnt es sich wohl, von Fall zu Fall zu prüfen, ob die Anordnung einer Wärmepumpe Aussicht auf Erfolg hat*“.

Bild 5-5 Die Schweiz im Jahr 1941 – vollständig umschlossen von faschistisch regierten Ländern (blau) [wikimedia.org]



In seinem umfassenden Buch zur Geschichte der Kältetechnik schrieb Thevenot: *“Die Wärmepumpe ist ein kältetechnisches System zur Produktion von Wärme. Es gibt eine gewisse Versuchung, dieses System als eines zu bezeichnen, welches einer Weltkrise bedarf, bevor es entwickelt wird...”* und an anderer Stelle: *„Es war die **Schweiz**, ein an fossilen Energiereserven armes aber an hydroelektrischer Energie reiches Land, welches um 1939 - nach einigen Experimenten um 1930 - den **Anstoss zur Realisierung dieser Heizmethode** gab.“*

Vor und während dem zweiten Weltkrieg litt die Schweiz erneut unter einer ernsthaften Knappheit des Kohlenachschs. Das Bild 5-5 illustriert die prekäre Situation der Schweiz zu jener Zeit. Sie gab Anlass zu einem entschlossenen Bau weiterer Wasserkraftwerke vor und während des zweiten Weltkriegs und zu einer rationellen Verwendung der Hydroelektrizität oder der „weissen Kohle“, wie diese auch genannt wurde [Wirth 1941]. Der hohe technische Stand des schweizerischen Wärmekraftmaschinenbaus war ein weiterer Grund, weshalb die Schweiz zu einem **Wärmepumpenpionierland** wurde. Dieser wird etwa durch die Tatsache illustriert, dass Brown Boveri Baden im Jahr 1939 in der Stadt Neuenburg die weltweit erste industrielle Gasturbine in Betrieb nahm¹².

Raumheizen durch Nutzen der Abwärme von Kälteanlagen in Eisbahnen und Brauereien wurde bereits in der Mitte der 1930er Jahre praktiziert. Zwischen 1938 und 1945 wurden in der Schweiz dann aber durch die Firmen **Sulzer** in Winterthur, **Escher Wyss** in Zürich und **Brown Boveri** in Baden 35 eigentliche Wärmepumpen gebaut und installiert. Diese Wärmepumpen wurden zur Raumheizung und für andere Niedrigtemperaturanwendungen (zum Beispiel Warmwasserbereitung oder Erwärmung von Hallenbad-Schwimmwasser) eingesetzt. Hauptwärmequellen für die Wärmepumpen waren Seewasser, Flusswasser, Grundwasser und Abwärme [Thevenot 1979], [Bauer 1944].

Ein weiteres, wichtiges Motiv zur Realisierung dieser ersten Wärmepumpen war das **Sammeln von Erfahrungen** mit diesem neuen Heizsystem und eine **Abklärung ihres Potenzials** zur künftigen Deckung des schweizerischen Wärmebedarfs. Die wichtigsten Daten der in der Stadt Zürich in den Jahren 1937 bis 1943 installierten historischen Wärmepumpen sind in der Tabelle 5-2 aufgelistet. Nach fünf Jahren Betriebserfahrung konnte 1944 Erfreuliches berichtet werden [Egli 1944]. Der Bericht hob hervor, dass die Wärmepumpen bisher problemlos funktionierten und dass sie keinen grösseren Bedienungsaufwand erfordern als konventionelle Heizungssysteme.

Auch **nach dem zweiten Weltkrieg** blieben die Wärmepumpen in der Schweiz ein wichtiges Thema. Die Inbetriebnahme zahlreicher Wärmepumpen veranlasste den Schweizerischen Bundesrat zu einem Rundschreiben an alle Kantone. In diesem wurde nach der Notwendigkeit eines landesweiten Gesetzes zur Wärmeentnahme aus Oberflächengewässern gefragt. Weiter forderte das Rundschreiben die Kantone dazu auf, den Bund über Wärmepumpenanlagen mit Flusswasser als Wärmequelle zu informieren und einen Nutzungszonenplan aufzustellen. Im Interesse der Unabhängigkeit von Brennstoffimporten empfahl der Bundesrat den Kantonen, auf die Erhebung von Gebühren für die Wärmeentnahme zu verzichten [Bundesrat 1949]. **1955** gab es in der Schweiz rund **60 Wärmepumpen**. Die grösste unter ihnen erreichte eine Wärmeleistung von 5.86 MW.

¹² Diese 4.4 MW Gasturbinenanlage hatte einen Wirkungsgrad von 17.4% und war von 1939 bis 2002 in Betrieb. Sie wurde 1988 mit dem „Landmark Award“ der ASME ausgezeichnet und ist nun auf dem Firmengelände von ALSTOM in Birr als Industriedenkmal ausgestellt. Zum Vergleich sei bemerkt, dass eine moderne ALSTOM-Gasturbine bis 288 MW einen Wirkungsgrad von 37.8% erreicht [GWA 2007].

5.2.1 Historische Wärmepumpen der Stadt Zürich

1938 ZÜRCHER RATHAUS (100 KW)

Die Installation der ersten Wärmepumpe im Rathaus Zürich (Bild 5-6) durch die Firma **Escher Wyss** war ein weltweiter Meilenstein. Das Wärmepumpensystem wurde durch die Ingenieurfirma Heinrich Lier in Zürich geplant. Es diente dem Ersatz von Einzelraumholzöfen. Für die Lagerung fester Brennstoffe wie Holz oder Kohle war zu wenig Platz vorhanden. Deshalb beschränkte sich die Auswahl möglicher Heizenergien auf Heizöl, Stadtgas (aus Kohle) oder Elektrizität. Im Hinblick auf die zunehmend behinderten Einfuhren von Kohle und Öl (siehe Bild 5-5) und die schmerzlichen Erfahrungen während dem ersten Weltkrieg entschloss man sich für Elektrizität. 1937 arbeitete Escher Wyss eine energieeffiziente Wärmepumpenlösung (Bild 5-8) aus und offerierte sie für 27'850 Schweizer Franken. Es ist erwähnenswert, dass die Anlage gemäss der Endabrechnung nur 24'090 Schweizer Franken kostete. Der Fluss Limmat mit einer mittleren Temperatur während der Heizsaison um 7°C war eine ideale Wärmequelle. Das Flusswasser wurde bei einer mittleren Wärmepumpenleistung um etwa 1.5 K abgekühlt. Die nominale Wärmeleistung der Wärmepumpe betrug 100 kW. Die Heizungsvorlauftemperatur lag bei rund 60°C. Zur Spitzenlastdeckung wurde ein mit maximal 65 kW elektrisch beheizter Boiler installiert. Als Novum für Europa konnte die Wärmepumpe im Sommer (im Gegensatz zu den weiteren historischen Wärmepumpen der Stadt Zürich) auch für die Raumkühlung eingesetzt werden.



Bild 5-6 Rathaus Zürich mit der Limmat als Wärmequelle heute [GNU Free Document]



Bild 5-7 Der historische "Rotasco" Kompressor heute [Friothersm 2008]

Die Umschaltung auf Kühlbetrieb und umgekehrt auf Heizbetrieb erfolgte manuell über vier Dreiwegventile. Abgesehen davon funktionierte die Anlage bereits **vollautomatisch**. Zur Vermeidung von Lärm und Vibrationen entschied sich Escher Wyss für ihren bereits beschriebenen Rollkolbenkompressor „Rotasco“ (Bild 5-4, Bild 5-7). Er vermochte die Erwartungen in Bezug auf den volumetrischen Wirkungsgrad sowie die Geräuscharmheit und Vibrationsfreiheit voll zu befriedigen. Als Besonderheit ist zu erwähnen, dass der 42 kW Elektromotor nicht nur den Kompressor sondern über ein Getriebe auch die 8 l/s Flusswasserpumpe und die 3.6 l/s Heizsumwälzpumpe anzutreiben hatte: Bild 5-9.

Als Kältemittel wurde R-12 verwendet. Verdampfer und Kondensator wurden als horizontale Rohrbündelapparate ausgeführt: Bild 5-10. Die Wärmepumpenanlage wurde in den Jahren 1937-1938 gebaut und installiert. Die Inbetriebnahme erfolgte 1938. In der Heizsaison 1938-1939 wurden an der Wärmepumpenanlage umfangreiche Messungen durchgeführt. Unter Berücksichtigung aller Hilfsantriebe (Flusswasserpumpe!) wurde eine Jahresarbeitszahl von 2.16 ermittelt. Die Aufstellung der Wärmepumpe in einem ehemaligen Büro erforderte einen

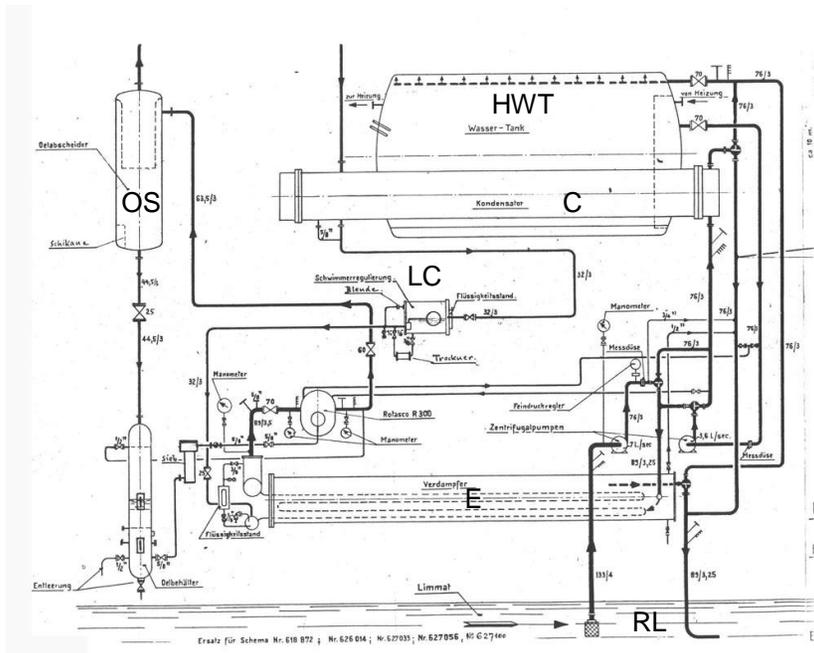


Bild 5-8 Schema der Wärmepumpe des Zürcher Rathauses, 1938

HWT Heizwassertank,
C Kondensator,
OS Ölabscheider,
LC Niveauregelung,
E Verdampfer,
RL Limmat

[Fluri 2007]

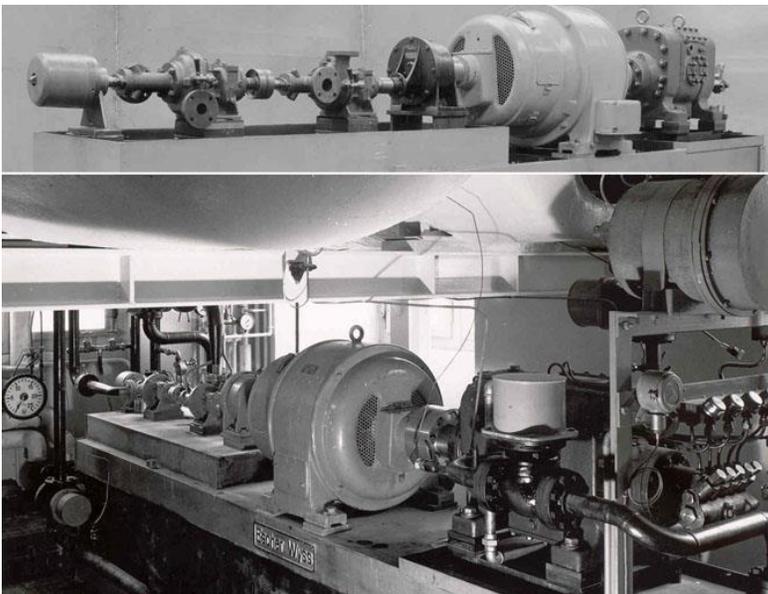


Bild 5-9 Wärmepumpenteilsystem auf dem Prüfstand (oben) und im Rathaus installiert, 1938 (unten) [Fluri 2007]

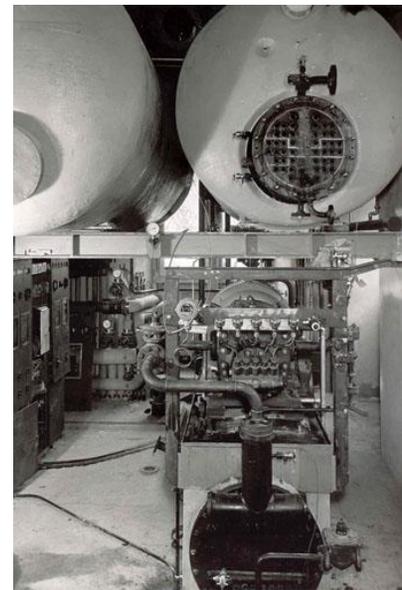


Bild 5-10 Wärmepumpe mit offenem Kondensator/Wassertank (oben) und Kondensator (unten), 1938

Wanddurchbruch. Die Wärmepumpe im Zürcher Rathaus ist die älteste noch funktionierende Wärmepumpe. 1964 musste der Kompressor vollständig überholt werden und in den Jahren 1983-1984 wurden das Wärmepumpensystem revidiert sowie das Lüftungssystem ersetzt [Egli 1938, 1940], [Dürr 1996]. Erst nach 63 Vollbetriebsjahren wurde die historische Escher Wyss Wärmepumpe im Jahr 2001 durch eine neue Wärmepumpe der Firma Scheco in Winterthur ersetzt. Diese erreicht mit dem Kältemittel R-134a bei einer Flusstemperatur von 3.5 °C und einer Heizungsvorlauftemperatur von 55 °C eine Wärmeleistung von 134 kW und eine Leistungszahl von 3.27. Dies entspricht einem Lorenz-Wirkungsgrad von 51% - allerdings ohne Berücksichtigung der Hilfsantriebe. Die historische Wärmepumpe wird seit 2001 nur noch eine Stunde pro Woche betrieben, um sie „am Leben“ zu erhalten. Sie wird seit 2001 ebenfalls mit R-134a anstelle des früheren R-12 betrieben [Fluri 2007].

1941 HALLENBAD ZÜRICH-CITY (1'025 KW)

Das neu gebaute Hallenbad im Zentrum der Stadt Zürich (Bild 5-11) wies einen jährlichen Heizenergiebedarf von rund 5500 MWh auf. Dies entsprach einem jährlichen Kohlebedarf von 90 damaligen 10-Tonnen-Güterwagen – eine im Hinblick auf die Kohleknappheit in den Kriegsjahren enorme Menge! Elektrizität aus Wasserkraftwerken war jedoch immer – wenn auch beschränkt – verfügbar. Die Elektrizität musste aber gegenüber einer elektrischen Widerstandsheizung rationeller verwendet werden. Ermutigt durch die eindrucklichen Errungenschaften im Rathaus, entschloss sich der Stadtrat, auch für das Hallenbad eine Wärmepumpe einzusetzen. Das Schwimmbecken des Hallenbads mit einer damals noch sehr tiefen Temperatur von 23 °C (heutiger Standard ist 28 °C...) versprach einen noch effizienteren Wärmepumpenbetrieb. Zudem war eine ausgezeichnete Wärmequelle vorhanden. Das frische Schwimmbadwasser wurde durch die Abwärme aus einer benachbarten Transformatorstation auf die erforderlichen 23 °C aufgeheizt. Aber diese reichte nicht aus, um die Temperatur des Schwimmbeckens auf 23 °C zu halten. Deshalb sah **Escher Wyss**, welche die Anlage plante und die Ammoniak-Wärmepumpe baute, das Aufheizen eines Teilvolumens des Schwimmbadwassers auf 45 °C mit einer Heizleistung von 325 kW vor. Zur Nutzung der niedrigen Nachtenergietarife erfolgte diese während der Nacht. Diesem Zweck diente ein erstes Wärmepumpensystem mit dem Badewasserabfluss als Wärmequelle und zwei der total fünf Kompressoren (Bild 5-13).



Bild 5-11 Heutiges Hallenbad Zürich-City (links)



Bild 5-12 Heutiger Kompressor [Scheco]

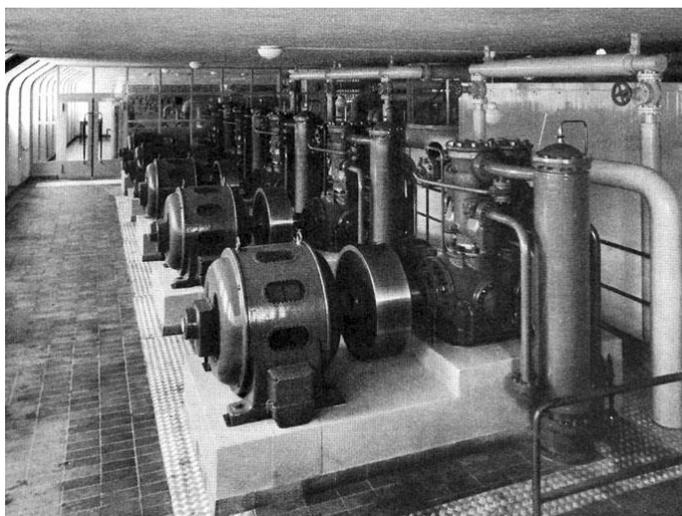


Bild 5-13 Escher Wyss Kolbenkompressoren, 1941 [Hochbauamt 1941]

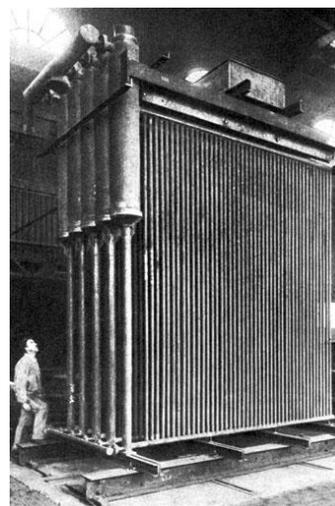


Bild 5-14 Escher Wyss Unterwasserverdampfer, 1941 [Hochbauamt 1941]

Ein **zweites Wärmepumpensystem** mit den drei restlichen Kompressoren diente der Raumheizung durch eine Beheizung des Fussbodens, der Decke, der Wände, der Pfeiler und der Sitzbänke. Hier wurden also thermoaktive Bauelemente bereits realisiert – lange bevor dieser Begriff in der Fachwelt eingeführt wurde. Dieses Wärmepumpenheizsystem hatte eine Vorlauftemperatur von 50°C und eine maximale Heizleistung von 700 kW. Als Wärmequelle für dieses zweite System wurde Seewasser aus dem Schanzengraben genutzt: Bild 5-14. Nach der monatlichen vollständigen Schwimmwassererneuerung kam eine zusätzliche elektrische Widerstandsheizung mit 2000 kW zum nächtlichen Einsatz [Hochbauamt 1941].

Im Rahmen einer Revision des Hallenbads in den Jahren 1979-1980 wurde das ursprüngliche zweite Wärmepumpensystem mit den drei Kolbenkompressoren durch eine einzige Sulzer Turbo-Wärmepumpe mit R-12 als Kältemittel und einer Heizleistung von 1.2 MW ersetzt [Hochbauamt 1980]. Diese erwies sich als stark überdimensioniert. Beim Ersatz des Kältemittels R-12 wurde 1996 ein neues Wärmepumpensystem mit drastisch reduzierter Leistung installiert. Dieses wies für die Heizung des Schwimmbadwassers noch 100 kW und für die Raumheizung noch 325 kW auf. Die Spitzenlast wird nun durch eine 500 kW Kesselheizung gedeckt. Mit der Wärmerückgewinnung aus dem ausfliessenden Schwimmbadwasser, der Luftentfeuchtung, dem Seewasser und zusätzlichem Grundwasser erreicht die neue R-134a-Wärmepumpe eine Jahresarbeitszahl von 3.2. Während die historischen Wärmepumpenkompressoren gemäss dem Bild 5-13 noch eine ganze Maschinenhalle füllten, fanden die neuen Maschinen in einem Container genügend Platz: Bild 5-12. Selbst unter Berücksichtigung einer Reduktion der Wärmeleistung von 1025 kW der historischen Maschinen auf 425 kW der modernen Maschine bleibt die Volumenreduktion eindrucklich. In der Folge einer geplanten völligen Erneuerung des bestfrequentierten Hallenbades der Schweiz erscheinen am Horizont bereits Umriss einer dritten Wärmepumpengeneration [Huwyler 2007].

1942 WÄRMEPUMPENANLAGE WALCHE FÜR FERNWÄRMEHEIZUNG (5'860 KW)

Hauptmotive für den Bau eines dritten Wärmepumpenheizungssystems waren die unsichere Brennstoffversorgung mit stark steigenden Kohlepreisen in der kleinen Schweizer Insel inmitten faschistisch regierter und Krieg führender Länder. Massgebend war aber auch der Wille zur Bewahrung der führenden Position der einheimischen Industrie und zur Stärkung von Forschung und Lehre an der ETH-Zürich sowie nicht zuletzt auch das klare Bekenntnis zur Unabhängigkeit. Unter diesen Umständen beschloss der Bundesrat 1942 den Bau einer grossen Wärmepumpenanlage an der Walche, nahe beim Hauptbahnhof: Bild 5-17. Ziel des Projekts



Bild 5-15 Heutige Anlage an der Walche [Friothersm 2008]



Bild 5-16 Wärmepumpeneinheit seit 1988 [Friothersm 2008]

war eine Einsparung von 45% des Wärmebedarfs in dem in den Jahren 1930-1932 gebauten Fernwärmenetz der Stadt Zürich. Die Anlage sollte aber auch zu einem leuchtenden Beispiel für das neue Heizsystem werden und einen Beitrag an deren Erforschung und Entwicklung leisten. Das grosse Wärmepumpensystem wurde trotz der kriegsbedingten Behinderungen in einer Rekordzeit gebaut. Noch 1942 wurden der Untergrund-Maschinenraum erstellt (Bild 5-18) und die drei Wärmepumpen mit einer für jene Zeit enormen nominalen Gesamtwärmeleistung von 5'860 kW gebaut.



Bild 5-17 5.86 MW Wärmepumpenanlage an der Walche, 1942 [Riesen 2007]



Bild 5-18 Untergrund-Maschinenhalle im Bau, 1942 [Riesen 2007]

Das Wärmepumpensystem bestand aus **drei Wärmepumpen**. Zwei davon waren identische Wärmepumpen, sogenannte „Thermoblocks“ von **Brown Boveri** Baden: Bild 5-19. Die beiden Maschinen mit Achtstufen-**Radialkompressoren** wurden mit 3'200 kg des FCK-Kältemittels R-11 betrieben und hatten eine Wärmeleistung von je 2'000 kW. Die dritte Wärmepumpe (Bild 5-20) von **Sulzer** Winterthur hatte eine Wärmeleistung von 1'860 kW und arbeitete mit drei **dreistufigen Kolbenkompressoren** (Bild 5-21) und 6'000 kg **Ammoniak** als Kältemittel.

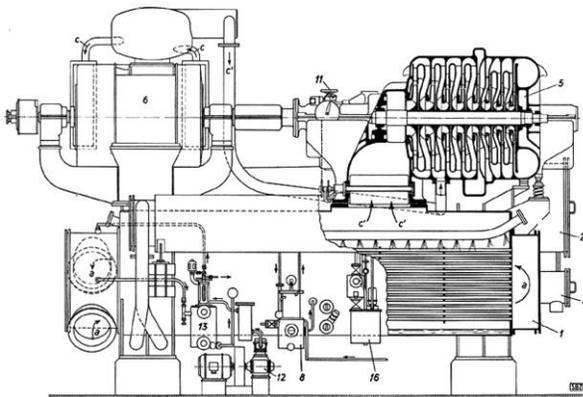
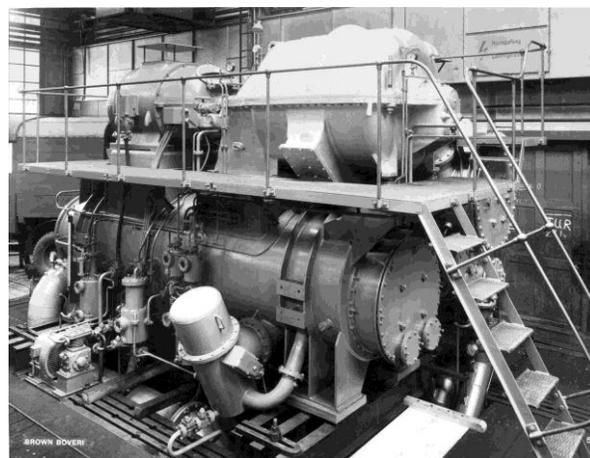


Bild 5-19 Anlage Walche, 1942: 2 MW BBC Wärmepumpe mit achtstufigem Radialkompressor [Riesen 2007]



Diese erstaunliche Kombination von Turbo- und Kolbenkompressor-Wärmepumpen wurde gewählt, um gleichzeitig Erfahrungen für beide Kompressortypen zu sammeln. Die drei Wärmepumpen wurden parallel betrieben. Die weltweit **erste Integration von Wärmepumpen in ein Fernwärmenetz** mit einer geforderten Vorlauftemperatur von 70°C war keine leichte Aufgabe.

Sie wurde erstaunlich gut gemeistert. Bei 9 °C / 71 °C erreichten die Turbokompressorwärmepumpen eine Leistungszahl von 2.58 und die Kolbenkompressorwärmepumpen eine Leistungszahl von 2.73 [Schindler-Fässler und Schindler 1944]. Dies bedeutete sehr hohe **Lorenzwirkungsgrade** von **46.5%** beziehungsweise **49.2%**. Es bleibt allerdings unklar, wie der Energiebedarf für die Hilfsantriebe bilanziert wurde. Die geringe Abkühlung des Flusswassers in 10 Metern Abstand vom Wiedereintritt des Wassers in den Fluss um nur ungefähr 0.6 °C entsprach den Anforderungen an den Gewässerschutz. Weitere Einzelheiten findet man in [Bauer 1944]. 1972, nach dreissig Betriebsjahren, wurde die Anlage infolge zu hoher Unterhaltskosten und zu tiefer Heizölpreise stillgelegt.

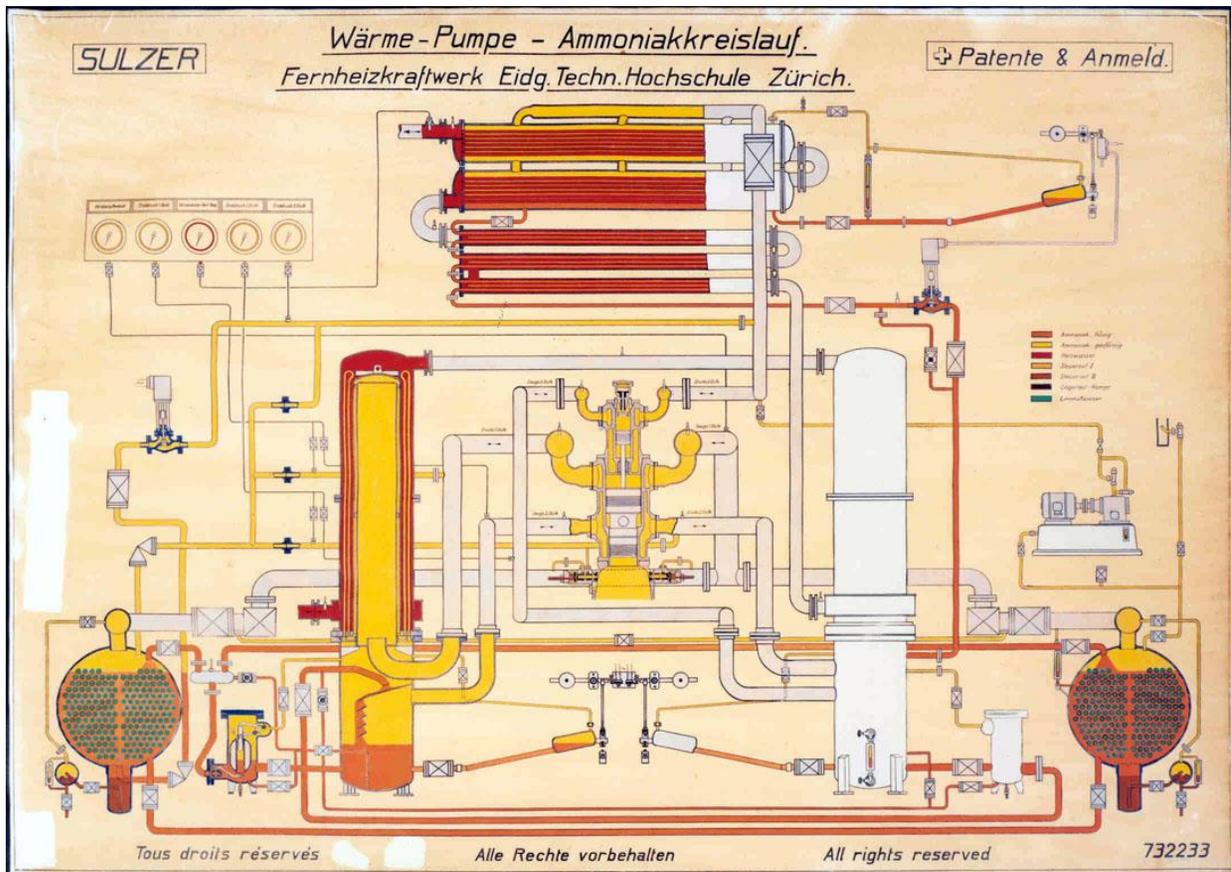


Bild 5-20 1.86 MW Sulzer Wärmepumpe mit 3 Dreistufen-Kolbenkompressoren, 1942 [AFB 1988]

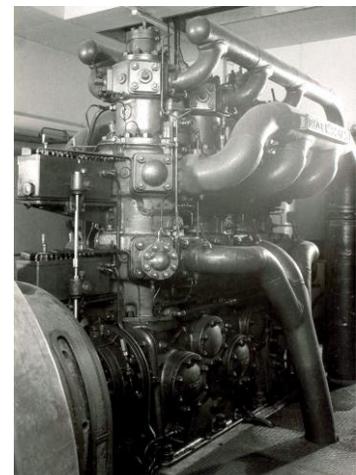
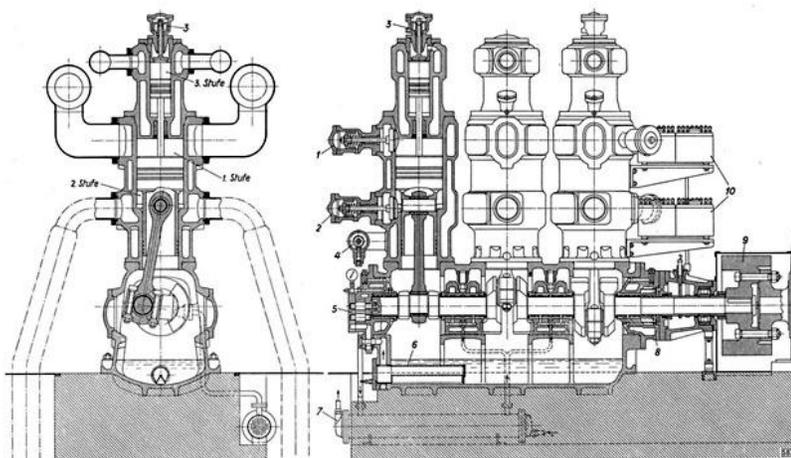


Bild 5-21 Die 3 Sulzer Dreistufen-Kolbenkompressoren, 1942 [Riesen 2007]

Aufgrund der Beschaffung einer Kehrlichtverbrennungsanlage und des nach den Ölkrise rasch wieder zerfallenden Ölpreises erfolgte die Wiederaufnahme des Wärmepumpenbetriebs erst nach 13 Jahren. 1985 bis 1986 wurde von Sulzer eine neue Wärmepumpenanlage mit Turbokompressoren und einer Heizleistung von 6.5 MW gebaut und in Betrieb genommen. Diese Anlage wurde aber durch eine Feuersbrunst vernichtet. 1987-1988 wurden zwei neue **Sulzer-Unitop-Wärmepumpen** mit zweistufigen Radialkompressoren und R-12 als Kältemittel eingebaut: Bild 5-16. Die gesamte Heizleistung der beiden Wärmepumpen betrug **13 MW** bei 15 °C Flusswasser- und 72 °C Vorlauftemperatur. Bei winterlichen Verhältnissen mit 3.5 °C / 72 °C wurde die Heizleistung auf 10 MW reduziert. Das neue Wärmepumpensystem wurde trotz etwa doppelter Heizleistung in derselben unterirdischen Maschinenhalle installiert wie die historische Wärmepumpenanlage von 1942. Die Wärmepumpen mit Zwischendruckkessel und Kondensatunterkühlung erreichten mittlere Leistungszahlen von 3.4. Erwähnenswert ist die Filtrierung des Flusswassers durch selbstreinigende Kugelfilter und die kontinuierliche Reinigung der Verdampferrohre durch zirkulierende Kugeln.

Infolge Fehlens grosser Fernleitungen ist das Walche-Wärmepumpensystem bis heute das grösste der Schweiz geblieben. Es deckte 50% des Wärmebedarfs des Fernwärmenetzes und reduziert den Heizölverbrauch um 4'500 Tonnen pro Jahr. Die SO₂- und NO_x-Emissionen wurden um 67% reduziert. 1998 wurde die Anlage mit dem Wechsel vom FCK-Kältemittel R-12 auf das FKW-Kältemittel R-134a nochmals modifiziert [AFB 1988].

1943 AMTSHÄUSER ZÜRICH (1'750 KW)

Im Hinblick auf den alarmierend stockenden Kohlenachschub nahm der Zürcher Stadtrat im Juni 1943 eine Offerte von **Escher Wyss** zum Bau eines grossen Wärmepumpensystems zur Beheizung von fünf Administrationsgebäuden im Bereich Werdmühle-Beatenplatz an. Die **Ammoniak-Wärmepumpe** mit 4 Zweistufen-Kolbenverdichtern (Bild 5-22) nutzte ebenfalls



Bild 5-22 Maschinenhalle mit Wärmepumpen und Kondensatoren, 1943 [Eberhard 2007]

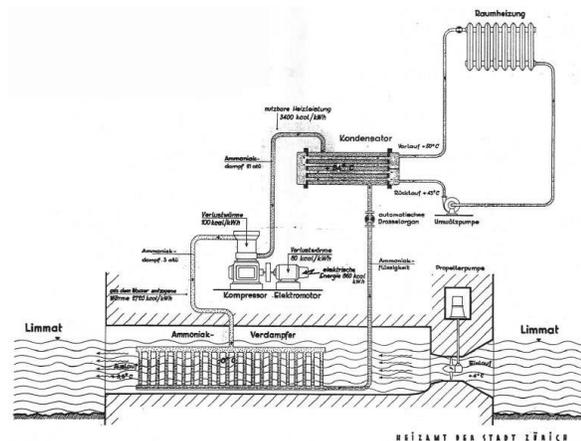


Bild 5-23 Prinzip der Heizung für die Administrationsgebäude, 1943 [Eberhard 2007]

Limmatwasser als Wärmequelle und wurde im Amtshaus 4 installiert. Bei einer Vorlauftemperatur des Heizungssystems von 50 °C erreichte die Wärmepumpe eine Wärmeleistung von 1'750 KW. Mit der Wärmepumpe konnten 80% des Gesamtwärmebedarfs gedeckt werden. Die Spitzenlast wurde durch einen Kohlekessel abgedeckt. Das Wärmepumpensystem für alle Amtshäuser kostete damals 560'000 Schweizer Franken. Dazu kamen noch 260'000 Franken für bauliche Veränderungen. Trotz den Wirren der Kriegszeit wurde auch dieses Wärmepumpensystem in sehr kurzer Zeit realisiert. Es konnte noch Ende 1943 in Betrieb genommen werden. Der vertikale Rohrverdampfer (Bild 5-23) wurde direkt in der Limmat am Bahnhofquai nördlich der Uraniabrücke installiert. Bei 7 °C / 50 °C erreichte das Wärmepumpensystem eine

Leistungszahl um 4 und einen sehr hohen Lorenz-Wirkungsgrad von 53%¹³. Aber auch hier bleibt offen, ob die Hilfsantriebe in die Energiebilanz einbezogen wurden [SBZ 1944], [Baumann M. et al 2007], [Eberhard 2007], [Mendler 2007]. Die Tabelle 5-2 gibt einen Überblick über die historischen Wärmepumpen der Stadt Zürich.

Tabelle 5-2 Hauptdaten der historischen Wärmepumpen der Stadt Zürich

	Rathaus	Hallenbad Zürich-City	Walche-Anlage Fernheizung	Amtshäuser
Jahr der Inbetriebnahme	1938	1941	1942	1943
Totale Heizleistung [kW]	100	1025	5860	1750
Heizleistung pro Einheit [kW]	100	325 / 700	2*2000 / 1860	1750
Betriebsart	Heizen (Kühlen)	Heizen	Heizen	Heizen
Art der Wärmequelle	Fluss	Abwärme / Seewasser	Fluss	Fluss
Wärmequellentemperatur [°C]	7	23 / 7	9 / 9	7
Wärmesenktemperatur [°C]	60	45 / 50	71 / 71	50
Leistungszahl COP		8.0 / 3.5	2.58 / 2.73	4.0
Jahresarbeitszahl	2.16			
Lorenz-Wirkungsgrad	22..28%	55% / 47%	47% / 49%	53%
Anzahl Kompressoren	1	2 / 3	2 / 1	4
Kompressorart	Rollkolben	Kolben	Radialkompressor / Kolben	Kolben
Kältemittel	R-12	Ammoniak	R-11/ Ammoniak	Ammoniak
Wärmepumpenhersteller	Escher Wyss	Escher Wyss	Brown-Boveri/ Sulzer	Escher Wyss

1943 KANTONSSPITAL ZÜRICH – EIN ABGEBROCHENES PROJEKT

Im Zusammenhang mit den Schweizer Pionierleistungen ist auch das abgebrochene Projekt zur Beheizung des Kantonsspitals Zürich erwähnenswert. Das originelle Konzept sah einen zentralen Verdampfer in der Limmat und eine 750 m lange Ammoniakleitung zur Wärmepumpe im 77 m über der Limmat gelegenen Spital vor [Egli 1943]. Der Verdampfer in der Limmat wurde bereits gebaut. Aber als nach dem Weltkrieg die Dringlichkeit für dieses Projekt nicht mehr gegeben war, wurde es gestoppt und der Verdampfer wurde wieder abgebrochen.

5.2.2 Ausgewählte weitere Wärmepumpen

Auch ausserhalb der Stadt Zürich wurden zahlreiche Wärmepumpen gebaut. Von diesen werden im Folgenden einige interessante Beispiele herausgegriffen.

Escher Wyss installierte 1941 eine Wärmepumpe in der **Brauerei Baumberger** in Langenthal mit **gleichzeitiger Nutzung von Wärme** (Spülen der Flaschen, Raumheizung) **und Kälte** (Produktion von Eis und Kellerkühlung). Auch Sulzer baute Kälteanlagen mit gleichzeitiger Abwärmenutzung, beispielsweise für die **Kunstseidefabrik in Widnau** oder einer **Grossmetzgerei in Basel**. Bei diesen Wärmepumpen bzw. Kältemaschinen mit „doppeltem Nutzen“ ergaben sich Gesamtleistungszahlen bis 5.5 [Ostertag 1946].

¹³ In der Literatur wird auch eine Wärmeleistung von 1.86 MW und eine Leistungszahl von 4.28 bei 4° C / 50° C erwähnt. Dies ergäbe einen unwahrscheinlich hohen Lorenz-Wirkungsgrad von 61%.

Auf Initiative des Kunden wurde 1943 in der Firma **Truninger in Solothurn** eine aussergewöhnliche **Ammoniak-Kleinwärmepumpe** mit einer Heizleistung von 10 kW installiert. Diese wurde über eine kleine Francis-Turbine und einen Riementrieb durch einen nahegelegenen Bach angetrieben, und sie nutzte diesen Bach auch als Wärmequelle. Der Kondensator war direkt in dem zu beheizenden Raum angeordnet. Der Betrieb an kalten Wintertagen erzwang eine mühsame manuelle Enteisung des Verdampfers im Bach. Trotzdem war dieses Kleinsystem bis 1963 in Betrieb. 1982 hat die Firma Truninger in ihrem neuen Gebäude in Langendorf erneut eine Wärmepumpenheizung installiert [Truninger et al. 2007].

Escher Wyss realisierte die Leistungsanpassung durch **Drehzahlregelung** bereits 1944 an einer 128 kW Ammoniak-Wärmepumpe, welche in den Etzelwerken der Schweizerischen Bundesbahnen in Altendorf installiert wurde. Dies nutzte warme Abluft aus den Transformatorstationen als Wärmequelle. Dank der Wärmequellentemperatur zwischen 20°C und 30 °C und einer für jene Zeit äusserst tiefen Heizungsvorlauftemperatur von nur 48 °C erreichte diese Wärmepumpe Leistungszahlen von 6 bis 11. Die Wärmepumpe vermochte 75% des Gesamtwärmebedarfs zu decken.

Ein interessantes Beispiel für die Freude und den Mut zu neuen Lösungen ist auch das 1946 für die **Lederwarenfabrik Schaffhausen** gebaute Ammoniak-Wärmepumpensystem. Es bestand aus zwei Kolbenkompressoren und einem direkt im Rhein angeordneten Steilrohrverdampfer. Als riskante Besonderheit wurden die Fabrikationsräume auf 6 Stockwerken **direkt durch Plattenkondensatoren** auf jedem Stockwerk **beheizt**. Ab diesen Plattenkondensatoren wurde die Wärme durch eine Warmluftheizung mit Ventilator in die Räume verteilt. Diese Wärmepumpe ist **nach 62 Jahren immer noch in Betrieb – und dies nicht nur für Demonstrationzwecke**. Die äusseren Anlageteile wurden allerdings modifiziert (korrodierten Verdampfer ersetzt, Anzahl der beheizten Räume von 9 auf 6 reduziert) [Bosshart 2008].

Zwischen 1945 und 1950 hat auch Sulzer zahlreiche Wärmepumpen gebaut. Anstelle der üblichen Radiatoren hat Sulzer schon sehr früh Strahlungsheizungssysteme eingeführt. Diese waren für den Wärmepumpenbetrieb besonders geeignet [Ostertag 1947]. Ein gutes Beispiel für Sulzers Wärmepumpenaktivitäten in dieser Periode ist die Wärmepumpe für das Administrationsgebäude der Metallwerke **Selve in Thun**. Sie nutzte **Grundwasser** als Wärmequelle und deckte bei einer Heizleistung von 440 kW gegen 92% der Gesamtheizleistung. Die Zentralheizung hatte eine für die damalige Zeit sehr tiefe Vorlauftemperatur von maximal 40°C. Mit 4.5 war die Jahresarbeitszahl entsprechend erfreulich hoch. Ein Sulzer-Wärmepumpensystem erreichte im den **Ziegelwerk Frick** durch **Nutzung feuchter Abluft** sogar eine Leistungszahl von 5.2 [Brügger et al. 1991].

Therma Schwanden¹⁴, ein bekannter Hersteller elektrischer Widerstandsheizungssysteme, plante und baute 1948 eine eigene Wärmepumpe zur Beheizung seines Personalhauses. Dieses Gebäude war für damalige Verhältnisse gut isoliert. 70% des Wärmebedarfs wurde bereits über ein Fussbodenheizungssystem gedeckt. Die restlichen Räume waren mit gut dimensionierten Radiatoren ausgerüstet. Die Wärmepumpe wurde mit Grundwasser ab rund 7 °C als Wärmequelle und R-12 als Kältemittel betrieben. Sie diente auch zur Warmwasserbereitung auf 45 °C. Die zwei Achtzylinderkompressoren wurden über Keilriemen angetrieben. Die Wärmepumpe erreichte einen Lorenz-Wirkungsgrad von 35% [Ostertag 1949]. Es bleibt allerdings auch hier unklar, ob dieses Resultat auch die Hilfsantriebe berücksichtigt.

¹⁴ Therma AG in Schwanden wurde 1978 von Electrolux übernommen und entwickelte sich zu einer der modernsten Fabrikationsstätten Europas für grössere Haushaltanwendungen.

5.3 Internationale Meilensteine der Wärmepumpenheizung

U.S.A. UND KANADA

In den U.S.A. wurde 1930 eine Wärmepumpe in ein Haus in Tucson/Arizona eingebaut. Es gab aber in den U.S.A. noch weitere **Wärmepumpeninstallationen**: 1932 wurde ein Bürogebäude der Southern California Edison Company in Los Angeles mit einer 420 kW Klimaanlage ausgerüstet. Diese diente **vornehmlich zur Raumkühlung** - aber zu rund einem Viertel der Leistung **auch der Raumheizung**. Die Leistungszahl für die Raumheizung lag bei 9°C / 23.5°C nur bei bescheidenen 2 [Ostertag 1946], was einem Lorenz-Wirkungsgrad von lediglich 9.8% entsprach. Willis Carrier installierte 1932 seine erste Wärmepumpe im Hauptbüro der „Uji utility“ in **Japan**. **Frigidaire** demonstrierte 1933 an der Weltausstellung "Century of Progress" von Chicago die Ganzjahresklimatisierung in Einfamilienhäusern [Nagengast et al. 2006]. Bis 1940 wurden in den U.S.A. weitere rund 40 „Wärmepumpen“ im Leistungsbereich von 25 kW bis 1'200 kW installiert. Diese offerierten als **Zusatz zur obligaten Sommerkühlung** auch eine Heizung im Winter – allerdings mit sehr bescheidener Effizienz. Aber diese „Wärmepumpen“ blieben vor 1938 eine Kuriosität. Effizienzvergleiche der Kompressions-Klimatisierungssysteme in der Ohio Power Company in Portsmouth (Luft/Luft) und in Coshocton (Wasser/Luft) zeigten auch 1940 recht geringe Effizienz [Ostertag 1946], [Thevenot 1979], [Groff 2005].

Um 1945 hat Robert C. Webber, ein Angestellter der „Indianapolis Power & Light Co“, mit seinem Tiefgefrierapparat experimentiert. Er senkte die Temperatur im Gefrierraum ab und verbrannte sich dabei beim Berühren der Wärmesenkenseite beinahe die Hände. Er nutzte darauf diese sonst verlorene Wärme zum Aufheizen des Zulaufs zu seinem Warmwasserboiler und produzierte so mehr Warmwasser als seine Familie brauchen konnte. Es blieb immer noch Abwärme übrig und deshalb leitete er warmes Wasser durch ein zylindrisch gewickeltes Rohr. Durch diesen blies er mit einem kleinen Ventilator Luft und konnte damit Kohle zur Raumheizung sparen. Webber war so erfreut über diese Ergebnisse, dass er beschloss, eine richtige Wärmepumpe zur Versorgung seines ganzen Hauses zu bauen. Dabei kam er auf die Idee, **Wärme aus dem Erdboden** mit einer über das ganze Jahr recht konstanten Temperatur zu entziehen. Er verlegte 152 m Kupferrohr zwei Meter unter der Erdoberfläche und liess das FCK-Kältemittel direkt in diesen Rohren verdampfen. Damit war die **erdgekoppelte Wärmepumpe mit direkter Kältemittelverdampfung** geboren. Die elektrische Wärmepumpe hatte eine Antriebsleistung von 2.2 kW. Die Wärme wurde im Haus durch ein Warmluftsystem verteilt. Im darauf folgenden Jahr hat Webber seinen alten Kohleofen verkauft. In **Kanada** wurde die erste erdgekoppelte Wärmepumpe 1949 installiert [Sanner 1992], [IGSHPA 2007].

Für die **Fenster- und Wandklimageräte** zur Raumkühlung und flammenlosen Heizung gab es in den U.S.A. rasch eine grosse Nachfrage. Um 1947 waren davon bereits 43'000 Einheiten verkauft [Nagengast et al. 2006]. Aber es gab wie oben erwähnt auch grössere Installationen, wie die Wärmepumpe zur Kühlung und Heizung des Equitable Building (ein Bürogebäude mit 14 Stockwerken) aus dem Jahr 1948 [ASME 80].

ENGLAND

T.G.N. Haldane baute 1927-1928 in England die erste Wärmepumpen-Klimatisierungsanlage zum Beheizen seines Büros in London und seines Hauses in Schottland. Ab 1946 wurden einige Wärmepumpenprototypen installiert (1948 waren es ein Dutzend). Davon sei die Wärmepumpe erwähnt, mit der die Festhalle für die britischen Feiern zum Kriegsende beheizt wurde. Dieser diente die Themse als Wärmequelle und der Kompressor wurde durch ein mit Stadtgas betriebenes Düsentriebwerk angetrieben [Thevenot 1979]!

DEUTSCHLAND

Die Deutschen, insbesondere K.Nesselmann und W.Niebergall, waren an Absorptionskältemaschinen im Wärmepumpenbetrieb interessiert. Einige dieser Aggregate wurden ab 1947 zur Erzeugung von Prozesswärme und zur Klimatisierung in mehreren Ländern installiert.

5.4 Brüdenkompression – eine Schweizer Erfolgsgeschichte

Der eigentliche Anfang der Salzproduktion durch mechanische Brüdenkompression fand in den 1920er Jahren statt, als es gelang, eine Lösung zur Verhinderung der Verkrustung der Wärmeübertragungsoberflächen durch Abtrennen der verkrustungsbildenden Mineralien zu finden und als die Korrosionsprobleme gemeistert wurden. Die erste **Pilotanlage mit Radialkompressoren** wurde 1920 in der deutschen **Saline Reichenhall** installiert. Sie wurde in enger Kooperation mit der Schweizer Firma **Kummler & Matter** gebaut. Anfänglich traten noch ernsthafte Kompressorkorrosionsprobleme auf, und zudem erwies sich der Prozess komplexer als erwartet. Deshalb wurde er 1923 der Firma **Escher Wyss** übergeben. Bereits **1926** konnte die erste industrielle **Brüdenkompressionsanlage mit einem Turbokompressor** (344 kW) in Betrieb genommen werden. Die fruchtbare Zusammenarbeit mit den Bayrischen Salzwerken gab Escher Wyss entscheidende Anstöße für die spätere Entwicklung von Wärmepumpen [Wirth 1955, 1995].



Bild 5-24
Kompressoren der
Schweizer
Saline Riburg,
1941
[Lieberherr 2007]

1941 baute **Escher Wyss** eine Brüdenkompressionsanlage in der Schweizer **Saline Riburg** (Rheinsalinen) für eine Kochsalzproduktion von 40'000 Tonnen pro Jahr: [Bild 5-24](#) und [Bild 5-25](#). Eine Erweiterung um einen zusätzlichen Kompressor erfolgte 1959. 1973 wurde durch Escher Wyss eine neue Anlage mit einer Kapazität von 250'000 Tonnen pro Jahr gebaut: [Bild 5-26](#). Sie ersetzte die historische Anlage von 1941 und blieb für manche Jahre Europas grösste Anlage. 1943 wurde auch die Schweizer **Saline Schweizerhalle** zu einer Brüdenkompressionsanlage umgebaut. 1964 wurde diese Anlage umgebaut und erhielt ein verbessertes Eindampfsystem mit einem Vierstufen-Radialkompressor: [Bild 5-27](#). Es erreichte Leistungszahlen von 13.5.

Heute arbeiten in den Salinen Riburg und Schweizerhalle die **grössten Wärmepumpensysteme der Schweiz** mit einer Gesamteindampfleistung von rund **80 MW**: [Bild 5-28](#) [Winkler 1995], [Lieberherr 2007].

Bild 5-25 Fließbild der Saline Riburg, 1941 [Lieberherr 2007]

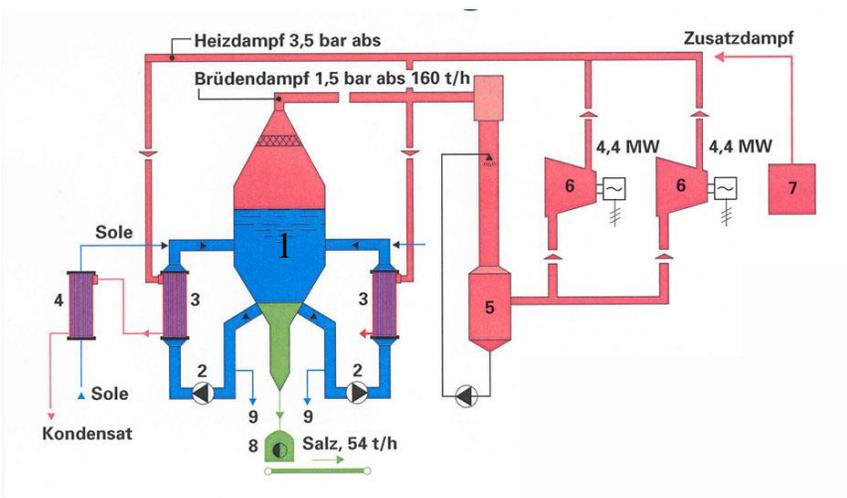
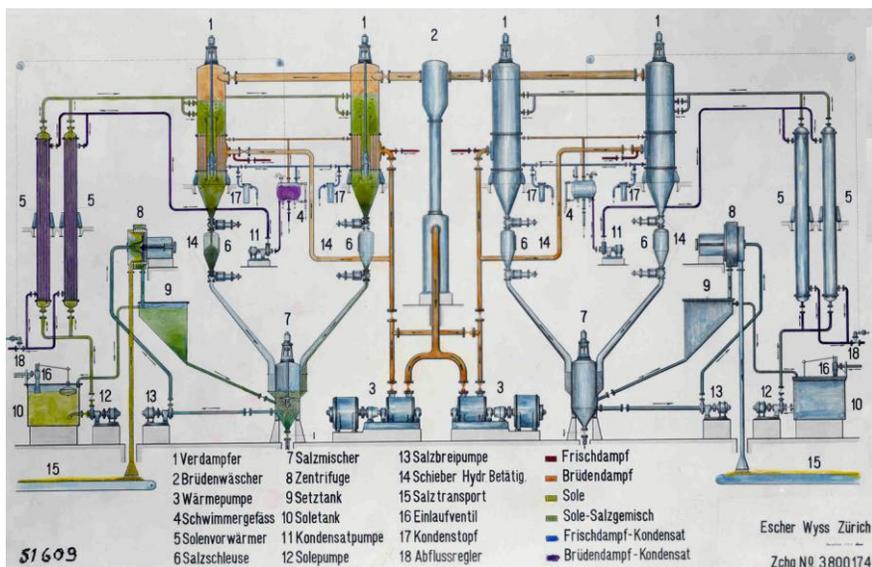


Bild 5-26 Fließbild der Saline Riburg nach 1973
 1 Verdampfer,
 2 Umwälzpumpen,
 3 Kondensatoren,
 4 Vorwärmer, 5 Wäscher,
 6 Kompressoren, 7 Kessel,
 8 Zentrifuge,
 9 Konzentrat
 ("Mutterlauge").
 [Lieberherr 2007]

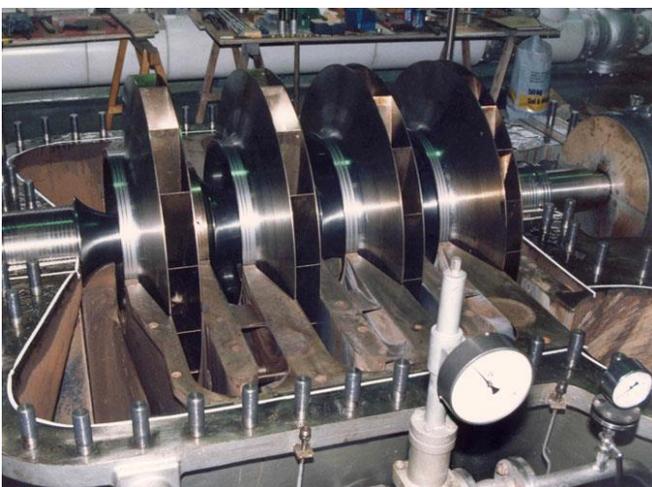


Bild 5-27 Neuer Kompressor der Saline Schweizerhalle, 1964 [Lieberherr 2007]



Bild 5-28 Heutiges Salzlager der Schweizer Rheinsalinen [Lieberherr 2007]

In der Schweiz wird in den Zuckerfabriken Aarberg und Frauenfeld Zucker aus einheimischen Zuckerrüben mit einem Zuckergehalt von ca. 17% produziert. Sie stellen zusammen rund

230'000 Tonnen Weisszucker pro Jahr her. Gegen Ende 1945 wurde auch die **Zuckerfabrik Aarberg** auf Brüdenkompressionsbetrieb umgerüstet. Diese Anlage wurde von **Escher Wyss** gebaut. Die Mehrstufen-Eindampfanlage für das **Konzentrieren der Zuckerlösung** wurde durch einen **doppelflutigen Radialkompressor** ([Bild 5-29](#)) mit einer Antriebsleistung von 2.9 MW betrieben. Dazu komprimierte der Escher-Wyss-Kompressor für die erste Verdampfungsstufe 125 Tonnen Dampf pro Stunde von 0.9 auf 1.3 bar. Diese weltweit **erste Kombination der Brüdenkompression mit einer Mehrstufeneindampfanlage** erreichte eine **hervorragende Leistungszahl von 26.8!** Die Anlage war bis 1984 in Betrieb. Dann wurde sie vergrößert und auf den neuesten technischen Stand gebracht. Der neue Radialkompressor von Atlas Copco ([Bild 5-30](#)) hatte nur noch 60 Tonnen Dampf pro Stunde von 1.1 bar auf 1.57 bar zu verdichten und der Leistungsbedarf des Elektromotors konnte auf 1.84 MW reduziert werden.

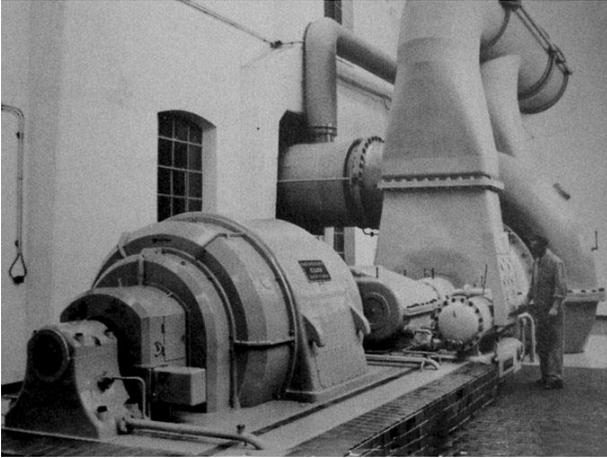


Bild 5-29 Erster Radialkompressor für das Konzentrieren der Zuckerlösung in Aarberg, 1945
[Zuckerfabrik, CH-3270 Aarberg]



Bild 5-30 Neuer Radialkompressor für das Konzentrieren der Zuckerlösung in Aarberg, 1984
[Zuckerfabrik, CH-3270 Aarberg]

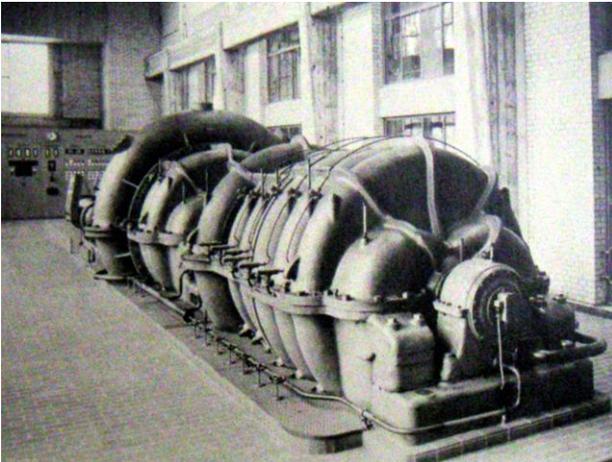


Bild 5-31 Axialkompressor für die Verdampfungskristallisation in Aarberg, 1945
[Zuckerfabrik, CH-3270 Aarberg]



Bild 5-32 Neue Radialkompressoren für die Verdampfungskristallisation in Aarberg, 1991
[Zuckerfabrik, CH-3270 Aarberg]

Ein zweites Brüdenkompressionssystem diente der **Verdampfungskristallisation**. Zu diesem Zweck komprimierte ein 3.3 MW **Axialkompressor** von Escher Wyss ([Bild 5-31](#)) 25 t/h Dampf von 0.25 bar auf 1.5 bar. Dies Teilsystem erreichte eine Leistungszahl von rund 5.3 [Brunner 1981] und war während 46 Jahren bis 1991 in Betrieb! Dann wurde der historische Kompressor anlässlich einer Totalrevision der Verdampfungskristallisation durch einen neuen Radialkom-

pressor von Sulzer – Escher Wyss¹⁵ (Bild 5-32) zur Verdichtung von 25 t/h Dampf von 0.23 bar auf 0.73 bar ersetzt. Damit wurde eine Leistungsreduktion des elektrischen Antriebmotors auf 2.0 MW erreicht [Brunner et al. 1981, 1992], [Brunner 1992], [Fankhauser 2007].

6 DIE PERIODE TIEFER ENERGIEPREISE 1951-1972

In den 1950er und 1960er Jahren fielen die Ölpreise stetig. Dadurch wurden in kälteren Klimazonen alle Wärmepumpenaktivitäten zu reinen Raumheizzwecken stark gebremst. Daraus ergab sich leider auch eine Stagnation in der Weiterentwicklung der Wärmepumpen. Eine weitere Folge war auch ein Stillstand in deren Marktdurchdringung, da in dieser Periode für Wärmepumpen im Allgemeinen keine akzeptablen Amortisationszeiten mehr erreichbar waren. Bis zum Erdölembargo im Jahr 1973 waren Wärmepumpeninstallationen deshalb auch Spezialfälle mit besonders günstigen Randbedingungen beschränkt.

Dagegen gab es in wärmeren Klimazonen weiterhin einen Bedarf sowohl für die Raumkühlung und die mit entsprechenden Geräten mögliche Raumheizung. In diesen Klimazonen mit Priorität auf Raumkühlung waren die „Wärmepumpen“ weiterhin erfolgreich. Der Erfolg der Klimatisierungsgeräte sicherte das Wärmepumpen-Know-how und ermöglichte eine Weiterentwicklung. Vorab in den U.S.A. und in Japan gab es einen deutlichen Aufschwung der Wärmepumpenanwendung in Wohngebäuden und in der Kühlung von Automobilen.

Europa und namentlich Schweizer Firmen übernahmen in dieser Zeit die Führung im Raumlüftungsbereich [Scholten 2004].

6.1 Komponenten und Kältetechnik

In dieser Zeitperiode war die Entwicklung gekennzeichnet durch die Einführung des Schraubenkompressors, eine deutliche Verbesserung der übrigen Kompressortypen, das Anhalten des triumphalen Siegeszuges der halogenierten Kohlenwasserstoffe und nicht zuletzt durch die aufkommenden Computer.

6.1.1 Dampfkompessionsprozess

KOMPRESSOREN

In dieser Zeitperiode war der **Schraubenkompressor** die einzig wirklich neue Maschine. Die Firma Ljungstroms Angturbin änderte ihren Namen 1951 in Svenska Rotor Maskiner AB. Diese Firma hat für Schraubenkompressoren grundlegende Entwicklungen durchgeführt und in der Folge an fast alle Schraubenkompressorhersteller Lizenzen vergeben [Cashflo 2007]. Durch Öleinspritzung konnte das mit Schraubenkompressoren erreichbare Druckverhältnis deutlich erhöht werden. Damit war der Schraubenkompressor 1958 auch reif für die Kältetechnik. Diese Maschinen fanden in der betrachteten Zeitperiode aber infolge des geringen Wirkungsgrads und bescheidener Druckverhältnisse noch keine weite Verbreitung in der Kältetechnik. In den 1970er Jahren hat Bernhard Zimmern in Paris den „Mono-Schraubenverdichter“ mit nur einer Welle und zwei Verdrängerrädern entwickelt. 1974 hat auch Grasso in Holland einen Einwel-

¹⁵ 1970 wurde Escher Wyss durch Sulzer übernommen. Die Aktivitäten von Sulzer deckten ein sehr breites Feld ab und reichten vom Textilmaschinenbau bis zur Prozess- und Medizintechnik.

len- Schraubenkompressor eingeführt. Schraubenkompressoren erreichten aber erst nach etwa 1980 signifikante Stückzahlen. Sie wurden hauptsächlich in den U.S.A., Schweden, Deutschland, Holland und Japan produziert. Die lang anhaltende Konkurrenz zwischen Kolben- und Schraubenkompressoren wurde gegen das Ende der 1980er Jahre durch die Einsicht, dass sich diese beiden Maschinen gut ergänzen, abgelöst: Die Vorteile der Kolbenkompressoren überwiegen bei tieferen und jene der Schraubenkompressoren bei höheren Leistungen [Frommann 2004], [Thevenot 1979].

Bei der Massenproduktion waren die U.S.A. Westeuropa weit voraus. Die Massenfertigung **hermetischer Kompressoren** begann in den 1950er Jahren. **Brown Boveri (BBC)** entwickelte und produzierte nicht nur grosse Turbokompressoren. Um 1960 war BBC Mannheim mit 25'000 Einheiten pro Jahr für Leistungen bis 10 kW Europas grösster Produzent von offenen und halbhermetischen Kältemittelkompressoren. Zu jener Zeit produzierte BBC auch Kühlschränke [Stenzel 2004]. 1956 baute **Sulzer** den ersten ölfreien Labyrinthkolbenkompressor für Kältemittel und die dänische Sabroe führte den W-Typ Ammoniakkolbenkompressor mit 1'200 U/min ein.

In den frühen 1950er Jahren erreichte eine Stufe eines **Radialturbokompressors** ein Druckverhältnis von nur etwa 1.5. Durch enorme Anstrengungen in den Bereichen der Werkstoffwissenschaft, der Strömungslehre und der Genauigkeitssteigerung in der Fertigung wurde es möglich, die Rotordrehzahl so weit zu erhöhen, dass die Rotoren Tangentialgeschwindigkeiten im Bereich der Schallgeschwindigkeit erreichen. Es wurde damit möglich, ein Druckverhältnis um 8 in einer Stufe zu erreichen. In dieser konzertierten Forschungsanstrengung spielten in der Schweiz die Firmen **Escher Wyss** und **Brown Boveri** in enger Zusammenarbeit mit der **ETH Zürich** eine hervorragende Rolle. Sulzer installierte 1958 den ersten **Hochgeschwindigkeits-Radialkompressor** in einer Klimatisierungsanlage in England. Um eine Verdampfungstemperatur von $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu erreichen, wurden 1967 zwei Sulzer-Turbokompressoren in Serie geschaltet [Friothers 2008].

KÄLTEMITTEL

Gegen Ende der 1950er Jahre haben die **halogenierten Kohlenwasserstoffe** praktisch alle alten Kältemittel ersetzt. Dies mit Ausnahme von Ammoniak, welches in grossen, industriellen Anlagen weiterhin verwendet wurde. Ab 1968 wurde das teilhalogenierte R-22 zum Standardkältemittel für Kleinklimageräte und Wärmepumpen [Nagengast et al. 2006].

COMPUTER

In den späten 1960er und frühen 1970er Jahren kamen in der Kältetechnik die ersten Computer zum Einsatz und provozierten rasch einen **enormen technologischen Wandel**. Ursprünglich revolutionierten die noch voluminösen, in speziell klimatisierten Räumen betriebenen Computer die **Berechnung** der Anlagen und ersetzten dort Rechenschieber, Logarithmentafeln und langsame, geräuschvolle mechanische Rechenmaschinen. Damit konnten optimale Lösungen für Komponenten und ganze Anlagen viel präziser und in einem kleinen Bruchteil des früheren Zeitbedarfs gefunden werden. Bald eroberten die Computer auch den **Betriebsbereich**. In den frühen 1970er Jahren hat **Brown Boveri**¹⁶ mit dem System „ULMA“ das weltweit erste kommerzielle Online-**Überwachungssystem** eingeführt. Die frühen ULMA-Generationen basierten noch auf der patentierten Phototransistortechnologie. Einige dieser Installationen sind in Papierfabriken noch heute in Betrieb [ABB 2008].

¹⁶ Inzwischen wurde ABB (Asea Brown Boveri) einer der Marktführer in der Automatisierungstechnik und im Bereich drehzahlvariabler Antriebe. Dies auch im Bereich grösserer Wärmepumpenanlagen. ABB ging 1988 aus dem Zusammenschluss der Schweizerischen Brown Boveri Baden und der Schwedischen ASEA hervor.

6.1.2 Absorptionsprozess

Obwohl der Dampfkomppressionsprozess immer effizienter und billiger wurde, behielten **Absorptionskühlschränke** in lärmempfindlichen Bereichen wie Hotelzimmern oder Campingwagen ihren hohen Marktanteil. Bei Campinganwendungen war auch der zusätzliche Vorteil, mit unterschiedlichen Energien betrieben werden zu können, entscheidend. Um 1950 wurden die ersten solarbeheizten Absorptionskühlschrank-Prototypen, insbesondere von G. Lof, gebaut [Nagengast et al. 2006].

In **Japan** und in den **U.S.A.** hielt das „Goldene Zeitalter der Absorption“ noch weiter an. 1959 führte Trane die erste hermetische Ausführung ein. 1960 baute Carrier bereits 3.5 MW Einheiten. Es gab aber noch viele andere US-Firmen, welche Absorptionskältesätze produzierten. Um 1965 wurden Kälteleistungszahlen um 0.6 bis 0.7 erreicht. Da die Kosten für Heizöl und Dampf gering waren, wuchs der Markt für Absorptionskältemaschinen rasch und erreichte in den U.S.A. um 1970 mit einem Wasserkältesatzanteil von 25% sein Maximum. Vor allem in Japan wurden höhere Wirkungsgrade angestrebt. Kawasaki Thermal Engineering baute 1964 eine indirekt beheizte **Doppeleffekt**-Absorptionskältemaschine. 1965 bauten Mitsubishi und Ebara ihre ersten Einheiten. Auch Sanyo und Hitachi führten in den 1960er Jahren neue Aggregate ein. In den späten 1960er Jahren begannen auch in den U.S.A. mehrere Firmen in effizientere Prozesse zu investieren. Um 1970/1971 bauten Carrier und Trane in ihren Laboratorien ebenfalls indirekt beheizte Doppeleffekt-Einheiten. Trane kommerzialisierte sie 1972 [Burget et al. 1999].

6.2 Wärmepumpen in der Schweiz

Wie bereits erwähnt, kam es in dieser Periode bei den „normalen“ Wärmepumpen zur ausschliesslichen Wärmeerzeugung zu einer Stagnation. Im Gegensatz dazu wurden einige interessante Brüdenkompressionsanlagen gebaut.

6.2.1 Seltene Wärmepumpen zu Heizzwecken

Wärmepumpen zu reinen Heizzwecken konnten der eindrucklichen Marktdurchdringung in den 1940er Jahren nicht folgen. Die Gründe waren nicht technischer Art. Sie lagen in den stetig sinkenden Heizölpreisen, welcher mit einer Zunahme der Preise für elektrische Energie einherging.

Trotzdem wurden bereits in den 1950er Jahren Forschungsarbeiten zu horizontalen **Erdkollektoren** durchgeführt. Sie führten zu ersten Richtwerten für den Wärmedurchgangskoeffizienten, die Länge und den Durchmesser der Rohre sowie den Abstand zwischen den Rohren. In Versuchen wurden Leistungszahlen bis 3 erreicht. Sogar die Regeneration im Sommer und Latentwärmespeicher wurden zu jener Zeit bereits untersucht [Ostertag 1955], [Baumann et al 2007].

In grösseren Kaufhäusern entstand im Sommer ein Raumkühlungsbedarf. Dies führte zu einer sporadischen Verwendung entsprechender Kältesätze zur Raumheizung im Winter. Solche Systeme wurden durch **Dreyer-Hanson** gebaut. Den sogenannten **„Air-Topio“** gab es für Kälteleistungen von 10 kW bis 50 kW. Um 1967 baute Kurt Trüssel¹⁷, der spätere Gründer der Firma **KWT** (Kälte-Wärmetechnik) in Belp, eine kleine Kälteanlage für eine Käserei in Mamis- haus (bei Schwarzenburg FR) mit einer Kühlleistung von 5 kW und einer **gleichzeitigen Nut-**

¹⁷ Zu jener Zeit war Kurt Trüssel Angestellter der Firma Therma in Zürich.

zung der bei 45 °C anfallenden **Kondensatorabwärme**. Sie ist nach 40 Jahren immer noch in Betrieb [Trüssel 2007]!

Aufgrund speziell tiefer Elektrizitätstarife im Zusammenhang mit dem Bau eines neuen Kraftwerkes der Zentralschweizerischen Kraftwerke auf der Göscheneralp kam es im Spital Altdorf zur Realisierung einer 350 kW Ammoniak-Wärmepumpe zur Raumheizung und Warmwasserbereitung. Im Interesse einer höheren Leistungszahl wurden die Heizkörper der alten 90°C / 70 °C - Zentralheizung um 40% vergrößert. Als Resultat sank die maximale Vorlauftemperatur auf immer noch sehr hohe 77°C. Das durch **Escher Wyss** hergestellte Wärmepumpensystem mit drei Wärmepumpeneinheiten nutzte Grundwasser als Wärmequelle und wurde 1961 in Betrieb genommen. Bei einer mittleren Temperatur von 4 °C (Grundwasser) und 44 °C (Heizungsvorlauf) ergab sich mit der ersten Wärmepumpeneinheit unter Berücksichtigung der für die Grundwasserpumpe benötigten elektrischen Energie eine Leistungszahl von 4.15, welche einem respektablen Lorenz-Wirkungsgrad von 52.3% entspricht. Zwei weitere, parallel betriebene Wärmepumpeneinheiten erreichten bei 4 °C / 42.5°C eine Leistungszahl von 4.4 oder einen Lorenz-Wirkungsgrad von 53.7%. Unter diesen Temperaturbedingungen erbrachten die drei Einheiten eine Wärmeleistung von je 116 kW. Eine Einheit wurde im Sommer auch zur Raumkühlung über eine Kühldecke genutzt [Mustoe 1977].

6.2.2 Erfolg bei der Brüdenkompression

Das weltweite Geschäft mit den Brüdenkompressionsanlagen verlief auch in diesem ersten "Tal der Tränen" trotzdem erfolgreich. In den 1960er und 1970er Jahren hielt **Escher Wyss** in diesem Bereich einen Weltmarktanteil von etwa 30%. Hauptkonkurrenten waren Standard Messo (Deutschland), Wiegand (Deutschland) und Swenson Evaporator (U.S.A.). Einen ausgezeichneten Überblick über die Entwicklung der Brüdenkompressionstechnik findet man bei [Austmeyer et al. 1987, 1993].

6.3 Internationale Meilensteine der Wärmepumpenheizung

ZENTRALEUROPA

Nicht nur aufgrund des als unangenehm empfundenen Lärms und der oft lästigen Luftströmung, sondern auch infolge der bei den meisten Einheiten **fehlenden Enteisungsmöglichkeit** fanden die **Klimatisierungseinheiten** aus den U.S.A. in Zentraleuropa wenig Akzeptanz. Gegen das Ende der 1950er Jahre waren in Zentraleuropa Warmwasserzentralheizungen mit maximalen Temperaturen von 80 °C im Vorlauf und 60 °C im Rücklauf üblich. Das war natürlich für Wärmepumpen viel zu hoch. Strahlungsheizungen mit Maximaltemperaturen von 50 °C / 40 °C wurden noch als exotisch betrachtet. Sie wurden aber als Deckenheizsysteme mit der Möglichkeit zur Sommerkühlung bereits fabriziert [Ostertag 1958].

FRANKREICH

Bemerkenswert ist in Frankreich die Wärmepumpenbeheizung einer Fabrik und eines Büros in der Nachbarschaft eines Kühlhauses in Chalon-sur-Saône (1950) und die Beheizung von Sportzentren und Schwimmbädern insbesondere in der näheren Umgebung von Kunsteisbahnen. 1973 gab es in Frankreich etwa 200 Wärmepumpen.

DEUTSCHLAND

In Deutschland kamen Wärmepumpen **nur sporadisch** zum Einsatz. Im Hinblick auf die tiefen Kosten von Kesseln und Heizöl waren die Kosten für eine ausschliessliche Wärmepumpenheizung zu hoch. Nur wenn sich gleichzeitig auch Kälteanwendungen ergaben, bewegte sich etwas. Beispiele sind die gleichzeitige Nutzung von Kälte und Wärme in Molkereien und die Wärmerückgewinnung bei der Klimatisierung von Kaufhäusern. Entsprechende Pilotanlagen wurden durch die Elektrizitätswirtschaft und das Ministerium für Landwirtschaft gefördert [Ostertag 1955], [Adolph 2004], [Dienel 2004]. 1969 wurde in Deutschland die erste Sole-Wasser-Wärmepumpe mit horizontalem Erdkollektor als Wärmequelle realisiert [Sanner 1992].

ÖSTERREICH

Die **österreichischen Salzwerke** rüsteten ab 1951 auf Brüdenkompression um [Matl 1984].

U.S.A.

In den U.S.A. gab es eine langsame, aber stetige Entwicklung von Wärmepumpen, vorab von Einheiten im Leistungsbereich von 12 kW bis 35 kW. In den 1950er Jahren erlebten **Wärmepumpenboiler** mit etwa 300 Liter Inhalt und Warmwassertemperaturen bis 65°C einen starken Marktauftritt. Sie wiesen allerdings eine recht geringe Leistungszahl von nur etwa 2.2 auf und kühlten den Aufstellungsraum oft in unerwünschter Weise ab („Wärmeklau“). Dies war vor allem im Winter während Zeiten mit Raumheizungsnotwendigkeit von erheblichem Nachteil [Ostertag 1955].

Wie bereits in 5.3 erwähnt, wurden kleine **Klimatisierungseinheiten** im Leistungsbereich von 250 W bis 1 kW oft in den Fenstern installiert. Sie sorgten nicht nur für die Sommerkühlung, sondern mit der Kondensatorwärme auch für eine Winterheizung. Diese vollständig elektrisch betriebenen Ganzjahresklimageräte brachten im Sommer einen zusätzlichen Komfort und verbreiteten sich im Süden der U.S.A. ab 1951. Die Wachstumskurve zeigte zunächst einen steilen Anstieg (2'000 Einheiten im 1951; 10'000 im 1957 und 76'000 Einheiten im 1963). Dann entstanden aber Qualitätsprobleme. Die hohe Unzuverlässigkeit führte zu einer Stagnation der Verbreitung dieser Klimatisierungseinheiten. In diesem Zusammenhang hat ARI¹⁸ 1958 die **erste Leistungszertifizierung** mit einem **Qualitätslabel** für diese Klimatisierungseinheiten eingeführt [Nagengast et al. 2006].

Noch vor 1955 haben **General Electric** und die **Marveyer Corporation** Luft/Luft Wärmepumpen zum Heizen und Kühlen mit einem elektrischen Antriebsleistungsbereich von 2.2 kW bis 3.7 kW verkauft. Diese waren mit einer Enteisungsvorrichtung ausgerüstet und erreichten Leistungszahlen im Bereich von 2 bis 3. Einige dieser Einheiten wurden auch in der Schweiz verkauft. J. Donald Kroeker baute 1952 Wärmepumpen für Bürogebäude und Einkaufszentren mit **Grundwasser als Wärmequelle** [Nagengast et al. 2006]. In den frühen 1950er Jahren wurden in den U.S.A. einige Wärmepumpen durch **Verbrennungsmotoren** angetrieben. Dabei wurden in einigen Fällen auch die heissen Motorabgase bereits genutzt [Ostertag 1955].

JAPAN

Ab 1950 hat Japan seine Installationen zur Klimatisierung stark ausgebaut und war an Wärmepumpen zum Kühlen und Heizen entsprechend interessiert. Allein im Jahr 1957 wurden solche Wärmepumpen mit einer Gesamtleistung von 11.6 MW in Betrieb genommen.

¹⁸ Air-conditioning and refrigeration institute.

7 ENTHUSIASMUS UND ENTTÄUSCHUNG 1973-1989

Das Jahr 1973 wurde zu einem der bedeutendsten Wendepunkte in der Geschichte des zwanzigsten Jahrhunderts. Zuvor gewöhnte sich die Welt an eine unbegrenzte Verfügbarkeit der fossilen Energien Kohle, Heizöl und Erdgas. Die Weltwirtschaft verliess sich vollständig auf diese kostengünstigen Energieträger. 1973 änderte diese Situation dramatisch. Die Veränderung wurde durch einen Beschluss der Arabischen Mitglieder der OPEC (Organization of Petroleum Exporting Countries) ausgelöst. Sie beschloss im **Oktober 1973** als Antwort auf die Unterstützung Israels im **Yom-Kippur-Krieg** mit Syrien und Ägypten, die Erdölversorgung der Westlichen Staaten zu reduzieren. Dieses **Erdölembargo** wirkte sich mit einer globalen Rezession und einer hohen Inflation verheerend auf die Weltwirtschaft aus.

Die sogenannten entwickelten Nationen hatten nun zu lernen, wie sie mit weniger Energie auskommen können und mussten ihre enorme Abhängigkeit von importierten fossilen Energien überdenken. Das Erdölembargo löste weltweite Sofortmassnahmen aus. So wurden beispielsweise in der Schweiz der Motorfahrzeugverkehr an Sonntagen verboten, die Raumtemperatur auf maximal 20 °C vorgeschrieben und die Strassenbeleuchtung während der Nacht ausgeschaltet usw. Als das Erdölembargo im März 1974 aufgehoben wurde, waren die Ölpreise auf über 300% gestiegen. Einen wesentlich grösseren Einfluss auf den Ölpreis als die physische Reduktion der Liefermenge und die Preiserhöhung um rund 100% durch einige OPEC-Mitglieder übten die Erdölfirmen aus. Sie ergriffen die Gelegenheit zur Gewinnerhöhung, auf die sie schon während Jahren gewartet hatten.

Das Interesse an Alternativen Energien und an der rationellen Verwendung der Energie war lange nur Angelegenheit einiger Idealisten geblieben. Nun rückten diese Themen in den Mittelpunkt der öffentlichen Diskussion. Weltweit wurden neue Energieversorgungsstrategien ausgearbeitet. Dies gab nicht nur der Sonnenenergie, der Windenergie, der Biomasse und der geothermischen Energie neue Chancen, sondern auch der **Nutzung der Umgebungswärme durch Wärmepumpen**. Eine **Renaissance der Wärmepumpen** begann. In dieser Situation wurde durch die OECD-Staaten die **Internationale Energie Agentur IEA** gegründet. Diese identifizierte die Wärmepumpentechnologie rasch als eine der Schlüsseltechnologien zur Reduktion des Energiebedarfs im Gebäudebereich. Dies war der Anfang der internationalen Zusammenarbeit im Wärmepumpenbereich im Rahmen des „IEA Heat Pumping Technologies Implementing Agreement“ [Groff 2005].

Die Tendenz zur rationelleren Energienutzung wurde durch die **zweite Ölkrise im Jahr 1979** beschleunigt und **1980** mit dem Ausbruch des **Krieges zwischen Iran und Irak** noch verstärkt. Im Hinblick auf die erneut auf das Doppelte angestiegenen Ölpreise wurden die **alternativen Energien** immer populärer. Die Haupthoffnung lag aber auf dem Ersatz des Erdöls durch **Nuklearenergie**. Man wandte sich erwartungsvoll den nuklearen Hochtemperaturreaktoren und schnellen Brütern zu. Man träumte auch von der Realisierbarkeit der Energiegewinnung durch Fusionsreaktoren bis zur Jahrtausendwende. Gleichzeitig stiegen ernsthafte **Bedenken über die Umweltverschmutzung** auf, welche sich im sauren Regen und im Waldsterben besonders deutlich manifestierten. All dies begünstigte die Heizung mit Wärmepumpen und führte zu einem zweiten Wärmepumpenboom.

Das (zu) rasche Wachstum des Wärmepumpengeschäfts führte aber zu zahlreichen Anbietern mit ungenügenden Fachkenntnissen. Das war einer der Hauptgründe für den **Zusammenbruch des Europäischen Wärmepumpengeschäfts** gegen das **Ende der 1980er Jahre**. Deshalb wurden die 1980er Jahre für die Heizungs-Wärmepumpen zum zweiten „Tal der Tränen“.

7.1 Komponenten und Kältetechnik

Hauptentwicklungen in dieser Periode waren der Durchbruch von Scroll- und Schraubenkompressoren, das Ende der Fluorchlorkohlenstoffe FCK, der definitive Durchbruch der Plattenwärmeübertrager und die Mikroprozessorregelung.

7.1.1 Dampfkompessionsprozess

KOMPRESSOREN

1972, 67 Jahre nach der Erfindung von Leon Creux begann die Arthur D. Little Co. in Cambridge, Mass. die Entwicklung der Scrolltechnologie für die Kompressoren von Klimateinheiten. Im Hinblick auf die Bedeutung dieser Arbeiten finanzierte sie zusammen mit Trane die Forschungsarbeiten für **Scrollkompressoren**. Dank der neuen computergesteuerten und hochpräzisen Frästechnik wurde in den 1980er Jahren die industrielle Fertigung von Scroll- und Schraubenkompressoren voran getrieben. Die erste Massenfertigung von Scrollkompressoren durch **Copeland** erfolgte 1986. 1992 erreichte die dritte Generation von Copeland Scrollkompressoren eine Jahresproduktionsmenge von einer Million Einheiten. Die Herstellung wurde globalisiert (in Europa seit 1995) und erreichte gegen Ende 1997 10 Millionen Stück. 2001 folgte ein Scrollkompressor mit Dampfzwischen einspritzung - dies war für Sanierungswärmepumpen ein sehr erfreulicher Schritt¹⁹. In den U.S.A. wurde **Bristol Compressors** ein weiterer, bedeutender Hersteller von Scrollkompressoren. **Maneurop** (eine Tochtergesellschaft von Danfoss) in Lyon, Frankreich, wurde zum wichtigsten europäischen Konkurrenten für Scrollkompressoren. In Deutschland begann die Massenfertigung von Schraubenkompressoren gegen das Ende der 1980er Jahre [Frommann 2004].

Die untere Leistungsgrenze für **Radialkompressoren** lag in der Größenordnung von 200 kW. 1975 betrug die höchste Antriebsleistung für einen Radialkompressor 25 MW. **Axialkompressoren** wurden in der Kältetechnik erst nach den Radialkompressoren eingesetzt²⁰. Sie kamen dann nur für sehr grosse Leistungen, insbesondere bei der Kompression von Erdgas vor der Verflüssigung zum Einsatz. In Skikda, Algerien, hat die BST (Brown Boveri Sulzer Turbo Machines) Maschinen mit über 80 MW Leistung auf einer Welle eingesetzt [Thevenot 1979]. Die deutsche Borsig baute einen Axialturbokompressor für eine Ammoniak-Kälteanlage mit einer Kälteleistung von 12 MW. 1973 brachte Sulzer eine neue Generation von Hochgeschwindigkeits-Radialkompressoren, den sogenannten „UNITURBO“, auf den Markt [Friootherm 2008].

KÄLTEMITTEL

James Lovelock berichtete 1973 über in der Atmosphäre gefundene Spuren von Kältemittelgasen. 1974 haben Sherwood Rowland und Mario Molina vorausgesagt, dass **Fluorchlorkohlenstoff-Kältemittel** (FCK) die höhere Stratosphäre erreichen. Sie vermuteten, dass das durch partielle Dissoziation in der Atmosphäre freigesetzte Chlor die **Ozonschicht**, welche sich auf 25 bis 35 km über der Erde befindet und uns von der hochenergetischen UV-Strahlung schützt, **schädige**. Diese Furcht wurde 1978 zur Gewissheit. 1985 entdeckte man das „**Ozonloch**“ über der Antarktis. Gegen 1990 waren Rowland's und Molina's Voraussagen bewiesen [Thevenot 1979].

Nun folgte eines der wenigen Beispiele, bei denen sich die Menschheit im Interesse der Verhinderung einer Zukunftskatastrophe freiwillig und erfolgreich einschränkte. Mit dem **Toronto Protokoll** wurde 1984 ein Entwurf für eine schrittweise Reduktion der FCK-Verwendung be-

¹⁹ Heute ist dieser Kompressor im Leistungsbereich von 5 bis 45 kW erhältlich, www.ecopeland.com

²⁰ Für die Brüdenkompression setzte Escher Wyss bereits 1945 einen Axialkompressor ein (Bild 5-31).

schlossen. Darauf folgte die Wiener Konvention zum Schutz der Ozonschicht. Im September 1987 wurde mit dem **Montreal Protokoll** ein rigoroser Plan zum Ausstieg aus den FCK-Kältemitteln vereinbart. Weltweit wurden **Notprogramme** zur raschen Realisierung dieses Ausstiegs lanciert. In einer Rekordzeit von nur vier Jahren wurde der Fluorkohlenwasserstoff (FKW) R-134a entwickelt. Unglücklicherweise sind R-134a und andere FKWs sehr schwer abbaubare Substanzen (persistent), und sie haben eine sehr grosse Treibhauswirkung. In der Folge wurden speziell in Europa Lösungen mit **Kohlenwasserstoffen** wie Propan und Isobutan als Kältemittel gesucht. Diese Bemühungen fielen in den U.S.A. und in Japan aus Angst vor Haftpflichtfolgen bei Brand- und Explosionsunfällen nicht auf fruchtbaren Boden. In Europa begann 1993 die Massenfertigung von Kühlschränken mit Kohlenwasserstoffen als Kältemittel [Kunis et al. 2004], [Frommann 2004].

Nicht azeotrope Mischungen von Kältemitteln wurden um 1984 eingeführt. Mit Ammoniak-Wasser können beispielweise bei Wärmepumpenboilern - oder generell bei Wärmesenken mit stark ändernder Temperatur – durch den Joule- anstelle des Ranking-Prozesses signifikant höhere Leistungszahl erreicht werden [Mucic und Schermann 1984].

WÄRMEÜBERTRAGER

In den 1970er Jahren hielten die **Plattenwärmeübertrager** endgültig Einzug in die Kälte- und Wärmepumpentechnik. Für synthetische Kältemittel wurden die Elastomerdichtungen bereits in der Mitte der 1980er Jahre durch gelötete Verbindungen ersetzt. Diese Technik fand eine eindruckliche Verbreitung. Zwischen 1987 und 2001 wurden weltweit rund drei Millionen gelötete Plattenwärmeübertrager mit profilierten Platten produziert. Lasergeschweisste Plattenverbindungen wurden zu Beginn der 1990er Jahre eingeführt [Frommann 2004].

ELEKTRONISCHE REGELUNG

Ein entscheidender Meilenstein der 1980er Jahre war die Einführung von Mikroprozessoren²¹. Diese ermöglichten nicht nur den Wechsel von mechanischen P-Reglern zu PID-Reglern, sondern auch die Verwendung von bedeutend mehr Sensoren und Aktoren. Daraus resultierte eine deutlich verbesserte Temperaturregelung auf der Wärmesenken- und der Wärmequellen-seite. Dies ist für Wärmepumpen mit Luft als Wärmequelle von besonderem Vorteil. **Carrier** führte bereits 1989 ein durch einen Mikroprozessor mit Sensoren im Verdampfer, im Kondensator und im Kompressor gesteuertes **elektronische Expansionsventil** ein. Dieses System wurde als "Flotronic" bezeichnet [Szokody 2007].

KÄLTETECHNIK

Für die industrielle Kältetechnik Europas waren in den 1980er Jahren **BBC-York**, Stahl Kältetechnik, Sabroe, Linde und **Sulzer** Hauptlieferanten [Frommann 2004].

7.1.2 Absorptionsprozess

KLEINE ABSORPTIONSWÄRMEPUMPEN

In den 1980er Jahren wurden zahlreiche Versuche zur Entwicklung einer **Absorptionswärmepumpe** mit Heizleistungen **unter 50 kW** unternommen [Loewer 1981], [Murphy und Phillips 1984], [Schäfer und Stephan 1984]. Je nach Komplexität des Absorptionsprozesses wurden

²¹ Intel begann 1969 mit der Entwicklung ihres ersten Mikroprozessors für den Taschenrechner eines japanischen Herstellers. Heute kommen in den industrialisierten Ländern um die 50 Mikroprozessoren in einem einzigen Haushalt vor: www.intel.com.

zur Heizung Nutzungsgrade von 1.15 bis 1.4 erreicht. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis vermochte aber nicht zu begeistern, und auch die Probleme mit der Lösungspumpe waren wenig marktfreundlich. Absatzweise arbeitende Absorptionskälteprozesse wurden insbesondere für die Verwendung von Sonnenenergie untersucht [Peters et al. 1986]. Kleinammoniakwärmepumpen für Heizzwecke erreichten aber nie einen kommerziellen Erfolg.

U.S.A.

Die Nachwirkung des Ölembargos von 1973 begünstigte den Dampfkomppressionsprozess mit seiner höheren Effizienz. Selbst bei den **grossen Wasserkühlsätzen** in den U.S.A. fiel der Anteil an Absorptionsanlagen bis 1978 auf weniger als 10%.

JAPAN

In **Japan** war die Situation anders. Die japanischen Firmen fuhren fort, ihre Doppeleffekt-Absorptionskältesätze zu perfektionieren. 1975 übertraf der Anteil an Absorptionskältesätzen jene von Dampfkomppressionskältesätzen erstmals. 1980 offerierte das Finanzministerium den Endverbrauchern, welche gasbeheizte Absorptionsaggregate einsetzten, Steuererleichterungen. Mitte der 1980er Jahre haben die grossen Wasser-Lithiumbromid-Absorptionskältesätze für die Kühlung Nutzungsgrade von 1.2 überschritten. In Japan wurden Absorptionsanlagen bis über 31.6 MW Kälteleistung gebaut.

7.2 Schweizer Beiträge zur Wärmepumpenheizung

Im Anschluss an mehr als zwei Dekaden der Stagnation erfuhren die Wärmepumpen durch das Ölembargo von 1973 eine **Wiedergeburt**. Adolf Ostertag, der Leiter der Ingenieurabteilung von Escher Wyss für Kältetechnik und Wärmepumpen vor und während dem zweiten Weltkrieg, erinnerte in einer Publikation an die Grundlagen und Besonderheiten der Wärmepumpentechnik zur Raumheizung und Warmwasserbereitung und deren Integration in Fernheiznetze [Ostertag 1974].

Die Entwicklung einer zweiten **Generation von Wärmepumpen** für Wasserzentralheizungen für Einfamilienhäuser und grössere Wohnbauten begann unmittelbar nach dem Ölembargo von 1973. Gegen 1980 erreichten korrekt funktionierende kleinere Wärmepumpeneinheiten (10 - 25 kW) nur etwa 1.9 bis 2.3 für Luft als Wärmequelle. Die Werte bei Sole/Wasser-Systemen mit horizontalen Erdkollektoren waren nicht viel grösser [Hubacher 2007]. Böse Gerüchte mit Jahresarbeitszahlen nur wenig über 1 wurden in der Tagespresse abgedruckt [Blattmann 1981]. Der anfängliche Wärmepumpenboom endete mit dem sich verschlechternden Ruf der Wärmepumpe. Dies war auf eine zu grosse Zahl unseriöser Anbieter mit technisch bedenklich konzipierten Anlagen und ungenügender Installationsplanung zurückzuführen.

Die **dritte Generation** von Kleinwärmepumpen nach der zweiten Ölkrise im 1979/1980 war weniger voluminös und hatte einen kleineren Kältemittelinhalt. Mit Ausnahme von Luft blieben horizontale Erdkollektoren – oft kombiniert mit unverglasten Dachkollektoren – die Hauptwärmequelle. Es wurden aber auch thermoaktive Gebäudeelemente mit integrierten Rohrleitungen (Wände und Dächer vorfabrizierter Garagen, Fassadenelemente und spezielle Dachziegel) verwendet. R-502 wurde zum bevorzugten Kältemittel für Wärmepumpen, ohne R-22 und R-12 ganz zu verdrängen. Nebst der Beheizung von Einfamilienhäusern wurden grössere Wärmepumpen für öffentliche Gebäude, Einkaufszentren, Schwimmbäder, Hallenschwimmbäder und industrielle Prozesse (vorab in der Nahrungs- und Metallindustrie) etc. gebaut.

In den 1980er Jahren kamen auch Wärmepumpen mit direktem **Gasmotor-** und **Dieselmotorantrieb** im Leistungsbereich von 200 kW bis 1'000 kW auf [Bitterli 1986]. Sie waren allerdings

nicht erfolgreich. Nach einigen Betriebsjahren hatten sie mit zu häufigen Pannen und zu hohen Unterhaltskosten zu kämpfen. Zudem waren sie im Betrieb nicht so flexibel wie die Kombination von Blockheizkraftwerken mit Wärmepumpen. Diese ist bedeutend zuverlässiger und es werden trotz kleiner Verluste bei Energieumwandlung und im elektrischen Netz Nutzungsgrade von 150% und mehr erreicht [Zogg 1995].

Bevor gegen Ende der 1980er Jahre ein erfolgreicher Neustart mit kompetenten Anbietern erfolgen konnte, benötigte der Wärmepumpenmarkt eine gewisse Selbstreinigung und konzentrierte Begleitmassnahmen zur Qualitätssicherung. 1993 gab es auch einen Versuch zur einer fruchtbaren Zusammenarbeit der Wärmepumpenhersteller SHF Ostermündigen (Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-Wärmepumpen) und Schweizer Hedingen (Luft/Wasser-Wärmepumpen) sowie die für Kleinwärmepumpen vertriebsorientierten Firmen CTC Wärmetechnik Zürich und Scheco Winterthur. Das Konsortium „Integral Wärmepumpen“ überlebte aber nur wenige Jahre.

7.2.1 Wärmepumpenpioniere im Einfamilienhausbereich (10-50 kW)

In diesem Leistungsbereich wurde unmittelbar nach 1973 sehr viel unternommen – aber es gibt nur wenige Dokumente dazu. Die Pioniere in diesem Bereich haben alle Arten von Wärmepumpensystemen realisiert – nicht selten Tag und Nacht. Aber sie kümmerten sich nicht um Publikationen. Deshalb sind die meisten der folgenden Ausführungen aus persönlichen Interviews mit den betreffenden Personen entstanden.

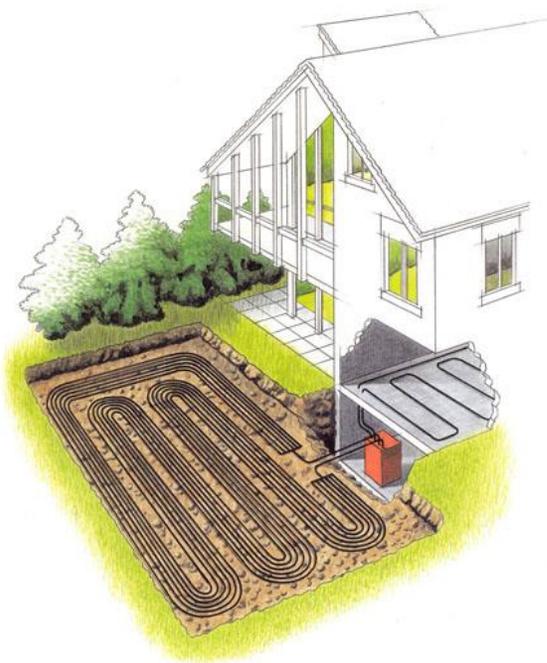


Bild 7-1 Wärmepumpenanlage mit horizontalem Erdkollektor, Neucalora, um 1980

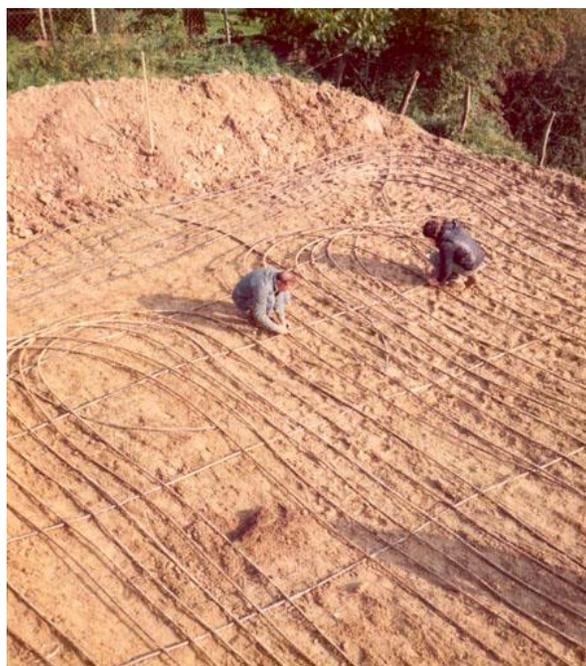


Bild 7-2 Horizontaler Erdkollektor im Bau, 1978 [Grimm 2007]

Für die **Heizung von Einfamilienhäusern** lag der häufigste Wärmeleistungsbedarf an den kältesten Tagen im Jahr im Bereich von 15 kW bis 25 kW. Bei Zweifamilienhäusern lag er etwas höher. Es gab noch keine geeigneten Wärmepumpensysteme für Warmwasser-Zentralheizungen mit Luft oder Grundwasser als Wärmequelle. Dies motivierte zahlreiche Pioniere zur Entwicklung tauglicherer Lösungen für diesen Bedarf. Es handelte sich dabei meist um geschickte Monteure und Techniker aus den Bereichen Kältetechnik, Klimatisierung und Elektrizitätsversorgung. Diese Pioniere produzierten Wärmepumpen in kleinen Stückzahlen auf



Bild 7-3 Dachkollektor mit unverglasten Polyethylenrohren auf dem Dach, 1978 [Grimm 2007]



Bild 7-4 Dachkollektor zwischen den Sparren unter der Ziegelabdeckung, 1978 [Grimm 2007]

gewerblicher Basis im Allgemeinen für den Schweizer Markt. Alle benützten kostengünstige hermetische Kolbenkompressoren und andere Komponenten aus dem Weltmarkt für die Kälte-technik. Als Kältemittel verwendeten sie meist R-12 und später R-22. Bis 1978 waren **horizontale Erdkollektoren** (Bild 7-1, Bild 7-2) üblich. Diese wurden oft mit **unverglasten Dachkollektoren** (Bild 7-3, Bild 7-4) kombiniert. Diese Kombination für Einfamilienhäuser wird in

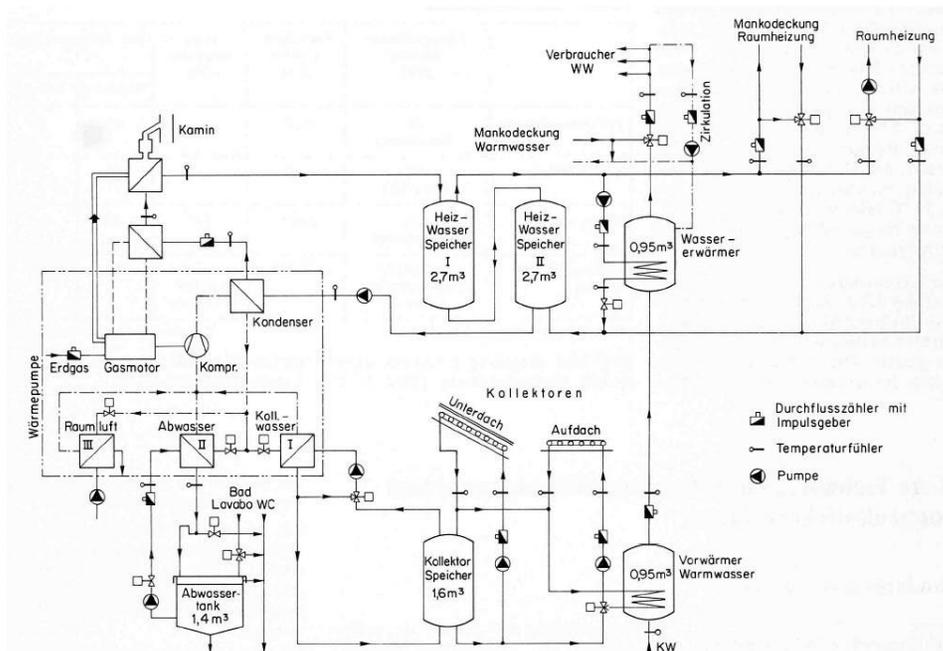


Bild 7-5
Beispiel eines exotischen Systems mit Gasmotorwärmepumpe, Aufdachkollektor gemäss Bild 7-3, Unterdachkollektor gemäss Bild 7-4 und Wärmerückgewinnung aus häuslichem Abwasser [Gass 1984]

[Promatec 1978] detailliert beschrieben. Sie wurde gelegentlich auch für Wohnblocks verwendet [Baumann und Züllig 1983]. Es gab aber auch recht exotische Lösungen, wie das im **Bild 7-5** gezeigte Gasmotorwärmepumpensystem mit einer Kombination von Dachkollektoren und Wärmerückgewinnung aus dem häuslichen Abwasser. Die oft kritisierte elektrische Widerstandsheizung war ein wichtiger Wegbereiter für die Wärmepumpen. Ihre relativ hohen Energiekosten erforderten eine **gute thermische Isolation** der Gebäude, ein gut ausgebautes Elektrizitätsverteilungsnetz und bei Zentralspeicheranlagen eine auch für Wärmepumpen ge-

eignete Warmwasserheizung im Gebäude. Die Wärmepumpenpioniere, die auch oft aus dem elektrischen Widerstandsheizbereich stammten, ergriffen die Chance für eine effizientere Nutzung der Elektrizität.

GRIMM / NEUCALORA

Einer der ersten unter diesen Wärmepumpenpionieren war der 1928 geborene Heinz Grimm. Nach einer Berufslehre als Werkzeugmacher betätigte er sich sehr vielseitig. Seine Aktivitäten reichten von elektrischen Freileitungen bis zur Klimatisierung. 1960 machte er sich selbständig und produzierte elektrische Zentral-Widerstandsheizungen für die Bernischen Kraftwerke (BKW). Sein erstes Wärmepumpenfunktionsmuster hat er 1973 gefertigt. Der erste Betrieb überdauerte nur eine Nacht. Dies hinderte Grimm aber nicht daran, sein neues Funktionsmuster in Zusammenarbeit mit den BKW gegen Ende 1973 an der Oberländer Herbstausstellung (OHA) in Thun vorzustellen. 1974 installierte Grimm seine erste Wärmepumpe in einem Einfamilienhaus in Wynigen. Ursprünglich benutzten Grimm's Wärmepumpen – man nannte sie „Grimm-Maschinen“ – horizontale **Erdkollektoren** aus Polyethylenrohren: Bild 7-1. Später hat er diese zur Regeneration des Erdbodens mit **Dachkollektoren** (Bild 7-3) kombiniert. Diese bestanden ebenfalls aus Polyethylenrohren. Sie wurden entweder auf dem Dach oder unter dem Dach zwischen den Sparren (Bild 7-4) angeordnet. Grimm nutzte aber auch **Luft, Grundwasser und Seewasser** als Wärmequelle. Zur lärmfreien Nutzung von Umgebungsluft baute er Energiezäune (Bild 7-6). Er experimentierte auch mit Latentwärmespeichern und Kompressoren mit variabler Drehzahl zur Leistungsanpassung. In seiner Wärmepumpe fanden Verdampfung und Kondensation an auf der eigenen Drehbank hergestellten Doppelrohrwindeln aus Kupfer statt: Bild 7-7. Bereits 1975 berichtete Grimm über in seinen erwähnten Wärmequellen gemessene Temperaturprofile [Kunckler 1975].



Bild 7-6 Energiezaun-Verdampfer, um 1980
Neucalora [Grimm 2007]



Bild 7-7 "Grimm Maschine", um 1980
Neucalora [Grimm 2007]

Heinz Grimm baute stets **ganze Wärmepumpensysteme** einschliesslich der Wärmequelle und des Wärmeverteilsystems im Gebäude. In diesem Punkt wich seine Meinung von jener der Konkurrenten ab. Die hohen Kosten für die vielen Experimente führten leider zum Konkurs der Firma Grimm. 1977 schloss sich Grimm der neuen Firma **Neucalora** in Bern²² an. 1981 waren bereits 1'000 Grimm-Maschinen installiert und 1989 schon 2'000 Einheiten. Es bestand auch eine Zusammenarbeit mit der Fachhochschule Biel und mit Lucien Borel von der ETH-Lausanne. 1990 wechselte Neucalora von der aufwändigen Doppelrohrkonstruktion auf Platten-

²² 1992 ist Neucalora von Bern nach Ostermundigen umgezogen.

wärmeübertrager. 1993 wurde die unten erwähnte Firma SHF übernommen und noch im gleichen Jahr wurden unter dem Namen „**Integral Wärmepumpen**“ auch Kleinwärmepumpen für CTC²³ in Zürich und Scheco in Winterthur produziert. 1995 wurde Neucalora durch den Wärmepumpenhersteller **Grünewald**²⁴ in Affoltern a.A. übernommen [Grimm 2007], [Giger 2007].

SHF / STEINMANN

1973 gründeten in Zollikofen der Mechaniker und Hauptinvestor Albert **Steinmann**, der Kältetechniker Karl **Hess** und der Verkaufsfachmann Norbert **Felber** die Firma **SHF**. SHF hatte bald einen guten Ruf für verlässliche Wärmepumpen auch für Heizleistungen über 100 kW. Einige SHF Wärmepumpen sind heute noch in Betrieb. 1976 übernahm SHF die Kältefirma AirCold in Worblaufen. Dadurch kam Manfred Beerhalter zur SHF. 1982 trat Steinmann aus der SHF aus und baute in Kirchlindach seine eigene Firma **Steinmann** auf. Diese wurde 2007 eine Tochterfirma von **Danfoss** (www.danfoss-steinmann.ch). Die Firma SHF wurde an Grünewald, später an Frutiger²⁵ und schliesslich 1993 an Neucalora verkauft [Beerhalter 2007], [Grimm 2007].

GRÜNIGER / SOLTHERM

Emil Grüniger, ein ehemaliger Monteur von Escher Wyss, hat sich weltweite praktische Erfahrung in der Kälte- und Wärmepumpentechnik erworben. Ab 1973 befasste er sich mit dem Bau einer Kleinwärmepumpe. 1975 begann er in seiner eigenen Firma **Soltherm** in Altendorf mit dem Bau von Wärmepumpen. Sein erstes Wärmepumpensystem mit einer Heizleistung von 10 kW hatte einen direkt verdampfenden horizontalen Erdkollektor aus Kupferrohren mit Epoxyharz-Verbindungen. Seine Installation in Altendorf brachte bereits die später wohlbekannten Ölrezirkulationsprobleme bei Direktverdampfungssystemen an den Tag. Er setzte danach auf indirekte Verdampfung mit durch eine Wärmeträgerflüssigkeit durchströmten „normalen“ horizontalen Erdkollektoren. Soltherm baute etwa 500 solcher Wärmepumpensysteme mit hermetischen Maneurope-Kolbenkompressoren. Grüniger war mit Kurt Trüssel von KWT unter den ersten, welche die Kältemittelenthitzung im Winter zur Beheizung von Räumen im Kellergeschoss (z.B. Wäschetrocknungsräume) und im Sommer zur Enderhitzung des Brauchwarmwassers nutzten [Grüniger 2007], [Szokody 2007].

HUBACHER / KAUFMANN

In diesem Zusammenhang ist auch Peter **Hubacher** als einer der ersten Planer kleiner Wärmepumpensysteme zu nennen. Er installierte 1976 eine Wärmepumpe der Firma **Kaufmann** in Netstal mit offenem Bitzer-Kolbenkompressor. Von der Firma Kaufmann ist nicht mehr viel bekannt. Sie soll zuverlässige Wärmepumpen gebaut haben; ging dann aber in Konkurs [Hubacher 2007].

7.2.2 Wärmepumpensysteme mittlerer Grösse (50-1000 kW)

SZOKODY / HOVAL HERZOG / HOVAL / CARRIER

Unter den Wärmepumpenpionieren hatte Gyula Szokody einen besonderen Einfluss auf die Berufsgemeinschaft der Schweizer Kleinwärmepumpenbauer. Er kann nicht nur auf einen aussergewöhnlichen persönlichen Lebenslauf zurückblicken (3 Jahre Studium der Theologie im kommunistischen Ungarn, Flucht aus dem „Arbeiterparadies“ und anschliessend Ingenieurstudium) – er erbrachte der Schweizerischen Wärmepumpenszene einen grossen persönlichen

²³ Heute CTC Giersch in CH-8112 Otelfingen.

²⁴ Heute Grünewald in CH-8112 Otelfingen.

²⁵ Frutiger AG, Tiefbohrungen, CH-3661 Uetendorf.

Beitrag. 1974 trat er in die Firma **Hoval Herzog** (www.hoval.ch) in Feldmeilen als Produktverantwortlicher für Wärmepumpen und Solarenergie ein und war ab anfangs 1980 bis 1995 Vorsitzender der Technischen Kommission der schweizerischen „Arbeitsgemeinschaft Wärmepumpen“ AWP (siehe 7.2.8).

Für **grösseren Wärmebedarf** setzte Hoval Herzog auf modifizierte **Carrier Wasserkältesätze**. Diese luftgekühlten Maschinen waren für warme Klimazonen konzipiert. Für die Verwendung als Wärmepumpe mussten spezielle Kondensatoren konstruiert werden. Bereits 1974 hat Hoval ein Wärmepumpensystem für die Warmwasserzentralheizung und die Warmwasserbereitung in einer Überbauung mit 40 Häusern in Balzers (Liechtenstein) gebaut. Die 3 in Frankreich gebauten Carrier Wasserkühlsätze mit je 4 Kompressoren wurden mit speziellen Kondensatoren zum Erreichen einer Kondensationstemperatur von 60 °C versehen. Der benachbarte Rhein diente als Wärmequelle. Die Gesamtheizleistung des Wärmepumpensystems betrug **1.18 MW**. Bei 9°C/60°C wurde eine Leistungszahl von 3.64 erreicht. Dies entspricht einem Lorenz-Wirkungsgrad von 46.2%. Zur Sicherstellung der Warmwasserbereitung musste eine der 3 Wärmepumpen eine Vorlauftemperatur von 55 °C erreichen. Aussergewöhnlich für jene Zeit war nebst dem **vollautomatischen Betrieb** eine **elektronische Mehrstufenregelung**, welche die benötigte Anzahl Einheiten in Abhängigkeit der Aussentemperatur zuschaltete [Szokody 1975, 2007].



Bild 7-8 Hoval-Carrier Sole/Wasser-Wärmepumpe, um 1980 [Szokody 2007]



Bild 7-9 Hoval Luft/Wasser-Wärmepumpe, 1985 [Szokody 2007]

Ein wegweisendes Wärmepumpensystem wurde 1975 durch Hoval Herzog in der Abwasserreinigungsanlage Obermeilen am Zürichsee gebaut. Es war die **erste Wärmepumpe der Schweiz**, welche den **Abfluss einer Abwasserreinigungsanlage als Wärmequelle** nutzte. Der Abfluss mit ungefähr 0.1 m³/s hatte eine Temperatur von 8 °C – 22 °C. Zwei Carrier-Wärmepumpen mit je 310 kW bei 7°C / 55°C versorgten den Faulturn der Abwasserreinigungsanlage mit Wärme und beheizten die in der Nähe gelegene Alterssiedlung Dollikon. Für den Faulturn war eine konstante Vorlauftemperatur von 50 °C erforderlich, um den frischen Schlamm auf 37 °C aufzuheizen. Um auch die Heizung des Altersheims mit einer Vorlauftemperatur von 50 °C betreiben zu können, mussten die Heizkörper entsprechend vergrössert werden. Auch dieses Wärmepumpensystem funktionierte mit der bereits oben beschriebenen automatischen Mehrstufenregelung [Gubser 1975, 1976], [Szokody 2007].

Um 1975 brachte Hoval Herzog die Wärmepumpe **“WW-Automat”** auf den Markt: Bild 7-8. Dies war nicht mehr nur ein angepasster Kältesatz, sondern ein vollautomatisches Wärmepumpensystem mit integrierter Warmwasserbereitung. Es wies nur je einen Ein-/Ausschalter

für die Raumheizung und die Warmwasserbereitung auf. Der erste WW-Automat wurde in einem Gebäude in Surava bei Tiefencastel installiert. 1985 realisierte Hoval Herzog in einer neuen Luft/Wasser-Wärmepumpe mit der Einführung des Mikroprozessors ein neues Enteilkonzept: Bild 7-9 [Szokody 2007].

WERMELINGER / AUTOFRIGOR / SCHECO / SULZER

In der Pionierzeit musste zur Überzeugung der Heizungsfirmen, der Architekten, der Bauherren und der Bewilligungsbehörden noch harte Arbeit geleistet werden. Der Neuanfang der Wärmepumpentechnik nach dem Erdölembargo war entsprechend gekennzeichnet durch langwierige Bewilligungsprozesse und Absagen infolge Unkenntnis und Ignoranz der Behörden und der Elektrizitätswerke. Im Zweifelsfall galt das „Nein“. In dieser Zeit hat sich bei **Autofrigor** in Winterthur der junge Ingenieur Bruno Wermelinger sehr für die Akzeptanz und hindernisfreie Verwirklichung der Wärmepumpentechnologie eingesetzt. Wermelinger liess sich nicht entmutigen und schreckte auch nicht vor einem Telefonanruf an den damaligen Bundesrat Willi Ritschard (verantwortlicher Minister für die schweizerische Energieversorgung) zurück. In diesem wies er den Energieminister auf die **Unzulänglichkeiten in den Bewilligungsverfahren** hin. Gemeinsam mit Max Ehrbar von der Fachhochschule Buchs und Gyula Szokody organisierte Wermelinger Arbeitsgruppen zu Themen der Wärmepumpentechnik. Dies führte zu den ersten **SVK²⁶-Richtlinien zur Wärmepumpentechnik**.

Ab 1975 baute die Kältefirma Autofrigor zahlreiche Wasser/Wasser- und Luft/Wasser-Wärmepumpen im Heizleistungsbereich von 10 kW bis 150 kW. Unter den bis 1977 gebauten rund 50 Wärmepumpen waren auch Ausführungen mit **Verbrennungsmotorantrieb** (Erdgasmotoren und Dieselmotoren) zur Erreichung **hoher Temperaturen** bis 120 °C und Systeme zur **kombinierten Nutzung von Wärme und Kälte**. Auch Plattenwärmeübertrager wurden früh eingeführt. Wermelinger war unter den Gründungsmitgliedern der AWP (siehe 7.2.8) und übernahm in einem Forschungsprojekt des Bundesamts für Energie die Führung beim raschen Ersatz der Fluor-Chlor-Kohlenstoff-Kältemittel [Wermelinger 1992]. Von 1981 bis zu seiner Pensionierung 1999 war er der Geschäftsleiter von **Scheco** in Winterthur (www.scheco.ch), welche 1989 zu einer Tochterfirma des Sulzer-Konzerns wurde. 1990 erreichte der Wärmepumpenanteil rund 25% des Umsatzes von Scheco. Auch als Stadtrat an seinem Wohnort Bülach engagierte sich Wermelinger für eine nachhaltige Energiepolitik. Nach seiner Pensionierung leitet er die Firma OptiCasa (www.opticasa.ch), welche Passivhäuser realisiert, die überhaupt kein aktives Heizsystem mehr benötigen. Die Lösung von OptiCasa wurde 2007 an der Eröffnungsfeier der Ausstellung Swissbau als „Gebäudehülle der Zukunft“ ausgezeichnet. Wermelinger bemerkte dazu: „Es treten auch hier wieder dieselben Probleme auf wie in der Wärmepumpen-Pionierzeit. Zunächst ist jedermann skeptisch und **man kann die Leute dann nur überzeugen, wenn man ihnen zeigt, dass es funktioniert!**“ [Wermelinger 2007].

SULZER SOLSET / BRUGNOLI / STREBEL / CRYOTHERM

Auf der Grundlage jahrzehntelanger Erfahrung baute **Sulzer** auch in dieser Periode zahlreiche mittelgrosse und grosse Wärmepumpen. Ab 1978 entwickelte Carlo Brugnoli eine kleine Luft/Wasser-Wärmepumpe mit integrierter Warmwasserbereitung. Man gab ihr den Namen **„Solset“**. Dank bivalent-parallel-Betrieb mit einem Jahresheizenergieanteil der Wärmepumpe von 75% lieferte Solset eine Vorlauftemperatur von 65 °C. Bei tieferem Wärmebedarf wurde die Spitzenlastdeckung durch einen elektrischen Durchlauferhitzer übernommen. Bei hohem Wärmebedarf übernahm ein Kessel die Spitzenlastdeckung. Um ein häufiges Ein- und Ausschalten der Wärmepumpe zu verhindern, wurde durch R. Huber ein spezieller Wärmespeicherbehälter entwickelt und patentiert. Während der Heizsaison 1978/1979 wurde Solset parallel im Labor und im Feld gemessen. Ab 1979 wurden die ersten Solset-Wärmepumpen mit

²⁶ Schweizerischer Verein für Kältetechnik.

Leistungen bis 30 kW an Installateure verkauft. Aber Serie-Kleinanlagen passten nicht recht ins Konzept von Sulzer.

Deshalb wurde die Entwicklung an den Kesselhersteller Strebel in Rothrist verkauft. Dieser erhöhte die Heizleistung in Weiterentwicklungen bis 120 kW. Sulzer verfolgte die Entwicklung einer kleinen Wärmepumpe weiterhin. Doch in den frühen 1980er Jahren kam es im Wärmepumpengeschäft aufgrund des oben Beschriebenen zu einem raschen Einbruch. In der Folge gab Sulzer 1984 die Entwicklung von Kleinwärmepumpen endgültig auf. Das ganze Wissen blieb bei Brugnoli, der es auch rettete. Er baute in Toffen mit Hilfe von Strebel die Firma **Cryotherm** auf. Das Solset-System wurde durch einen Wärmepumpenboiler und bis vier halbhermetische Kompressoren bis zu Heizleistungen von 300 kW weiterentwickelt. Aufgrund der folgenden Übernahmen durch die "Verzinkerei Zug" und eine österreichische Gruppe entschloss sich Brugnoli 1996, das Solset-Geschäft allein weiterzuführen. Bis zu seiner Pensionierung im Jahr 1998 wurden noch einige Solset-Wärmepumpen verkauft. Darunter solche mit bivalent-alternativem Betrieb und Erdwärmesonden. Auch Brugnoli war während langer Jahre Mitglied des technischen Komitees der AWP (siehe 7.2.8) [Bula und Bachofner 1979], [Brugnoli 2007].

7.2.3 Grosse Wärmepumpensysteme (> 1 MW)

Wie oben dargelegt, waren die Schweizer Pioniere grosser Wärmepumpensysteme lange vor 1950 aktiv. Das angereicherte Wissen führte bei grossen Wärmepumpen zu einer führenden Position von **Sulzer**²⁷. Sulzer baute auch in dieser Periode zahlreiche Anlagen. Im Folgenden werden nur wenige Beispiele erwähnt.

4.7 MW TOTALENERGIEANLAGE IM BAHNHOF LUZERN 1984

Wie bereits im Kapitel 1 erwähnt, sind Kombinationen von Blockheizkraftwerken mit Wärmepumpen im Vergleich zu Wärmepumpen mit direktem Verbrennungsmotorantrieb verlässlicher und flexibler. Eine der ersten Umsetzungen dieses modernen Konzepts erfolgte mit dem durch **Sulzer** beim Bahnhof Luzern für die Bundesbahnen und die Post gebauten System. Sechs²⁸ Wärmepumpeneinheiten (Bild 7-10) mit einer Heizleistung von je 440 kW und Wasser aus dem Vierwaldstättersee als Wärmequelle wurden installiert. Die elektrische Energie zum Antrieb dieser Wärmepumpen wurde durch drei Blockheizkraftwerke mit Gasmotoren (Bild 7-11) produziert. Diese Blockheizkraftwerke wiesen je eine Heizleistung von 678 kW und eine Elektrizitätsproduktion von 374 kW auf. Die Temperaturen auf der Wärmesenkenseite betragen für die Wärmepumpen 55°C - 60°C für den Vorlauf und 40°C für den Rücklauf. Für die Blockheizkraftwerke betragen sie 75°C bzw. 60°C. Im Sommer können die Wärmepumpen auch zur Kühlung mit einer Kälteleistung von je 320 kW eingesetzt werden. Für die Spitzendeckung wurde ein 3.2 MW Holzschnitzel-Kessel gebaut. Der Nutzungsgrad des Systems lag bei 170% und die Jahresheizöleinsparung betrug rund 1'300 Tonnen. Das System wurde bereits zu Beginn durch einen Computer unter Einbezug des momentanen Heizleistungsbedarfs und des aktuellen Elektrizitätstarifs optimal betrieben [Etterlin 1985]. 1990 wurde die Wärmepumpe zur Verwendung von Ammoniak anstelle von R-12 umgerüstet [Brügger et al. 1991]. Im Jahr 2007 wurden die ursprünglichen Blockheizkraftwerke durch neue von **AVESCO**²⁹ in Langenthal gebaute ersetzt. Die Gesamtwärmeleistung des Systems wurde auf 7.2 MW erhöht.

²⁷ 1970 wurde Escher Wyss in die Sulzer-Gruppe eingegliedert. Nach dem Verkauf der Hydraulikabteilung an die österreichische VA Tech im Jahr 1999 und der Turbokompressorabteilung an die deutsche MAN im Jahr 2001 verschwand der berühmte Name "Escher Wyss".

²⁸ 1984 wurden vier Einheiten installiert, zwei weitere folgten 1986.

²⁹ AVESCO baut in Langenthal grosse Blockheizkraftwerke für Erdgas und Biogas mit Caterpillar-Motoren. Diese erreichen elektrische Wirkungsgrade bis 43%. Kleinere Blockheizkraftwerke werden von AVESCO in Bubendorf hergestellt. Sie werden mit einem im Rahmen der BFE-Forschung neu entwickelten und von Liebherr in Bulle produzierten, hocheffizienten Verbrennungsmotor mit neuem Abgasrezirkulationssystem angetrieben [Hauptmann 2008].

Bild 7-10 Eine der Sulzer-Wärmepumpeneinheiten beim Bahnhof Luzern, 1984 installiert. 1990 auf Ammoniakbetrieb umgebaut
[Axima, CH-6010 Kriens]

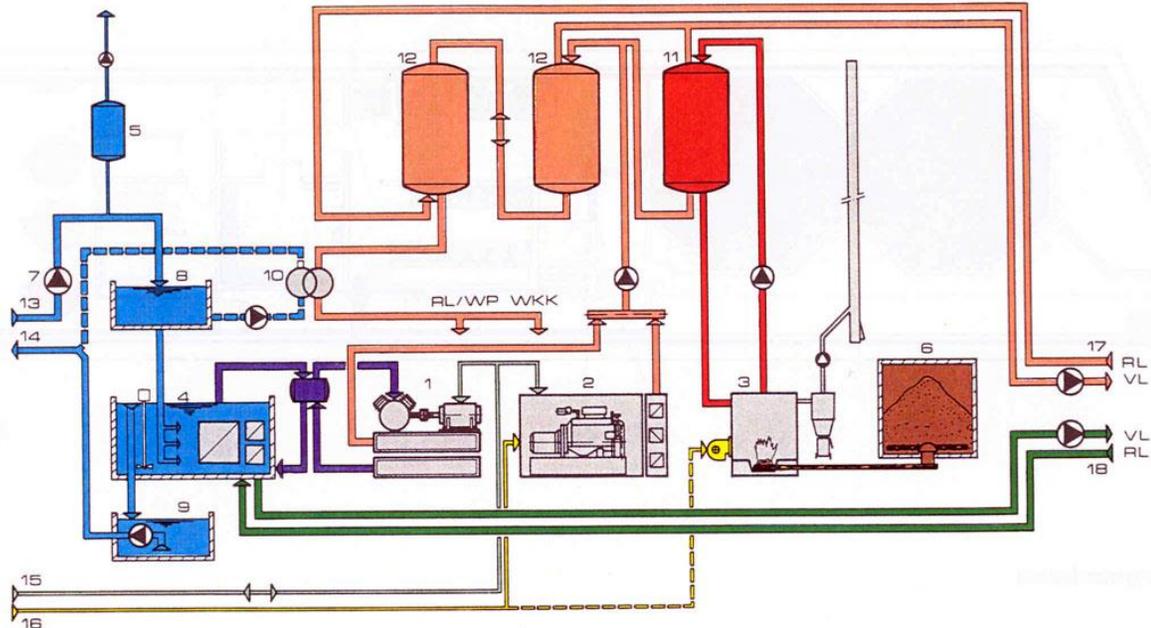
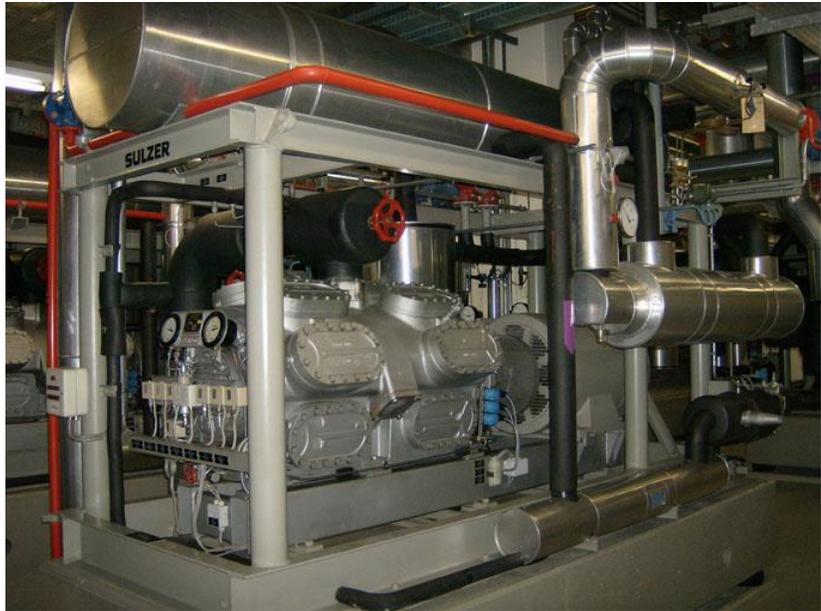


Bild 7-11 Prinzip der Blockheizkraftwerk-Wärmepumpen-Totalenergieeinheit beim Bahnhof Luzern (SBB und Post), 1984. 1 Wärmepumpen, 2 Blockheizkraftwerke, 3 Holzchnitzelkessel, 4 Eissuspensionsbecken, 5 Vakuumbehälter, 6 Holzchnitzelsilo, 7 Seewasserpumpen, 8, 9 Seewasserbecken, 10 Sommerkältesystem, 11 Hochtemperaturspeicher, 12 Niedertemperaturspeicher, 13 Seewassereintritt, 14 Seewasserrückführung, 15 Elektrizitätsnetz, 16 Erdgas, 17 Wärmeverteilsystem, 18 Kälteverteilsystem [Etterlin 1985]

19.2 MW TOTALENERGIEANLAGE AN DER ETH-LAUSANNE 1986

Aufgrund eines Vorschlags von Lucien Borel hat 1979 der beratende Ingenieur Ludwig Silberring³⁰ eine zukunftsweisende Heizungsanlage geplant [Silberring 1986]. Sie wurde durch **Sulzer** an der ETH-Lausanne (EPFL) realisiert: Bild 7-12. Die 1986 in Betrieb genommene Total-

³⁰ Das Ingenieurbüro „Dr. Ludwig Silberring“ in Zürich existierte bis 2005.

energieanlage enthält zwei Gasturbinen-Generatoreinheiten, welche die elektrische Energie zum Antrieb von zwei elektrischen Wärmepumpen liefern. Die **Gasturbinen-Generatoreinheiten** weisen eine elektrische Leistung von je 3 MW (elektrischer Wirkungsgrad 28.1%) und eine Wärmeleistung von je 5.7 MW (thermischer Wirkungsgrad 53.4%) auf. Ihr Betrieb ist von jenem der Wärmepumpen entkoppelt. Sie werden mit leichtem Heizöl betrieben.

Die zwei identischen **Wärmepumpen** sind mit Schraubenkompressoren mit Öleinspritzung und Economizer-Stutzen ausgerüstet: **Bild 7-13**. Sie werden mit Ammoniak als Kältemittel und Wasser aus dem 1 km entfernten Genfersee mit einer mittleren Temperatur von 6 °C während der Heizsaison als Wärmequelle betrieben. Die Wärmeleistung der Wärmepumpen beträgt je 3.9 MW. Das Seewasser wird aus einer Tiefe von 65 m in einem Abstand vom Strand von 700 m entnommen. Das um 3 K abgekühlte Wasser wird in einen nahen Fluss zurückgegeben. Die beiden Wärmepumpen mit getrennten Ammoniakkreisläufen können je nach Heizungsbedingungen entweder in Serie (Zweistufenwärmepumpe) oder parallel (dann ist eine Wärmepumpe meist im Stand-by-Betrieb) betrieben werden. Interessant ist, dass Ammoniak hauptsächlich im

Bild 7-12 Vereinfachtes Schema der Totalenergieanlage an der ETH-Lausanne (EPFL), 1986
[Pelet et al. 1997]

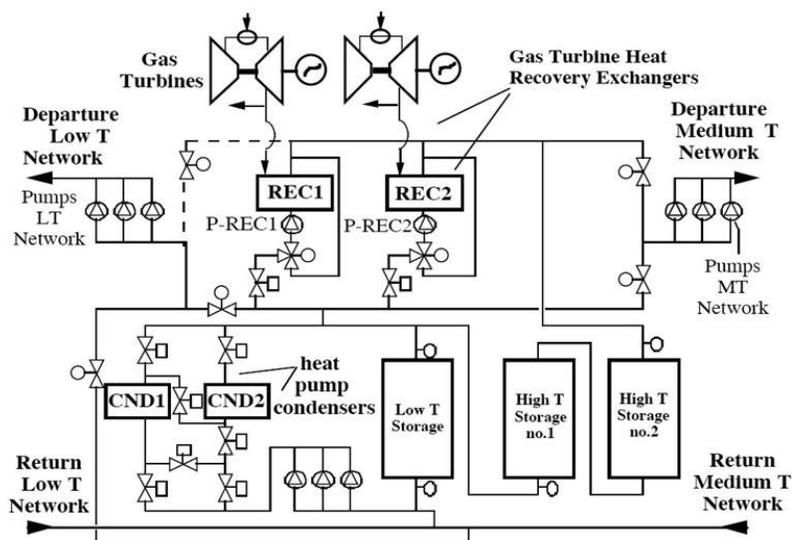


Bild 7-13 3.9 MW Ammoniakwärmepumpen an der EPFL, 1986
[Friothers 2008]

Hinblick auf seine ausgezeichneten thermodynamischen Stoffeigenschaften gewählt wurde. Mit einer Gesamtwärmeleistung von **7.8 MW** ist diese Wärmepumpenanlage eine der grössten in der Schweiz geblieben. Messungen ergaben die folgenden Lorenz-Wirkungsgrade der Wärmepumpen: 58.1% bei 5 °C / 50 °C, 59.7% bei 6 °C / 45 °C und 45.4% bei 7 °C / 30 °C.

Nach zehn Jahren Betrieb nahm die Leistungszahl der Wärmepumpen infolge der Belagsbildung im Verdampfer, der Anwesenheit von Inertgasen und der Alterung des Kompressors ab. Der Nutzungsgrad der Gesamtanlage betrug nach der Inbetriebnahme rund 170% [Tastavi 1994], [Favrat und Tastavi 1995], [Pelet et al. 1997], [Favrat 2007].

180 MW WÄRMEPUMPE FÜR STOCKHOLMS FERNHEIZUNGSSYSTEM

Da es in der Schweiz keine grossen Fernheizungssysteme gibt, mussten die wirklich grossen Wärmepumpen exportiert werden. Von diesen soll hier stellvertretend eine erwähnt werden. Von 1984 bis 1986 wurde für das Fernheizungssystem von Stockholm das **weltgrösste Wärmepumpensystem** mit Meerwasser als Wärmequelle (Värtan Ropsten) gebaut und in Betrieb genommen. Es weist eine Gesamtwärmeleistung von **180 MW** auf. Bei einer Meerwassertemperatur von 2.5 °C / 0.5 °C und einer Heizwassertemperatur von 57 °C / 80 °C erreicht es eine Leistungszahl von 3.75. Das System besteht aus 6 Wärmepumpen mit Radialkompressoren: Bild 7-14. Die Heizleistung lässt sich im weiten Bereich von 10% bis 100% anpassen. 2003 erfolgte ein Umbau für den Ersatz von R-22 durch R-134a [Friothersm 2008].

Bild 7-14 Eine der sechs 30 MW Wärmepumpen mit Radialkompressoren des Värtan Ropsten Fernheizungssystem von Stockholm [Friothersm 2008]



FERNHEIZUNGSSYSTEM SCHWEIZER MITTELLAND – EIN NIE REALISIERTES ZUKUNFTSWEISENDES KONZEPT

Peter Steiger, Conrad. U. Brunner, Heinz-Horst Becker, Werner Stoos und Bruno Wick haben unabhängig von den Aktivitäten und finanziellen Unterstützungen der „Schweizerischen Abwärmekommission“ ein zukunftsweisendes Konzept für grosse Teile des schweizerischen Mittellandes umfassendes **kalttes Fernwärmenetz (40 °C – 50 °C)** ausgearbeitet. Dieses sollte durch die drei Kernkraftwerke Mühleberg, Beznau I und Beznau II und industrielle Abwärme gespeist werden. Als Hauptidee des sogenannten „**Plenarsystems**“ wäre die Wärme erst bei den Verbrauchern durch Wärmepumpen und thermische Solaranlagen auf das erforderliche Temperaturniveau gehoben worden. Als Projektvision wurde eine Kostengleichheit mit konventioneller Kesselheizung angestrebt. Die Autoren der Studie rechneten mit einer Realisierungszeit von 15 Jahren und Gesamtkosten von 11.7 Milliarden Franken. Dieses zukunftsweisende Projekt wurde nie realisiert. In Zeiten rasch steigender Energiepreise und CO₂-Emissionen wäre es angebracht, nochmals auf das visionäre Konzept zurückzukommen [Steiger et. al 1977], [Schärer 2007].

7.2.4 Pioniere der Erdwärmesonden

Schweizer haben wesentlich zur Entwicklung der Erdwärmesonden beigetragen, über die bis etwa 1980 nur gelächelt wurde.

RECHSTEINER / MULTI-ENERGIE – ERSTE ERDWÄRMESONDE

Die hohen Bodenpreise in der Schweiz verleiteten zu einer Unterdimensionierung der horizontalen Erdkollektoren, welche zu einem verspäteten Vegetationsbeginn und in extremen Fällen auch zu Frostschäden führte. Dies motivierte Jürg Rechsteiner, einen Ersatz der Erdkollektoren durch **Erdwärmesonden** zu versuchen. Bereits **1974** liess er Stahlsonden mit einem Aussendurchmesser von 60 mm und einer Gesamtlänge von 70 m in den sandigen Boden von Lustenau (Vorarlberg, Österreich) rammen. Die koaxialen **Stahlrammsonden** bestanden aus 2.5 m langen Elementen mit einer äusseren Wandstärke von 5 mm. Das Rammen der ersten Sonde verlief erfolgreich. Die zweite Rammung endete mit einer Überraschung. Der Kopf der Probe tauchte nämlich nur wenige Meter neben der Ramm-Maschine aus dem Boden..! Mangels verlässlicher Berechnungsunterlagen musste die Auslegung der Sonden noch über grobe Plausibilitätsannahmen erfolgen. Trotzdem wurde die Wärmepumpenanlage durch die deutsche Schäfer Heiztechnik, welche in den 1980er Jahren in Konkurs ging, gebaut. Zwischen 1974 und 1977 hat Rechsteiners Firma **Multi-Energie** (www.multienergie.ch) noch 12 weitere Wärmepumpensysteme mit Stahlrammsonden ausgeführt. Es gab aber zahlreiche Probleme, wie die Leckage aus beschädigten Dichtungen zwischen den Sonderelementen. Dies war ein kostspieliger erster Versuch und ruinierte den Ruf der Erdwärmesonde als neue Wärmequelle für Wärmepumpen. Nebenbei sei bemerkt, dass eine Stahlrammsonde heute immer noch im Betrieb ist!

Aufgrund der schlechten Erfahrungen mit den Stahlsonden entwickelte Rechsteiner die **ersten Doppel-U-Sonden aus Polyethylen** (Duplex-Sonden, äusserer Durchmesser der PE-Rohre 25 mm, Wandstärke 2.4 mm, Länge 50 m). Er stellte seine Erfindung Ernst Rohner von der Bohrfirma Grundag (siehe unten) vor. Kurz darauf führte Multi-Energie in der Nähe von St. Gallen die ersten Tests mit U-Sonden aus Kunststoff durch. Bereits **1980** erfolgte der **Bau einer ersten Wärmepumpenanlage** mit Doppel-U-Sonden aus Polyethylen für ein Einfamilienhaus in Arbon. Die mit einer Wärmepumpe von Multi-Energie ausgerüstete Anlage wurde im Dezember 1980 in Betrieb genommen. Wie spätere Langzeitmessungen zeigten, funktionierte sie gut, obwohl die Sonden noch nicht hinterfüllt wurden. Nach 30 Betriebsjahren arbeitet die Sonde noch immer zur vollen Zufriedenheit des Bauherrn.

Ab 1980 folgten viele neue Installationen in der ganzen Schweiz. Bis 1983 war die Nützlichkeit und Verlässlichkeit der Doppel-U-Sonden aus Polyethylen bereits genügend demonstriert. Für die Erfindung wurde Rechsteiner 1985 das Schweizer Patent 649623 erteilt. Aber bald darauf wurde bekannt, dass ein deutsches Patent für eine ähnliche Lösung mit einer Umlenkvorrichtung am Sondenende anstelle des einfachen U-Bogens von Rechsteiner existierte. Obwohl die Lösung gemäss dem deutschen Patent nie umgesetzt wurde, verhinderte dieses Patent den Schutz von Rechsteiners Erfindung. Sie wurde in der Folge zur Standardausführung von Erdwärmesonden im In- und Ausland. Rechsteiner tröstete sich mit der Erkenntnis, dass nur gute Dinge tausendfach kopiert werden... [Rechsteiner 2007].

ROHNER / GRUNDAG / HASTAG

Wie bereits bemerkt, hat die Firma **Grundag** von Ernst Rohner bereits 1980 die ersten Bohrungen für U-Sonden vorgenommen. Aber Grundag war schon vorher eine etablierte Bohrfirma. Sie bohrte für andere Zwecke, vorab für die Erschliessung von Grundwasser und von heissen Quellen. Die von Grundag eingesetzte **Rotations-Spülbohrtechnik** war wesentlich kostengünstiger als die Kernbohrtechnik. Grundag wurde ab 1980 zum verlässlichen Partner für die ganze Schweizer Wärmepumpengemeinschaft und führte die Bohrarbeiten mit zuverlässigen,

erfahrenen Bohrmeistern überall in der Schweiz sowie auch im benachbarten Deutschland und Österreich aus. Rohner zog sich 2001 altershalber zurück und überliess sein Bohrgeschäft der Firma HASTAG in St.Gallen (www.hastag.ch). 1980 lag die Tiefe der Bohrungen bei 50 m. Bis 1985 ging sie schon über 100 m und erreicht heute mehr als 300 m. Der Hauptgrund für diese Entwicklung ist nicht die mit grösserer Tiefe zunehmende Erdreichtemperatur (etwa +1 K pro 30 m), sondern die Landknappheit [Rohner 2007], [Ottinger 2007].

TRÜSSEL / KWT

Kurt Trüssel gründete um 1980 in Belp seine Firma **KWT**³¹. Auch er wollte eine Erdwärmesonde realisieren. Offenbar unabhängig von Jürg Rechsteiner führte er ein erstes Experiment durch. Er liess in seinem eigenen Garten 50 m tief bohren, brachte eine Koaxialsonde ein und verband sie mit einer Kälteeinheit. Durch Beobachtung des thermischen Verhaltens der Sonde erhielt er erste Auslegungsanhaltspunkte für Erdwärmesonden. Um 1981 hat Trüssel die erste Wärmepumpenanlage mit Erdwärmesonde für ein Einfamilienhaus in Hettiswil gebaut. Bei den Bohrarbeiten stiess die an sandigen Grund gewohnte deutsche Bohrfirma in einer Tiefe von 30 m auf Fels und hatte damit grosse Probleme. Trotzdem wurde die Anlage mit zwei 50 m langen Koaxialproben fertig gebaut – und sie ist heute noch in Betrieb! Bis 1987 engagierte auch KWT die Firma Grundag für ihre weiteren Erdwärmesonden-Bohrungen. Dann begann KWT selbst zu bohren. Nebenbei sei nochmals auf die von Trüssel 1985 eingeführten Wärmepumpen mit **integrierter Warmwasserbereitung** hingewiesen, welche die Abkühlung des überhitzten Kältemitteldampfes für die Schlusserwärmung nutzte. Zu dieser Zeit baute er auch seine bekannten separaten kleinen Enthitzer zur **Beheizung von Wäschetrocknungsräumen** im Kellergeschoss [Trüssel 2007].

BURREN / WA-TEC / FRUTIGER

1980 versuchten es auch die Brüder Erwin und Jürg **Burren** mit koaxialen 2-Zoll-Stahlsonden mit einer Länge von 50 m. Sie wurden bereits mit Bentonit hinerfüllt. Vermutlich handelten sie ohne die von Rechsteiner bereits gesammelten Erfahrungen. Sie nannten ihre koaxialen Stahlsonden "Zonatherm". Das Innenrohr ersetzten sie durch einen Polyurethanschlauch. Die erste Bohrung wurde im Sommer 1980 durch die Berner Filiale der Firma Dicht in St.Gallen durchgeführt. Die Firma **WA-TEC** der Gebrüder Burren brach infolge zu zahlreicher Kinderkrankheiten ihrer ersten Wärmepumpen und des zu teuren kathodischen Korrosionsschutzes für die Stahlsonden zusammen. Erst 1988 begann auch **Frutiger** in Uetendorf mit dem Bohren für Erdwärmesonden [Beck 2007], [Ottinger 2007].

7.2.5 Pioniere der Nutzung von Rohabwasser

Wie oben bereits mitgeteilt, wurde die erste Einrichtung zur Nutzung von häuslichem Rohabwasser als Wärmequelle durch Heinz Grimm gebaut. Die Lösung von Grimm litt aber unter Problemen mit den Feststoffen im Rohabwasser.

Ende der 1970er Jahre nahm sich Felix Kalberer dieses Problems an. 1981 patentierte er ein neues System zur Wärmerückgewinnung aus Rohabwasser. In dieser als „**FEKA-Tank**“ bezeichneten Einrichtung wurden die Feststoffe durch Sedimentation und Siebung abgetrennt [Kalberer 1981]. Der erste grössere FEKA-Tank wurde in der regionalen Sportanlage Sargans eingesetzt. Er ist immer noch in Betrieb. Bis heute wurden weitere 180 FEKA-Tanks gebaut. Dabei wurde das System laufend verbessert. Das [Bild 7-15](#) zeigt die heutige Version des FEKA-Tanks. Sie ist in der energetischen Musterwohnüberbauung Eulachhof in Winterthur, die im nächsten Kapitel vorgestellt wird, eingebaut.

³¹ KWT Kälte-Wärmetechnik, CH-3123 Belp, 1979 von Kurt Trüssel gegründet, www.kwt.ch



Bild 7-15 Neueste Version (2007) des FEKA-Tanks für die Wärmerückgewinnung aus häuslichem Rohabwasser. Links Wärmeübertragerrohre, rechts Sedimentationszone.
Fotos Eulachhof Winterthur [Kalberer 2007]

Bei sehr hohem Feststoffgehalt im Rohabwasser ist eine jährliche Reinigung des FEKA-Tanks nötig. Andernfalls genügt eine Reinigung im Vierjahresabstand. Die Reinigung kann durch die örtliche Kläranlagenreinigung durchgeführt werden. In neuen Systemen wird die Leistungszahl der Wärmepumpen fernüberwacht. Bei einem Abfall wird die Reinigung ausgelöst [Kalberer 2007].

7.2.6 Qualitätssicherung für Kleinwärmepumpen

BOREL / ERSTER WÄRMEPUMPENTEST

In der welschen Schweiz hat Lucien Borel³² an der ETH-Lausanne (EPFL Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) um **1980** einen **Wärmepumpenprüfstand** aufgebaut. „EPFL geprüft“ wurde rasch zum Qualitätsbegriff – dies bereits Jahre vor der Eröffnung des Schweizerischen Wärmepumpentestzentrums in Winterthur-Töss. Borel gehörte im französischen Sprachbereich zu den Pionieren der exergetischen Analyse. Zur Identifikation der Schwachstellen des Prozesses wandte er diese auf die Wärmepumpe an [Borel 1980]. Die Prüfung kommerzieller Wärmepumpen wurde durch das Schweizerische Bundesamt für Konjunkturfragen finanziert. Die Bestwerte der aus den Messungen ermittelten Lorenz-Wirkungsgrade lagen bereits 1986 bei 40% für Luft/Wasser- und bei 45% für Wasser/Wasser-Wärmepumpen: Bild 7-16. Im

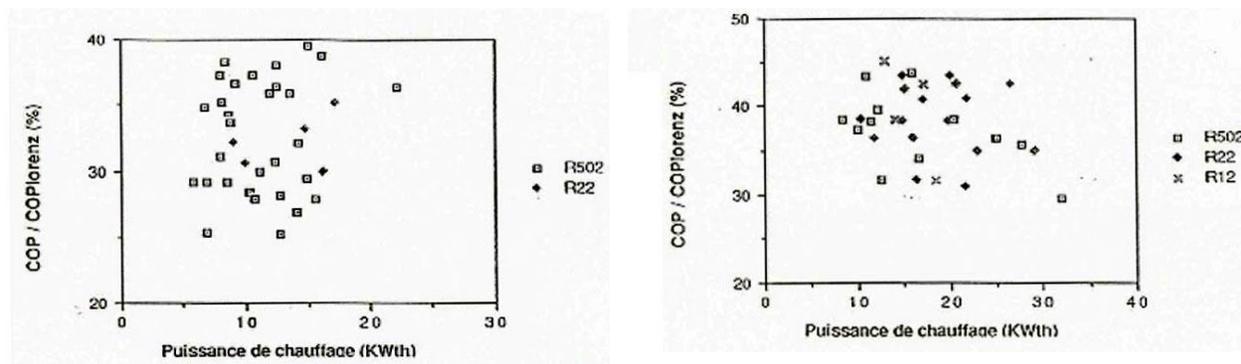


Bild 7-16 Aus den Testresultaten an der EPFL 1986 ermittelte Lorenz-Wirkungsgrade für kommerzielle Luft/Wasser- (links) und Sole/Wasser³³-Wärmepumpen (rechts) [Favrat 1989]

³² Lucien Borel war von 1954 bis zu seiner Pensionierung im Jahr 1988 Professor und Leiter des Labors für Thermodynamik und Energie der ETH-Lausanne (Laboratoire de thermodynamique et d'énergétique de l'EPFL).

³³ Auf den Originaldiagrammen ist "Wasser/Wasser" vermerkt – die Tests wurden aber unter heutigen Sole/Wasser-Bedingungen durchgeführt [Favrat 2007].

Vergleich zu den späteren Messergebnissen in Winterthur-Töss scheinen die Werte für jene Zeit eher zu hoch. Wahrscheinlich entsprachen die Testbedingungen (wie beispielsweise die Abtauung) nicht der in Winterthur-Töss verwendeten Europäischen Norm EN 255 (siehe 8.2.5). Borel beschäftigte sich übrigens auch mit der Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpen und dem Potenzial für unterschiedliche Wärmepumpenanwendungen [Borel et. al 1981].

HUBACHER, DÜRR, EHRBAR / ERSTER WÄRMEPUMPEN-SYSTEMTEST

Die Kenntnis der Effizienz einer Wärmepumpe ist bestimmt wichtig. Aber Endkonsumenten und Heizungsplaner wollen die Effizienz ganzer Wärmepumpenheizsysteme kennen. Diese bestehen aus der Wärmequelle, der Wärmepumpe, der Regelung, den Rohrleitungen und dem Wärmeverteilsystem. In der Heizsaison 1981/1982 hat Peter Hubacher (Eigentümer der Firma Enfog in Gossau) mit seinem Kollegen Bruno Dürr und dem wissenschaftlichen Berater Max Ehrbar vom Neutechnikum Buchs NTB die **ersten systematischen Langzeitfeldtests an vollständigen Wärmepumpenheizungssystemen** durchgeführt. Sie wurden dann noch während mehrerer Jahre fortgesetzt. Die Tests wurden durch den privatwirtschaftlichen Nationalen Energieforschungs-Fonds NEFF und das Bundesamt für Energiewirtschaft finanziert. Einige Ergebnisse geben einen interessanten Eindruck über den bescheidenen technischen Stand von Luft/Wasser-Wärmepumpensystemen in den frühen 1980er Jahren: Tabelle 7-1. Später wurden auch Einfamilienhaus-Systeme mit Erdwärmesonden einbezogen. Ein Heizsystem mit Erdwärmesonden in einem Einfamilienhaus im Rorschacherberg wurde von 1984 bis 1989 ausgemessen und ergab eine mittlere Jahresarbeitszahl von nur 2.3. Eine andere Anlage in Frauenfeld kam in den Jahren 1985 bis 1989 auf eine mittlere Jahresarbeitszahl von 2.9. Die Messungen wurden übrigens alle zwei Minuten durchgeführt und dienten Robert J. Hopkirk sowie Ladislaus Rybach und seinen Mitarbeitern zur Validierung ihrer Computersimulationen [Hubacher 1987, 1990].

Tabelle 7-1 Gemessene Effizienz vollständiger Wärmepumpen-Zentralheizungssysteme mit Luft/Wasser-Wärmepumpen in den frühen 1980er Jahren

Netto-Heizfläche m ²	Art der Wärmepumpe	Wärmequelle	Heizleistung der WP kW	Jahresarbeitszahl JAZ ³⁴	Nutzungsgrad PER	Referenz
1426	elektrisch elektrisch elektrisch Widerstands- backup	Luft Abwasser	32 22 bivalent 20	1.91		[Dürr und Hubacher 1984]
253	elektrisch	Luft	25	2.21		[Dürr und Hubacher 1985]
7700	Gasmotor	Luft	300		1.2 ³⁵	[Brechtbühl et al.1983]

7.2.7 Unterstützung durch öffentliche Forschung und Entwicklung

STUDIEN ZU WÄRMEPUMPEN

Gegen Ende der 1970er Jahre befasste sich die Eidgenössische Abwärmekommission – die Vorgängerin des späteren Bereichs Umgebungswärme des Bundesamts für Energiewirtschaft

³⁴ M. Ehrbar und P. Hubacher benützten dafür den Ausdruck "MALZ (mittlere Anlagenleistungszahl)".

³⁵ Der Erwartungswert war 1.5. Gründe für den tiefen Wert von 1.2 waren mehrere Betriebsunterbrüche, zu kurze Betriebszeiten und Enteisungsprobleme.

(BEW)³⁶ - auch mit Wärmepumpen. Hans Ulrich Schärer vom BEW wirkte als Sekretär. Im Auftrag dieser Kommission wurden 1977 am **Eidgenössischen Institut für Reaktorforschung EIR**³⁷ umfangreiche Studien zur Wärmepumpenheizung durchgeführt. Es wurde dabei insbesondere die Nutzung von Grundwasser, Oberflächenwasser, Erdreich und Umgebungsluft als Wärmequelle untersucht. Beim Erdreich wurden erst horizontale Erdkollektoren berücksichtigt. Die Mängel bei deren Auslegung waren am offensichtlichsten und auch ihre Wirtschaftlichkeit wurde bezweifelt. Trotzdem wurden weitere Untersuchungen zu diesem System angeregt [Mustoe 1977]. Die Studien wurden 1982 vertieft und durch die Untersuchung nicht azeotroper Mischungen als Kältemittel (gleitende Verdampfungs- und Kondensationstemperaturen - Lorenz Prozess), des Absorptionsprozesses und unkonventioneller Prozesse wie Dampfstrahlverdichtung, thermoelektrische und magnetische Effekte erweitert. Ebenfalls studiert wurde der direkte Antrieb mit Gas-, Diesel- und Stirlingmotoren. Der direkten Kopplung von Verbrennungsmotor und Wärmepumpe wurde eine glänzende Zukunft vorausgesagt – was durch nicht vorausgesehene Probleme dann aber nicht zutraf. Im Weiteren wurde die optimale Integration der Wärmepumpen in unterschiedliche Heizungssysteme untersucht, und auch die Schädigung der Ozonschicht durch FCK-Kältemittel wurde studiert [Leuenberger et. al 1982].

RICHTLINIEN FÜR DIE WÄRMEENTNAHME AUS OBERFLÄCHENGEWÄSSERN

Um jegliche Schäden am empfindlichen Ökosystem von Flüssen und Seen auszuschliessen, hat Dieter Imboden³⁸ an der EAWAG in Dübendorf³⁹ aufgrund von Computersimulationen Grundlagen für ökologisch unbedenkliche **Grenzwerte zur Wärmeentnahme aus Oberflächengewässern** ausgearbeitet. Diese Studie, die im Auftrag der Schweizerischen Abwärmekommission durchgeführt wurde, zeigte übrigens, dass das Potenzial der Oberflächengewässer genügen würde, um den ganzen Heizwärmebedarf der Schweiz ohne ökologische Schäden abzudecken. Die Entnahmegrenzen liegen also nicht beim Ökosystem der Gewässer, sondern bei den wirtschaftlichen Grenzen der Wärmeentnahme mit langen Rohrleitungen und Pumpsystemen [Imboden et al. 1981].

MODELLIERUNG VON ERDWÄRMESONDEN

Wie in viele Fällen zu beobachten ist, kam die wissenschaftliche Erfassung auch im Bereich der Erdwärmesonden nach den praktischen Entwicklungen der Pioniere. Nach dem Widerstand gegen diese belächelten Pioniere wurde aus den Erdwärmesonden eine seriöse Angelegenheit. Eine **wissenschaftlich fundierte Auslegung und Optimierung** der Anlagen wurde zur Voraussetzung für einen optimalen Langzeitbetrieb. Im Anschluss an Horrorgeschichten über die Auskühlung des Erdbodens bis zum Permafrost in weniger als zehn Jahren wurden durch das Bundesamt für Energiewirtschaft und den NEFF⁴⁰ Langzeit-Felduntersuchungen zur Erlangung eines besseren Verständnisses der physikalischen Vorgänge finanziert.

In der Schweiz hat Robert J. Hopkirk mit seiner Firma Polydynamics (www.polydynamics.ch) anfangs der 1980er Jahre mit der **Modellierung und der Computersimulation** begonnen. Später folgte – dazu übrigens auch durch Ernst Rohner von Grundag angehalten - Ladislaus Rybach von der ETH Zürich mit seinen Mitarbeitern (vorab Walter J. Eugster). Die auch international beachteten theoretischen und experimentellen Arbeiten dieser Personen führten zusammen mit der praktischen Erfahrungen der Bohr- und Wärmepumpenpioniere zu einer führenden Stellung von Schweizer Firmen in der Auslegung und Realisierung von Erdwärmeson-

³⁶ Das Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW) wurde später zum Bundesamt für Energie (BFE).

³⁷ Aus dem EIR wurde später das heutige Paul Scherrer Institut (PSI), www.psi.ch

³⁸ Dieter Imboden wurde später Professor an der ETH (Institut für Biogeochemie und Schadstoffdynamik, CH-8092 Zürich).

³⁹ Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz; heute Wasserforschungs-Institut des ETH-Bereichs, www.eawag.ch.

⁴⁰ Nationaler Energieforschungs-Fonds NEFF - ein privater Energieforschungsfonds, der von der Öl-, Gas- und Elektrizitätswirtschaft getragen wurde.

denanlagen als Wärmequelle für Wärmepumpen, als Erdwärmespeicher für den optimalen Ganzjahresbetrieb von Anlagen für die kombinierte Kälte- und Wärmeerzeugung sowie als Wärmesenke für die passive Raumkühlung [Schwanner et al. 1983], [Hopkirk et al. 1985], [Rybach 1987].

KONFERENZEN FÜR WISSENSTRANSFER UND ERFAHRUNGSAUSTAUSCH

Die ersten schweizerischen Konferenzen zur Wärmepumpentechnik wurden in den Jahren 1980 und 1981 organisiert. In 12 Beiträgen wurden alle schweizerischen Aktivitäten von den Wärmequellen über Kältemittel und Kompressoren bis hin zu Wärmepumpen-Gesamtheizungssystemen behandelt [SVG 1981]. Seither werden diese Konferenzen jährlich durchgeführt. Schwerpunkte sind abwechslungsweise Themen aus der Forschung und ein Erfahrungsaustausch zu Pilotanlagen. Die Konferenzen wurden im Auftrag des Bundesamts für Energie durch Hans Ulrich Schärer, Martin Zogg, Fabrice Rognon, Thomas Kopp und Max Ehrbar organisiert und durchgeführt.

7.2.8 Unterstützung durch Verbände, Bundesverwaltung und Medien

ARBEITSGEMEINSCHAFT WÄRMEPUMPEN

Auf die Initiative von Ernst Lüthi (Geschäftsführer der CTC Wärmetechnik⁴¹) haben sich 1980 schweizerische Hersteller und Lieferanten von Wärmepumpen und Wärmepumpenkomponenten sowie Bohrfirmen zur „**Arbeitsgemeinschaft Wärmepumpen**“ AWP (www.awpschweiz.ch) zusammengeschlossen. Die AWP strebte eine gemeinsame Sprache aller Lieferanten, eine Vereinfachung und Vereinheitlichung der Bewilligungsverfahren, gemeinsame Planungsgrundlagen, einen Erfahrungsaustausch und die berufliche Weiterbildung der Fachleute an. Mitglieder der **technischen Kommission** waren G. Szokody (Vorsitzender), C. Brugnoli, E. Grüniger, K. Hess, H. Reiner und P. Schneiter. Unter der Leitung von G. Szokody erarbeitete diese Kommission in sehr kurzer Zeit wegweisende Wärmepumpenrichtlinien und veröffentlichte diese bereits im Jahr 1981 [SVK 1981]. Die technische Kommission war auch an der Entstehung der durch das damalige Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL (heute Bundesamt für Umwelt) ausgearbeiteten und 1982 in Kraft getretenen **Verordnung über den Wärmeentzug** aus Oberflächenwasser, Grundwasser und dem Erdboden beteiligt.

Ein wesentliches Hindernis zur Verbreitung der Wärmepumpen waren die Unsicherheiten im Zusammenhang mit dem Anschluss ans Elektrizitätsnetz. Zusammen mit den Elektrizitätswerken hat die technische Kommission der AWP **Richtlinien für den elektrischen Anschluss** von Wärmepumpen erarbeitet [VSE 1983], [Schär 1983]. Zusammen mit dem Bundesamt für Energiewirtschaft wurde 1983 ein Treffen mit den Energiewirtschaftsdepartementen der Kantone organisiert, um auch die übrigen **Bewilligungsverfahren** zu vereinfachen und zu vereinheitlichen. Eine ganze Anzahl weiterer **Empfehlungen und Richtlinien** mit internationaler Ausstrahlung folgten [Szokody 1984]. 1990 wurde die Erschliessung des Sanierungsmarktes mit einer Checkliste der für die Planung notwendigen Daten angegangen [Szokody 1990]. Der selbstlose Einsatz von Gyula Szokody für die Wärmepumpengemeinschaft wird durch seine Vorbereitung der rund 120 Seiten starken AWP-Planungsrichtlinien in den Tagen zwischen Weihnachten und Neujahr illustriert. Wie bereits erwähnt, diente Szokody der AWP von 1980 bis 1995 als Vorsitzender ihrer technischen Kommission. Die AWP ist immer noch aktiv. Sie erweitert ihre technischen Bulletins, welche von Wärmequellen bis zu CO₂-Wärmepumpen das ganze Wärmepumpenspektrum abdecken, laufend [AWP 2007].

⁴¹ Heute CTC Giersch, CH-8112 Otelfingen, www.ctc-giersch.ch.

BUNDESAMT FÜR ENERGIEWIRTSCHAFT BEW

Nebst der direkten aktiven Unterstützung von Forschungsaktivitäten war das Bundesamt für Energiewirtschaft auch ein wichtiger Katalysator für die wärmepumpenrelevanten Aktivitäten der Verbände und der Kantone. Es veranlasste auch eine Studie über das Potenzial der Wärmepumpenheizung im Falle eines neuen Erdölembargos [BEW 1983].

MEDIENPRÄSENZ

1985 wurde in Münchenstein erstmals eine alte Ölheizung eines Wohnblocks durch eine Wärmepumpe mit mehreren Erdwärmesonden ersetzt. Dieses Ereignis wurde zu einem Durchbruch in der Medienpräsenz der Wärmepumpe. Es wurde darüber nicht nur in der Tagespresse⁴², sondern auch in einer ausführlichen Fernsehsendung⁴³ berichtet [Beck 2007].

7.3 Internationale Meilensteine der Wärmepumpenheizung

Weltweit wurde 1979 die Anzahl an Wärmepumpen zu Heizzwecken (einschliesslich Warmwasserboiler) auf rund 800'000 und die Anzahl der Wärmepumpen zur Klimatisierung mit Kühlen und Heizen auf 4'000'000 geschätzt. Unter den Wärmepumpen zu Heizzwecken erreichten die U.S.A. einen Anteil von 90%. Jener von Europa betrug nur rund 6.5% und teilte sich wie folgt auf: Schweiz 6'600, Deutschland 30'000 (ohne Wärmepumpenboiler nur rund 500), Frankreich 13'000, Österreich 2'000, Italien 100. [Barclay J.A. et al 1978], [IEA 1980].

OESTERREICH

Das Erdölembargo von 1973 vermochte in Österreich noch wenig zu bewegen. Am 5. November 1978 beschloss das österreichische Volk in einem Referendum, das bereits gebaute Kernkraftwerk in Zwentendorf nicht in Betrieb zu nehmen. Auch dies war der Wärmepumpenheizung nicht förderlich.

DEUTSCHLAND

Auch auf die Wärmepumpenszene in Deutschland hatte das Erdölembargo von 1973 keinen grossen Einfluss. Bis **1979** wurden in Deutschland nur rund **500 Heizungswärmepumpen** verkauft. Die erste Wärmepumpengeneration litt an zahlreichen Kinderkrankheiten. Sie war voluminös und wies einen problematisch hohen Kältemittelinhalt (meist R-22, R-12 und R-502) auf. Zur Enteisung von Wärmepumpen mit Luft als Wärmequelle wurden bis zu 8 Magnetventile nötig. Das wachsende Interesse wurde aber durch die 1977 von Horst Kruse und Fritz Steimle organisierte dreitägige Wärmepumpentagung in Essen deutlich [Joachim 1980]. 1978 erschien das erste umfassende Lehrbuch zur Wärmepumpentechnologie in deutscher Sprache. Schon ein Jahr später folgte ein Zweites. Beide Bücher erschienen später in mehreren Überarbeitungen und Neuauflagen [Cube und Steimle 1978], [Cube et al 1997], [Kirn und Hardenfeldt 1979].

Die technischen Entwicklungen verliefen ähnlich wie in der Schweiz. Thermoaktive Bauelemente wie Wände und Decken vorgefertigter Garagen oder Fassadenelemente waren in Deutschland populärer [Jochheim, Bracke 1985]. Sechs Jahre nach Jürg Rechsteiner in der

⁴² Beispielsweise in der "Berliner Zeitung" vom 21. März 1985.

⁴³ In der damals populären Fernsehserie "Mensch-Technik-Wissenschaft".

Schweiz wurde in Deutschland **1980** die **erste Erdwärmesondenanlage** mit 8 je 50 m tiefen Koaxialsonden installiert. Andere Anlagen folgten bald darauf [Sanner 1992].

In den Jahren 1981 bis 1983 entwickelten **Volkswagen** und **Ruhrgas** den sogenannten **“Thermodiesel”**, eine durch einen 1.6-Liter Dieselmotor angetriebene Wärmepumpe: Bild 7-17. Diese Heizmaschine enthielt alle Elemente einer modernen Totalenergieanlage wie Wärmerückgewinnung aus den Motorabgasen, Drehzahl-Leistungsregelung und sogar ein keramisches Russfilter. **Hoval Herzog** in Feldmeilen (Schweiz) wurde mit einem Pilotmarketing und Pilotverkäufen beauftragt. Einige Einheiten wurden 1985 bis 1986 bei Hoval getestet. Leider wurde das Scheitern des kostspieligen Vorhabens ziemlich rasch klar. Die Zeit zwischen zwei nötigen Servicearbeiten war viel zu kurz - sie lag teilweise sogar unterhalb der Dauer einer Heizsaison - und auch der Schmierölbedarf war mit etwa 17 Litern pro Jahr teuer. Die Motorlaufzeit für eine einzige Heizsaison entspricht einer Autofahrleistung von über 200'000 km. Dies ergibt für eine minimale Lebensdauer des Aggregats von 15 Jahren eine entsprechende Fahrleistung von etwa 3'000'000 Kilometern. Dies ist ganz einfach zuviel – auch für einen deutschen Qualitätsautomotor. Neben der zu kurzen Lebensdauer des Motors und dem hohen Schmierölbedarf gab es aber noch weitere Probleme wie die direkte Kopplung von Motor und Wärmepumpe (dies ergab eine zu hohe Drehzahl für den Kompressor) und der zu hohe Lärmpegel [Adolph 2004], [Szokody 2007].

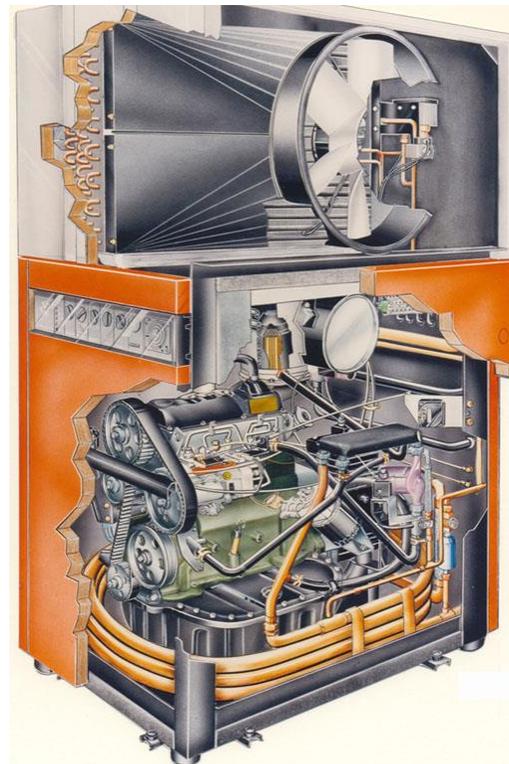


Bild 7-17 Hoval Thermodiesel, 1986
[Szokody 2007]

In der Periode von 1980 bis 1985 wurde an der **Fachhochschule Karlsruhe** ein Wärmepumpenprüfstand betrieben. Etwa 45 Heizungswärmepumpen und 45 Boilerwärmepumpen wurden in dieser Zeit nach DIN-Normen getestet. Die Prüflinge stammten aus Deutschland, Österreich, Dänemark und der Schweiz. Als die Nachfrage um 1985 zusammenbrach, wurde der Testbetrieb eingestellt [Adolph 2004].

HOLLAND

In Holland wurde 1978 ein Funktionsmuster einer durch einen **Stirlingmotor angetriebenen** Wärmepumpe gebaut. Der Kurbeltrieb-Stirlingmotor erreichte einen mechanischen Wirkungsgrad von 25% und einen elektrischen Wirkungsgrad von 55%. Die Wärmepumpe nutzte

Grundwasser als Wärmequelle. Die Wärmeverteilung erfolgte mit einer Fussbodenheizung. Diese unkonventionelle Totalenergieeinheit als Kombination von Stirlingmotor und Wärmepumpe hatte eine variable Heizleistung von 8 kW bis 25 kW und einen Nutzungsgrad (PER) von 1.4 [Philips – OGEM 1978].

SKANDINAVIEN

Ab 1982 gab es in Skandinavien einen ausgesprochenen Boom für **grosse Wärmepumpen**, auf den im Abschnitt 7.2.3 bereits eingegangen wurde.

Die **thermische Analyse** der Vorgänge in **Erdwärmesonden** begann in den frühen 1980er Jahren (vergleiche mit den Schweizer Aktivitäten im Abschnitt 7.2.4). In der Abteilung für Mathematik und Physik der Universität Lund leistete Per Eskilson fundamentale Beiträge zu diesem Thema [Eskilson 1987].

Auch in den skandinavischen Ländern wurde die Bedeutung der Qualitätssicherung für die Verbreitung der Wärmepumpe erkannt. 1989 hat der Nordische Ministerrat ein freiwilliges, neutrales Zertifizierungsprogramm, den **Nordischen Schwan**, eingeführt. Dieses Programm wurde als Versuch gestartet, die in den nordischen Ländern aufkommenden Ökolabel-Programme zu vereinheitlichen. Die teilnehmenden nationalen Organisationen schlugen darin neue Produktkategorien vor, begleiten die Zertifizierungskriterien, erteilen entsprechende Lizenzen und vermarkten das Programm. Das nordische Umweltkennzeichen ist firmenunabhängig und garantiert einen **guten ökologischen Standard**. Es darf nur von Produkten getragen werden, welche diesen durch objektive Bewertungen zu erfüllen vermögen. Das Kennzeichen soll nicht nur den Konsumenten die Wahl der umweltverträglichsten Produkte ermöglichen, sondern auch die Hersteller anregen, ökologisch noch bessere neue Produkte zu entwickeln. Auf diese Weise helfen die Marktkräfte der Zielrichtung der Umweltgesetzgebung. Das **Zeichen mit dem grünen Schwan** wird heute für über 60 Produktgruppen vergeben und erfreut sich bei den Konsumenten eines hohen Gewichts. Das Kennzeichen ist in der Regel nur während drei Jahren gültig. Anschliessend müssen die Hersteller in einem neuen Gesuch zeigen, dass auch die neuesten Erfordernisse erfüllt werden. Momentan nehmen an diesem Programm Norwegen, Schweden, Finnland, Island und Dänemark teil.

U.S.A.

Wie bereits erörtert, stagnierte der Heiz-Wärmepumpenmarkt vor der Erdölkrise von 1973. Nachher begann aber eine rasche Expansion. 1976 waren in den U.S.A. 1.6 Millionen Klimageräte für Kühlen und Heizen in Betrieb, und es wurden 300'000 neue Einheiten produziert.

7.4 Rektifikation mit Brüdenkompression - Schweizer Pionierarbeit

Die Rektifikation („Mehrstufen-Gegenstrom-Destillation“) ist einer der energieintensivsten Prozesse der chemischen Verfahrenstechnik. Der Geschäftsbereich „Chemtech“ von **Sulzer**⁴⁴ hat um 1985 die **weltweit erste Rektifikationsanlage mit Brüdenkompression** gebaut und in diesem Bereich noch weitere Pionierleistungen erbracht [Meili 1990]. 1986 wurde die im **Bild 7-18** gezeigte Anlage zur Trennung von Feinchemikalien⁴⁵ mit einer Verdampfungsleistung von etwa 2 MW in einer Chemiefirma in den U.S.A. in Betrieb genommen. 1987 wurde eine Rektifikationsanlage zur Trennung von 1,2-Dichlorethan installiert. Sie wurde mit einem Druckverhält-

⁴⁴ Sulzer Chemtech, CH-8404 Winterthur, www.sulzerchemtech.com.

⁴⁵ Trennung von Chlorbenzol-Isomeren.



Bild 7-18 Eine der ersten Rektifikationsanlagen mit Brüdenkompression, 1986 [Sulzer Chemtech, CH-8404 Winterthur]

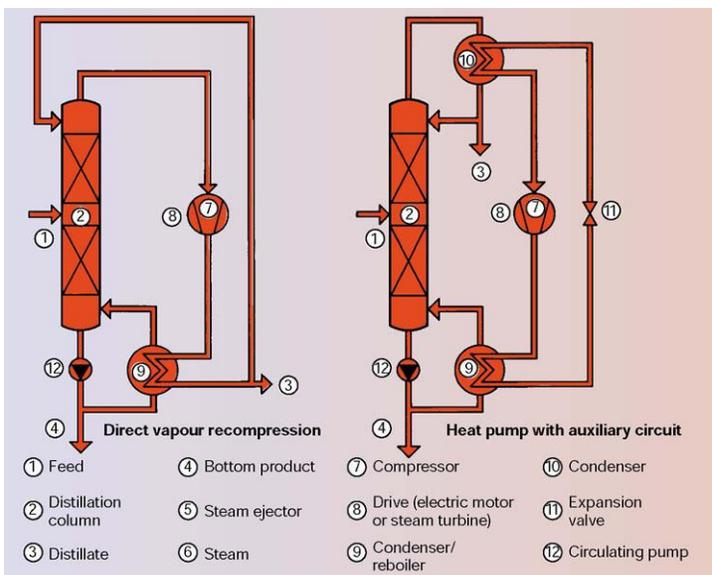


Bild 7-19 Prinzipien der Integration von direkter Brüdenkompression oder Wärmepumpe mit geschlossenem Hilfskreislauf in eine Rektifizierkolonne [Sulzer Chemtech, CH-8404 Winterthur]

nis von 2.2 und einer Antriebsleistung von 1.3 MW betrieben [Dummer und Schmidhammer 1991]. Eine weitere Brüdenkompressions-Rektifikationsanlage wurde 1987 für die Trennung Styrol/Chlorbenzol gebaut. Seither wurden viele weitere Trennkolonnen mit Brüdenkompression gebaut, darunter jene in einer Propylenanlage mit einer Jahresproduktion von 125'000 [Meszaros 2007]. Falls zu grosse Korrosionsprobleme oder eine erhöhte Explosionsgefahr bestehen, werden anstelle der direkten Brüdenkompression auch Wärmepumpen mit geschlossenem Arbeitsmittelkreislauf eingebaut: Bild 7-19.

8 DIE ERFOLGSGESCHICHTE 1990 – HEUTE

In dieser letzten Periode wurden kostengünstigere, effizientere und verlässlichere Wärmepumpen verfügbar. Die zunehmenden Umweltprobleme sind der Idee der Einsparung von Primärenergie durch Wärmepumpen förderlich. In einer Zeit mit stark steigenden Ölpreisen bedeutet dies aber auch immer höhere Energiekosteneinsparungen durch Wärmepumpen. Weiter wird die Wärmepumpentechnologie durch nationale und internationale Anstrengungen in Forschung und Entwicklung, in der Qualitätssicherung und im Marktauftritt gefördert. In einigen Ländern gibt es auch zusätzliche finanzielle Anreize.

8.1 Komponenten und Kältetechnik

Der Dampfkompessionsprozess entwickelte sich schon vor Jahren zu einer reifen Technik. Aber der rasche Ausstieg aus den chlorierten synthetischen Kältemitteln (FCK, HFCK) war eine grosse Herausforderung. Der Entwicklungsschwerpunkt verschob sich von der Innovation neuer Komponenten zur Systemoptimierung und zur kostengünstigeren Massenproduktion. Dies wurde durch die eindrücklichen Fortschritte der Informatik begünstigt. Weiter ist eine

Tendenz zu natürlichen Kältemitteln – insbesondere zu Ammoniak – und zu höheren Wirkungsgraden mit Niedrigtemperatur-Fussbodenheizungen unverkennbar. Energie-Contracting nimmt dem Nutzer das Risiko teurer Investitionen ab und wurde bei grösseren Anlagen sehr populär.

KOMPRESSOREN

Ab den frühen 1990er Jahren hat die Anzahl eingesetzter hermetischer **Scrollkompressoren** jene hermetischer Kolbenkompressoren deutlich überholt. Sie wurden für kleinere Wärmepumpen zum Standardkompressor. Die Effizienz kleiner Kompressoren wurde deutlich gesteigert. Neue Permanentmotoren werden weitere Verbesserungen bringen. Für das wieder aktuell gewordene Kohlendioxid werden weltweit neue Kompressoren entwickelt. Für Kleinkompressoren wurde dazu im Rahmen des IEA Annex 27 ein Schweizer Beitrag geleistet (siehe Abschnitt 8.2.3).

KÄLTEMITTEL

Das Geschehen bei den Kältemitteln wurde durch die Herausforderungen zur Bewältigung der durch die synthetischen Kältemittel verursachten Umweltprobleme diktiert. 1990 stimmen die Unterzeichnerstaaten des Protokolls von Montreal in London zwei Übereinkommen zur Elimination der FCK-Kältemittel aus Produktion und Gebrauch bis zum Jahr 2000 zu [Nagengast et al. 2006]. 1992 wurde das Protokolls von Montreal für einen bis 1995 vorgezogenen Ausstieg aus den FCK-Kältemitteln (R-11, R-12, ...) modifiziert und für die HFCK-Kältemittel (R22, ...) wurde ein stufenweiser Ausstieg bis 2030 beschlossen. In zahlreichen Ländern erfolgte der Ausstieg aus den HFCK-Kältemitteln bereits viel früher (z.B. Deutschland 2000, Österreich und die Schweiz 2002).

Als Konsequenz aus diesen Ausstiegsszenarien wurden neue Kältemittel eingeführt. 2001 wurde das Programm „**Global Refrigerants Environmental Evaluation Network (GREEN)**“ gegründet, um unabhängige Effizienzdaten für neue und eine Vergleichsbasis für bereits existierende Kältemittel in Kälteanlagen, Wärmepumpen und Klimaanlage zu ermitteln. Die Testaktivitäten wurden durch eine Kommunikationsanstrengung zur Verbreitung der Ergebnisse der Effizienzmessungen und anderer Vergleiche zwischen den alternativen synthetischen Kältemitteln (FKW wie z.B. R-134a), Kohlenwasserstoffen und Kohlendioxid mit den alten FCK-Kältemitteln ergänzt.

Mit den neuen **FKW**-Kältemitteln werden gute Resultate erzielt. Sie können die FCK und HFCK vollumfänglich ersetzen. Sie bleiben aber infolge ihres hohen Treibhauspotenzials GWP und vor allem ihrer schwer abbaubaren Zersetzungsprodukte (Trifluoressigsäure) auch international nicht unangefochten und möglicherweise wird es auch noch zu einem FKW-Ausstieg kommen. **Natürliche Kältemittel** werden als die endgültige Antwort auf die Frage nach den optimalen Kältemitteln angesehen [IIR 1998]. Die wichtigsten Vertreter sind **Ammoniak, Kohlendioxid und Kohlenwasserstoffe** wie Propan oder Isobutan. Aber jedes dieser Kältemittel kommt mit 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. Dafür kann die hohe Abwärmtemperatur bei Kälteanwendungen zu zusätzlichen Abwärmenutzungsmöglichkeiten führen. 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.

Zum Vergleich der Umwelteinwirkung unterschiedlicher Kältemittel auf den globalen Treibhauseffekt wurden zahlreiche Untersuchungen durchgeführt. Der GWP-Wert (Global Warming Potential) vergleicht die Wirkung eines Kältemittels auf den globalen Treibhauseffekt mit jener von Kohlendioxid. Relevanter für die Beurteilung des Treibhauseffekts eines Kältemittels ist die Gesamteinwirkung als Summe aus dem **direkten globalen Erwärmungspotenzial** des Kältemittels (Leckage während der gesamten Lebensdauer einer Anlage und bei deren Entsorgung) und dem **indirekten globalen Erwärmungspotenzial** durch Treibhausgasemissionen (insbesondere CO₂), die bei der Erzeugung der zum Betrieb von Kälteanlagen oder Wärmepumpen benötigten elektrischen Energie entstehen. Die entsprechende Grösse wird als **TEWI** (Total Equivalent Warming Impact) bezeichnet. Der TEWI-Wert hängt deshalb stark von der Effizienz eines Wärmepumpenprozesses und natürlich auch von der Art der benützten Primärenergie ab. Eine hohe Energieeffizienz des Dampfkompansionsprozesses vermag deshalb höhere GWP-Werte des Kältemittels bis zu einem gewissen Grad zu kompensieren.

Die Umweltbeeinflussung durch Wärmepumpen ist aber nicht auf den Treibhausgaseneffekt beschränkt. Eine umfassende Antwort auf Umweltschäden bei der Verwendung unterschiedlicher Kältemittel kann deshalb nur eine **vollständige Ökobilanz** (Life Cycle Assessment **LCA**) liefern. Der Umweltrelevanz und die Wärmetransporteigenschaften der natürlichen Kältemittel wurden weltweit zahlreiche Studien gewidmet. Die Beiträge der Schweiz werden im Abschnitt 8.2.3 erörtert. Durch den durch solche Studien zusätzlich beschleunigten Ausstieg aus den FCK- und HFCK-Kältemitteln ist es durch weltweite Anstrengungen bis etwa 2005 gelungen, den die Zivilisation bedrohenden Ozonschichtabbau zu stoppen [Baumann M. et al 2007].

WÄRMEÜBERTRAGER

Zu Beginn der 1990er Jahre setzte sich der **Plattenwärmeübertrager** endgültig durch. Dies führte zu geringerem Kältemittelinhalt, zu kleineren Temperaturdifferenzen (und somit geringerem Exergieverlust bzw. höherer Effizienz) und zu kleineren Wärmepumpen.

DIGITALE REGELUNG

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. Nebenbei sei bemerkt, dass das Internet seine Wurzeln in der Schweiz hat, nämlich am internationalen Kernforschungszentrum CERN in Genf [Segal 1995].

8.2 Schweizer Beiträge zur Wärmepumpenheizung

Nach der Überwindung des "Einmal-gebrannt-Effekts" begann ab 1990 ein definitiver Aufschwung des Heizens durch Wärmepumpen. Dies hatte technische Gründe wie eine grössere Verlässlichkeit, ruhigere, effizientere Kompressoren und die Regelung durch Mikrocomputer. Aber weniger Vorurteile durch ein breiteres Verständnis der Vorteile der Wärmepumpentechnik, besser ausgebildete Planer, kompetentere Installateure, Qualitätskontrolle und nicht zuletzt innerhalb von 25 Jahren auf 50% gefallene Investitionskosten waren ebenso entscheidend.

1991 waren in der Schweiz etwa 30'000 Wärmepumpen mit einer mittleren Heizleistung von 25 kW in Betrieb. Etwa 2/3 davon nutzten Umgebungsluft als Wärmequelle, aber der Anteil an Erdwärmesondenanlagen nahm rasch zu [BFE 1993]. Um jene Zeit lag die Jahresarbeitszahl bei Luft/Wasser-Systemen bei etwa 2.4 und mit 2.5 für Sole/Wasser-Systeme nicht viel höher [Hubacher 2007]. Der Grund für den kleinen Unterschied zwischen diesen beiden Systemen liegt in den hohen Energieverlusten durch die Umwälzpumpen zur Förderung viel zu hoher Wärmeträgervolumenströme durch die Erdwärmesonden und einem Mangel an verlässlichen Auslegungsgrundlagen. Nach 1998 beschleunigte sich der Anteil mit Wärmepumpen beheizter neuer Einfamilienhäuser deutlich: Bild 8-1. Er liegt heute bei rund 75%.

Wärmepumpen erobern nun langsam auch den Sanierungsmarkt. Um 2006 hat der Anteil der Wärmepumpen im gesamten Raumheizungsmarkt unter 20 kW 33% erreicht: Bild 8-2. Zu dieser Zeit waren in der Schweiz etwa 100'000 Wärmepumpen in neuen Gebäuden und erst etwa 3000 Wärmepumpen in ehemaligen Kesselheizungen in Betrieb (www.fws.ch). Bei Heizleistungen über 50 kW wird die Wärmepumpenheizung auf der Basis des **Energie-Contractings**⁴⁶ immer populärer. Die grössten Energie-Kontraktoren in der Schweiz sind die Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ) und der Stadt Zürich (EWZ). Sie haben 2006 zusammen mehr als 50 GWh Wärme geliefert.

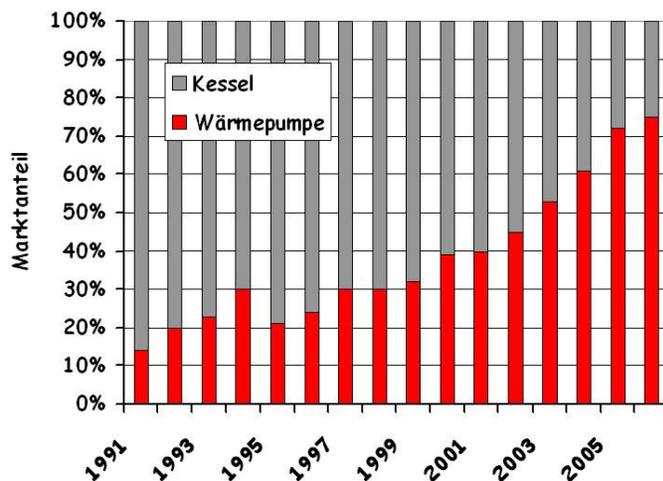


Bild 8-1 Marktanteil der Wärmepumpen mit einer Heizleistung bis 20 kW in neuen Einfamilienhäusern.

Werte aus www.fws.ch

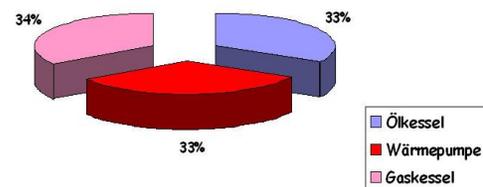


Bild 8-2 Gesamtmarktanteile bei den 2006 neu installierten Heizungen.

Werte aus www.fws.ch

Die meisten grundlegenden Innovationen kamen bereits vor 1990. Aber es galt und gilt noch ein enormes Optimierungspotenzial anzugehen. Viel wurde bereits erreicht, wie die Resultate des Schweizerischen **Wärmepumpentestzentrums** belegen. Innerhalb der vergangenen 15 Jahre wurde bei den getesteten Wärmepumpen für zentrale Warmwasserheizungen und Luft als Wärmequelle eine Verbesserung der mittleren Leistungszahlen um 30% von 2.6 auf 3.4 beobachtet: Bild 8-3. Dies entspricht nur moderaten Lorenzwirkungsgraden von 28% bis 36%. Die getesteten Luft/Wasser Wärmepumpen lagen bei einer mittleren Heizleistung von 8 kW in einem Heizleistungsbereich von 2.5 kW bis 30 kW.

In der gleichen Zeitperiode wurde bei Sole⁴⁷/Wasser-Wärmepumpen nur eine Verbesserung der mittleren Leistungszahl um 17% von 3.8 auf 4.5 oder eine Erhöhung des Lorenz-

⁴⁶ Beim "Energie-Contracting" kauft der Kunde kein Wärmepumpensystem und er kümmert sich auch nicht um den Unterhalt; er bezahlt nur für die gelieferte Wärme.

⁴⁷ „Sole“ ist der leider allgemein verwendete Ausdruck. Heute werden für Erdwärmesonden aber Mischungen aus Wasser und organischen Antifrostmitteln (meist Ethylenglykol) als Wärmeträger verwendet.

Wirkungsgrads von 43% auf 50% gemessen: Bild 8-4. Bei den besten Maschinen wurden allerdings in den letzten 15 Jahren keine merklichen Verbesserungen mehr erzielt. Die getesteten Sole/Wasser-Wärmepumpen lagen bei einer mittleren Heizleistung von 12 kW in einem Heizleistungsbereich von 5 kW bis 80 kW. Die deutlich höheren Werte für die Sole/Wasser-Maschinen verraten allerdings noch 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 Leistungszahlen von 3.8 auf 3.5 und von 4.5 auf 4.1. Dies entspricht noch mittleren Lorenz-Wirkungsgraden von 40% bis 47%.

Die bei den Messungen benützten Temperaturen der Wärmequellen (Luft 2°C, Sole 0°C) und der Wärmesenke (Wasser 35°C) geben einen ersten groben Eindruck über die für schweizerische Verhältnisse **zu erwartenden Jahresarbeitszahlen**. Es gibt aber viele Variablen, welche den tatsächlich erreichten Wert beeinflussen. Darauf wird in der Besprechung der Feldtests an vollständigen Wärmepumpenanlagen noch eingegangen. Wie dort noch gezeigt wird, werden heute bei Luft/Wasser-Systemen maximale Jahresarbeitszahlen von 3.4 und bei Erdwärmesonden/Wasser-Systemen sogar solche von 5.6 gemessen.

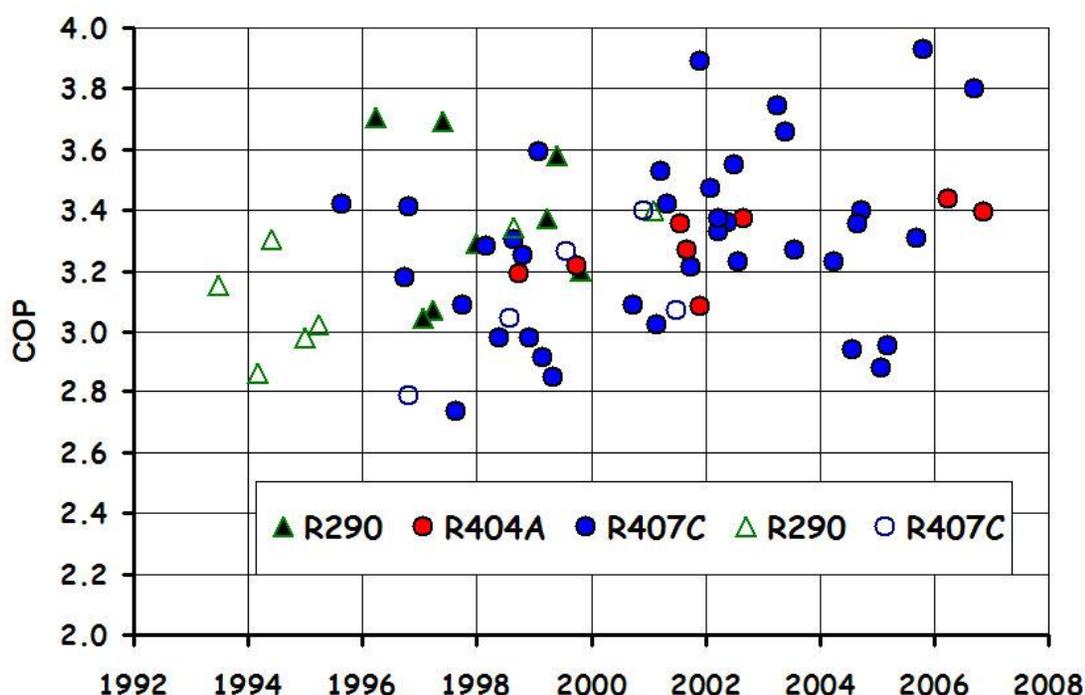


Bild 8-3 Leistungszahlen COP kommerzieller Luft (2°C) / Wasser (35°C) – Wärmepumpen. Maximale Wärmesenkentemperaturdifferenz 10 K. Nach Kältemittel und Kompressortyp aufgeteilte Messergebnisse des Schweizerischen Wärmepumpentestzentrums mit vollständigen Abtauzyklen.
Ausgefüllte Symbole: Scrollkompressoren; leere Symbole: Kolbenkompressoren.
Werte aus [Nani et. al 2005] mit zusätzlichen Messergebnissen aus [Nani 2008]

Die Betrachtung der Messergebnisse in Bild 8-3 und Bild 8-4 lässt den Verdacht aufkommen, dass seit dem verstärkten Wärmepumpenboom **ab 2005 keine Effizienzverbesserungen** mehr erzielt wurden. Behindert ein boomender Markt die Entwicklungen zu einer weiteren Verbesserung der Effizienz von Wärmepumpen?

Die beiden Bilder verdeutlichen auch den Siegeszug des **Scrollkompressors** bei Kleinwärmepumpen. Weiter zeigen sie nach einem anfänglichen Enthusiasmus einen gewissen Rückzug

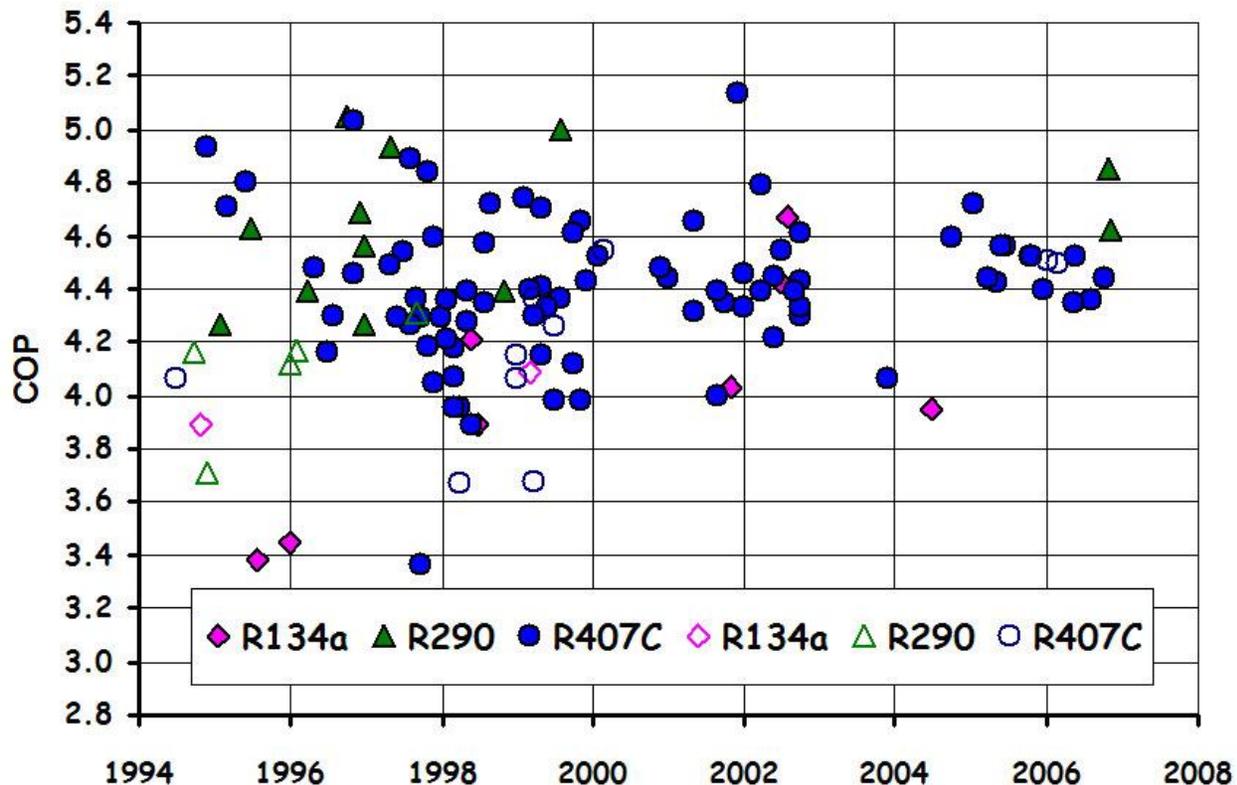


Bild 8-4 Leistungszahlen COP kommerzieller Sole (0°C) / Wasser (35°C) Wärmepumpen. Maximale Wärmesenktemperaturdifferenz 10 K. Nach Kältemittel und Kompressortyp aufgeteilte Messergebnisse des Schweizerischen Wärmepumpentestzentrums ohne Berücksichtigung des Energiebedarfs für die Sole-Umwälzpumpe.

Ausgefüllte Symbole: Scrollkompressoren; leere Symbole: Kolbenkompressoren.

Werte aus [Nani et. al 2005] mit zusätzlichen Messergebnissen aus [Nani 2008]

von Propan als natürliches **Kältemittel** bei den Luft/Wasser-Wärmepumpen. Sieger bei den Luft/Wasser- und den Sole/Wasser-Wärmepumpen ist R-407C, gefolgt von R-404A für Luft/Wasser- und R-134a oder Propan für Sole/Wasser-Maschinen. Die **Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten** wurden in der Schweiz durch Pioniergeist und eine gute Zusammenarbeit zwischen Praxis und Hochschule gefördert. Sie konzentrierten sich auf den Ersatz ozonschichtgefährdender synthetischer Kältemittel (FCK, HFCK) durch teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFC), die Entwicklung validierter Auslegungswerkzeuge für Erdwärmesondenanlagen, die Verbesserung der Wärmeübertragung bei Ein- und Zweiphasenoperationen, die Reduktion des Kältemittelvolumens, die Untersuchung neuer Kompressortypen, die Computersimulation für die verbesserte Auslegung von Wärmepumpenheizungssystemen und die Entwicklung einer Diffusions-Absorptionswärmepumpe. Auch Stirlingprozesse – vorab Freikolbensysteme – wurden untersucht. Hauptprioritäten waren aber die Entwicklung einer Wärmepumpe für den Sanierungsmarkt mit hohen Vorlauftemperaturen (Projekt „Swiss Retrofit Heat Pump“) und die Optimierung ganzer Wärmepumpenheizungssysteme durch ein optimales Einbinden der Wärmepumpen sowie der Entwicklung neuer Regelungs- und Diagnosemethoden. Weiter wurden neue Testmethoden zum Erfassen des dynamischen Verhaltens der Wärmepumpen und von Wärmepumpen mit kombinierter Warmwasserbereitung ausgearbeitet.

8.2.1 Ausgewählte Anlagen und Entwicklungen

TOALENERGIEANLAGEN – KOMBINATION BLOCKHEIZKRAFTWERK-WÄRMEPUMPE

In dieser Periode wurden zahlreiche grössere **Totalenergieanlagen** mit Blockheizkraftwerken und Wärmepumpen gemäss dem Bild 1-1 realisiert. Flusswasser, Seewasser, Grundwasser, Abwasser, Erdboden aber auch Kühllhäuser und Kunsteisbahnen wurden als Wärmequellen genutzt.

Hohe Nutzungsgrade von Totalenergieanlagen sind nur mit effizienten Blockheizkraftwerken realisierbar. Deshalb wurde im Rahmen eines BFE-Forschungsprojekts durch die Firma Liebherr Machines Bulle und die ETH-Zürich ein Gasmotor mit extrem tiefen Emissionswerten und sehr hohem mechanischen Wirkungsgrad entwickelt. Dieser sogenannte „**Swissmotor**“ ist mit einer patentierten, geregelten Abgasrückführung ausgerüstet und wird heute durch Liebherr in Bulle für Blockheizkraftwerke im elektrischen Leistungsbereich von 140 kW bis 280 kW produziert. Das Bild 8-5 zeigt ein durch AVESCO gebautes Beispiel.



Bild 8-5 Blockheizkraftwerk mit 8-Zylinder-Swissmotor. Elektrischer Wirkungsgrad 38%, elektrische Leistung 280 kW, Heizleistung 389 kW, NO_x < 50 mg/Nm³ [Avesco, CH-4901 Langenthal]

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. Inzwischen 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].

POSTVERTEILZENTRUM IN SCHLIEREN – ARA ALS WÄRMEQUELLE

Das automatische Verteilzentrum Müllingen der Schweizerischen Post in Schlieren ist das grösste Gebäude in der Umgebung Zürichs. Es hat einen hohen Wärme- (9'500 MWh/a mit einer Maximaltemperatur von 65°C) und Kältebedarf (8'500 MWh/a, 8°C...12°C). Beide werden durch eine Ammoniak-Wärmepumpenanlage mit 5.5 MW Leistung gedeckt. Als Wärmequelle dient die etwa einen Kilometer entfernte **Abwasserreinigungsanlage (ARA)** Werdhölzli der Stadt Zürich. Das Wärmepumpensystem wurde 2006 durch die Elektrizitätswerke der Stadt Zürich EWZ (www.ewz.ch) im Energie-Contracting-Verfahren erstellt.

WÄRMERÜCKGEWINNUNG AUS UNBEHANDELTEM ABWASSER

Der FEKA-Tank als lokale Lösung zur Wärmerückgewinnung aus unbehandeltem Abwasser wurde bereits im Abschnitt 7.2.5 behandelt: Bild 7-15.

In den 1990er Jahren hat Urs Studer seine Abwasserkanal-Wärmeübertrager „Rabtherm“ eingeführt. Diese **Wärmeübertrager** werden in der **Bodenzone der Kanalisationsrohre** eingebaut: Bild 8-6. 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]. 2007 hat Studer diverse Patente für Werkstoffe zur Verhinderung der Biofilmbildung eingereicht.

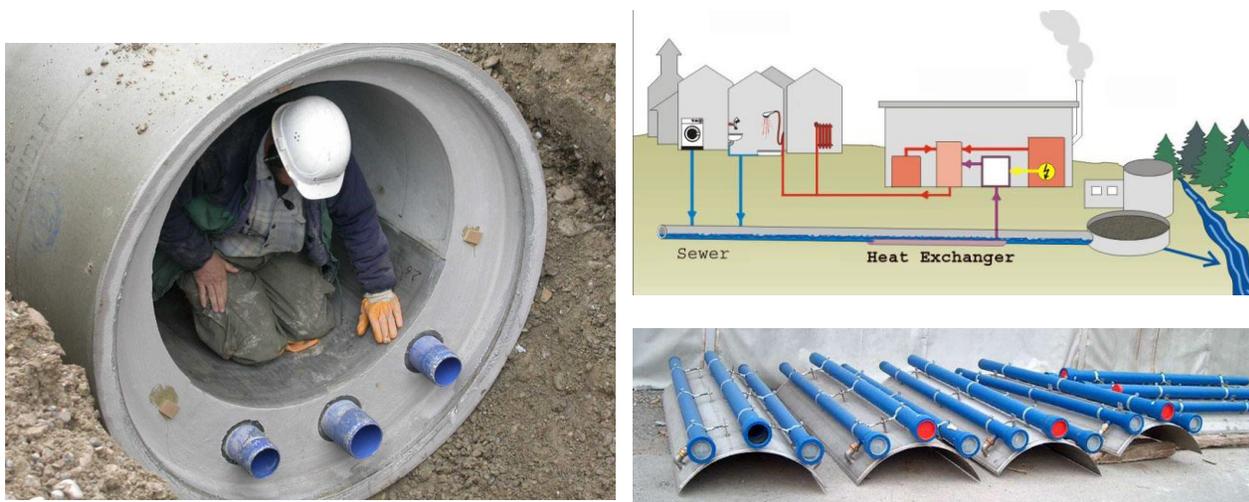


Bild 8-6 Rabtherm-Abwasserkanalelement (links), Prinzip und Rabthermelemente (rechts) [Müller 2005]

GROSSE ERDWÄRMESONDENFELDER

In dieser Periode wurden zahlreiche Wärmepumpensysteme mit Erdwärmesonden von Anlagen mit einzelnen Sonden bis zu grossen Feldern mit zahlreichen Erdwärmesonden gebaut. Bis 1990 lag die **Bohrtiefe** für Erdwärmesonden unter 150 m. Heute werden Bohrtiefen bis zu 350 m erreicht. Hier liegt die Festigkeitsgrenze des heutigen Sondenmaterials aus Kunststoff. Die optimale Bohrtiefe hängt von zahlreichen Einflussgrössen wie den geothermischen Eigenschaften und dem Temperaturgradienten des Erdbodens, der Durchströmgeschwindigkeit und

dem Druckverlust (→ Wärmeträgerpumpleistung!) ab. Heute liegen die häufigsten Bohrtiefen zwischen 150 m bei wichtiger passiver Sommerkühlung und bis 250 m bei reinem Heizen. Das bisher **grösste Erdwärmesondenfeld** der Schweiz wurde 2005 für das Hotel “The Dolder Grand” in Zürich mit 72 Sonden und einer gesamten Sondenlänge von 10'600 m gebaut. In diesem Luxushotel der Spitzenklasse wird die Sommerkühlung als ebenso wichtig beurteilt wie die Heizung im Winter. Deshalb wird das Erdwärmesondenfeld als Erdwärmespeicher betrieben und die Bohrtiefe beträgt nur 152 m. Das Bild 8-7 zeigt links die Bohrmaschine im Einsatz und rechts die Vorbereitung der U-Rohr-Erdwärmesonden aus Polyethylen [Rohner et al. 2005], [Signorelli 2008].

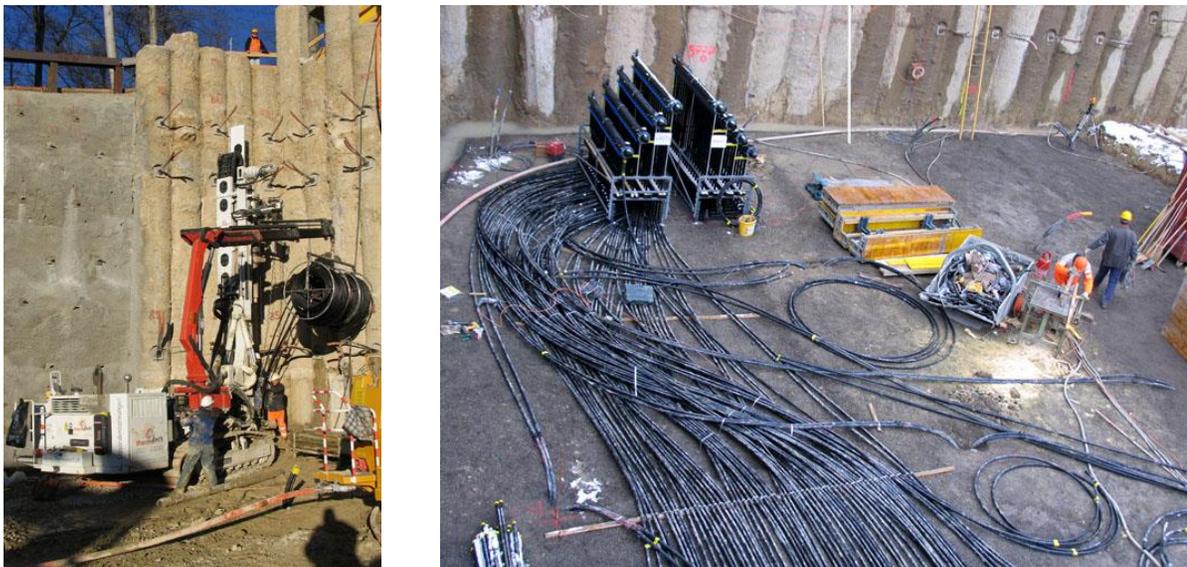


Bild 8-7 Erdwärmespeicher des Hotels “The Dolder Grand” in Zürich im Bau [Signorelli 2008]

TUNNELABWASSER ALS WÄRMEQUELLE

1993 wurde eine Wärmepumpenanlage zur Beheizung von Oberwald (Goms) mit warmem Abwasser aus dem **Furkatunnel** installiert [Arnold 1993]. Das Abwasser aus dem neuen Lötschberg-Basistunnel hat eine Temperatur von rund 20°C. Es soll als Wärmequelle für ein kleines Fernheiznetz in Frutigen genutzt werden. Der “Nahwärmeverbund Frutigen” plant die Betriebsaufnahme auf die Heizsaison 2008/2009⁴⁸.

BERGSEE AUF 1759 MÜM ALS WÄRMEQUELLE

Das Gebirgstal Engadin gehört in der Schweiz zu den Regionen mit den tiefsten Wintertemperaturen. Die mittlere Januartemperatur erreicht in St.Moritz nur rund –10°C. Deshalb ist hier besonders auf eine effiziente Raumheizung zu achten. 2006 wurde für das **Palace Hotel** (Bild 8-8) und das Schulgebäude “Grevas” in **St.Moritz** ein Wärmepumpenheizungssystem mit dem St.Moritzer See als Wärmequelle gebaut. 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 Energie-Contracting-Ver-

⁴⁸ www.bkw-fmb.ch/de/unternehmen/medien/2007/august/nahwaermeverbund.html

fahren gebaut. Sie wird in der EWZ-Zentrale in Zürich überwacht und vollständig ferngesteuert [Dubacher 2007].



Bild 8-8 Hotel Palace in St.Moritz mit dem eisbedeckten See (rechts im Bild) als Wärmequelle [Dubacher 2007]

NULLENERGIE-WOHNÜBERBAUUNG – EINE VISION WURDE WIRKLICHKEIT

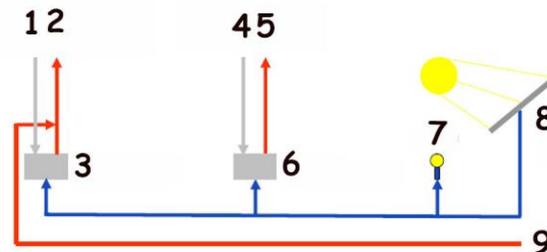
Heute werden in der Schweiz etwa 15% der neuen Häuser nach dem Niedrigheizenergiestandard „Minergie“ gebaut, auf den im Abschnitt 8.2.4 noch eingegangen wird. Einige zukunftsorientierte Architekten und Ingenieure gehen aber noch weiter. Ein solches Beispiel ist die 2006/2007 gebaute **Wohnüberbauung Eulachhof** in Winterthur mit **132 Wohnungen**. Sie unterschreitet sogar noch deutlich den Passivhaus-Standard „Minergie-P-Eco“. Sie kann hier nicht umfassend beschrieben werden, die Isolationsdicke von 38 cm mag aber einen Eindruck

Bild 8-9 Eulachhof Winterthur mit PV-Zellen zum Antrieb der Wärmepumpe und der kontrollierten Belüftung. [Allreal, CH-8050 Zürich]



über die hervorragende Isolation der Gebäudehülle geben. Auf dem Dach der Gebäude sind 1'240 m² Photovoltaikzellen mit einer Gesamtspitzenleistung von 176 kW_p installiert: Bild 8-9. Diese liefern im Mittel über das ganze Jahr die volle Antriebselektrizität für die Gebläse der kontrollierten Lüftung und die beiden Wärmepumpen⁴⁹. Bei Überproduktion der Photovoltaikanlage wird die nicht benötigte elektrische Energie in das öffentliche Elektrizitätsnetz abgegeben – bei ungenügender Produktion wird die fehlende Energie aus dem Netz bezogen: Bild 8-10.

Bild 8-10 Prinzip des Eulachhof-Wärmepumpensystems. 1 Abluft, 2 Frischluft, 3 Wärmepumpe zur Raumheizung, 4 Abwasser, 5 Warmwasser, 6 Warmwasser-Wärmepumpe, 7 Elektrizitätsnetz, 8 Photovoltaikzellen, 9 Spitzendeckung mit Fernwärme ab Kehrrichtverbrennung [Allreal, CH-8050 Zürich]



Die kontrollierte Lüftung ist mit einem zentralen Plattenwärmeübertrager zur Wärmerückgewinnung aus der Abluft ausgerüstet. Dies ist die Wärmequelle der ersten Wärmepumpe zur Raumheizung. Sie arbeitet hocheffizient, da die Vorlauftemperatur unter 30°C liegt. Als Wärmequelle für die zweite Wärmepumpe, die der Warmwasserbereitung dient, wird die Wärme aus dem häuslichen Abwasser mit Hilfe des bereits beschriebenen FEKA-Tanks (Bild 7-15) zurück gewonnen. Zur Spitzendeckung werden etwa 8.5% des Gesamtwärmebedarfs durch die Fernheizung einer Kehrrichtverbrennungsanlage gedeckt. Die aus der Fernheizung bezogene Wärme entspricht etwa der Verbrennungsenergie des Hausmülls, welche die Überbauungsbeholder der Kehrrichtentsorgung abliefern [Eulachhof 2006], [Weber 2007], [Kalberer 2007].

GROSSWÄRMEPUMPEN VON FRIOTHERM

In Europa ist mit Friotherm nur noch ein Hersteller von Turbokompressor-Wärmepumpen übrig geblieben. Skandinavien war immer ein wichtiger Wärmepumpenmarkt für **Sulzer** und ist es heute auch für **Friotherm**. Die relevanten Aktivitäten von Sulzer wurden 1996 zur **Sulzer Friotherm** umgruppiert. Zusammen mit Sulzer Infra wurde diese 2001 an die französische Suez-Gruppe verkauft und setzte die Tätigkeit unter dem Namen Axima Kältetechnik fort. Schliesslich wurde Friotherm 2005 durch ein Management-Buyout wieder eine selbständige Schweizer Firma. Nachfolgend werden nur einige ausgewählte Anlagen erwähnt, welche für skandinavische Länder gebaut wurden. Eine umfassendere Übersicht zu den grossen UNITOP-Radialkompressor-Wärmepumpen findet man in [Friotherm 2008].

Eine Friotherm-Wärmepumpe mit einer Heizleistung von **18.4 MW** und einer Leistungszahl von 2.8 wurde 2002 in **Oslo** (N) installiert. Sie nutzt Rohabwasser mit 9.6°C als Wärmequelle zur Erzeugung von Nutzwärme von 60°C und 90°C für das Fernwärmesystem von Oslo: Bild 8-11 [Friotherm 2003].

In **Umea** (S) wird die **Abwärme der Rauchgase eines Kraftwerks** von 38°C/28°C zur Verwendung im Fernheizungssystem mit 60°C/70-75°C aufgewertet. Die Wärmepumpenanlage (Bild 8-12) mit einer Heizleistung von **13.7 MW** erreicht eine Leistungszahl von 4.1. Die Heizleistung lässt sich im weiten Bereich von 10% bis 100% regeln. Eine andere „Abfall-zu-Energieanlage“ wurde für ein Kraftwerk in **Malmö** (S) gebaut: **19 MW** und eine Leistungszahl von 5.43 bei 34.2°C/24.3°C → 50°C/60-70°C [Pietrucha 2008].

⁴⁹ Der restliche elektrische Energiebedarf der Bewohner wird durch die Energieversorgung der Stadt gedeckt.



Bild 8-11 18.4 MW Wärmepumpe der Viken Fjernvarme (Fernheizsystem von Oslo [Friotherm 2008])

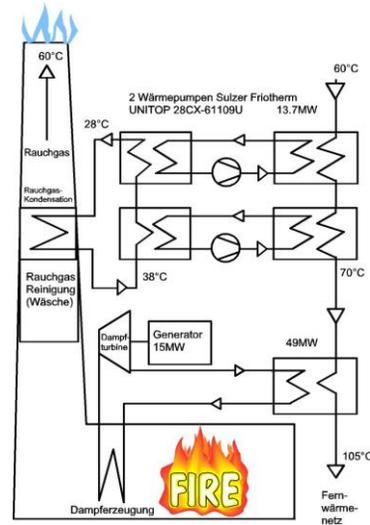


Bild 8-12 Rauchgaswärmerückgewinnung Kraftwerk Umea (S) [Friotherm 2008]

In **Helsinki**, Finnland, hat Friotherm kürzlich die weltweit grösste **kombinierte Heiz- und Kühlwärmepumpe** montiert. Mit **60 MW Kälteleistung** und **90.5 MW Heizleistung** im Sommerbetrieb bei 45°C/88°C und 83.8 MW Heizleistung bei 40°C/62°C im Winterbetrieb erreicht sie im Winterbetrieb eine Heizleistungszahl von 3.5 und im Sommerbetrieb eine Kühl-Heizleistungszahl von 6.0. Im Winterbetrieb dient ein indirektes Abwassersystem mit 12°C/5°C als Wärmequelle [Pietrucha 2008].

INNOVATION ZUR ERHÖHUNG DER LEISTUNGSZAHL BEI ZEOTROPEN KÄLTEMITTELN

SATAG Thermotechnik⁵⁰ in Arbon patentierte 1997 eine spezielle Anordnung des inneren Wärmeübertragers zur Reduktion des Verdampferdrucks in Wärmepumpen und/oder Kältemaschinen mit zeotropen Kältemitteln. Das Spezielle an der Erfindung ist die Kombination des Temperaturfühlers am Austritt aus dem Wärmeübertrager (nicht wie üblich am Eintritt), eine Drallblechtropfenabscheidung und die Verwendung eines zeotropen Kältemittels. Dank einer Verschiebung der Endverdampfung in den inneren Wärmeübertrager ergibt die Erfindung für eine gegebene Verdampfer Temperatur einen tieferen Druck und damit einen geringeren Leistungsbedarf. Dies vergrössert die Leistungszahl [Kuratli et al 1997], [Hohl 2008].

WÄRMEPUMPEN-WÄSCHETROCKNER

Schulthess⁵¹ und V-Zug⁵² brachten 2002 einen Wärmepumpen-Wäschetrockner auf den Markt. Verglichen mit konventionellen Wäschetrocknern (Tumbler) benötigen diese nur noch die Hälfte an elektrischer Energie [Schwarzwald 2002].

HEIZKÖRPERWÄRMEPUMPEN

1995 gab es in der Schweiz rund 200'000 mit elektrischer Widerstandsheizung beheizte Einfamilienhäuser. Etwa 80% davon waren Einzelraumheizungen mit einem Anteil von 8% am Gesamtelektrizitätsverbrauch der Schweiz. Angeregt durch Hans Ulrich Schärer und Fabrice Rognon vom BFE wurde **1995 die Entwicklung einer Heizkörperwärmepumpe** (kleine Luft/Luft-Wärmepumpe mit einer heizkörperförmigen Oberfläche zur Wärmeabgabe) zum Er-

⁵⁰ 1998 wurde SATAG von der Viessmann Gruppe übernommen und heisst jetzt Viessmann (Schweiz), SATAG Thermotechnik, CH-9320 Arbon; www.satagthermotechnik.ch.

⁵¹ Schulthess Maschinen, CH-8633 Wolfhausen; www.schulthess.ch.

⁵² V-ZUG AG, CH-6301 Zug; www.vzug.ch.

satz für die elektrischen Widerstandsheizungen gestartet. Nach einer Marktstudie entwickelte Emil Grüniger mit seiner Firma **Soltherm** in Altendorf und den Experten Winfrid Seidinger und Max Ehrbar eine solche Einzelraumwärmepumpe samt dazu passender Bohrvorrichtung zum Anbringen der Luftein- und -austrittsöffnungen in der Gebäudewand. Diese Entwicklung erreichte den Stand erster Pilotanlagen. Die Heizkörperwärmepumpe war mit einem Beton-Wärmespeicher versehen und wurde durch die Firma Hegner in Galgenen in kleinen Stückzahlen mit Heizleistungen von 600 W, 900 W und 1.2 kW hergestellt. Um das Betriebsgeräusch so tief wie möglich zu halten, musste an der Wärmeverteilung durch freie Konvektion – analog einem konventionellen Heizkörper – festgehalten werden. Dies hatte ernste Konsequenzen auf die Leistungszahl. Die Jahresarbeitszahl der Heizkörperwärmepumpe erreicht nur etwa 2.3. Die technischen Probleme waren zwar gelöst – aber mit einer Amortisationszeit um 15 Jahre blieben die Käufer fern [Humm 1996]. Auch im Ausland wurden ähnliche Ideen verfolgt. Diese Bemühungen wurden durch den Annex 23 (F+E-Vorhaben 23) des IEA Wärmepumpenprogramms in den Jahren 1996 bis 1998 international koordiniert. Teilnehmende Länder waren Kanada (Projektleitung), Frankreich, Schweden, die Schweiz und die U.S.A. [Annex 23 1999].

KLEINE DIFFUSIONS-ABSORPTIONSWÄRMEPUMPEN

Hans Stierlin war überzeugt, dass für Absorptionswärmepumpen, die nach dem im Abschnitt 5.1.2 beschriebenen Prinzip seines SIBIR Kühltanks funktionieren würden, ein Markt bestehe. Ihm schwebte ein Aggregat mit etwa 3.5 kW Heizleistung vor, das dank seinem geräuschlosen Betrieb sogar in Wohnräumen installiert werden könnte. In diesem Fall könnten sogar zusätzliche 150 W Abwärme genutzt werden, die sonst nur einen Wärmeverlust darstellen würden. Für einen höheren Leistungsbedarf sah Stierlin die parallele Verwendung mehrerer Module vor. Er begann 1988, im Alter von 72 (!) Jahren, in seiner kleinen Firma "Crea-therm" mit der Umsetzung seiner Idee. Dabei arbeitete er eng mit Carl Ulrich Wassermann von Entex (siehe unten), einem früheren Mitarbeiter in Stierlins SIBIR-Fabrik, zusammen: Bild 8-13. Das neue Aggregat funktionierte nach demselben Prinzip wie Stierlins berühmter SIBIR Kühltank: Bild 8-14. 1992 hatte Stierlin seine Ammoniak-Diffusions-Absorptionswärmepumpe „**DAWP**“ bereits soweit entwickelt, dass damit neutrale Tests durchgeführt werden konnten. Im Vergleich zum Funktionsmodell im Bild 8-13 wies der Prototyp nun eine deutlich reduzierte Bauhöhe aus. Im Auftrag des BEW (Bundesamt für Energiewirtschaft) wurden während der Heizperiode 1992/1993 in einem älteren Einfamilienhaus mit Radiatoren und in einem neueren Einfamilienhaus mit Fußbodenheizung **Feldversuche** in bivalentem Betrieb mit Gaskesseln durchgeführt. In beiden Fällen wurde Luft als Wärmequelle benützt. Beide Absorptionswärmepumpen funktionierten perfekt. Unter Berücksichtigung der elektrischen Hilfsenergie für das Umgebungsluftgebläse und die Regelung wurde ein Primärenergienutzungsgrad von 137% (PER = 1.37) erreicht.

Der Feldtest demonstrierte die im Vergleich zum Dampfkomppressionsprozess nur geringe Abhängigkeit des Nutzungsgrads der DAWP von der Verdampfungstemperatur. Es wurde auch bestätigt, dass die DAWP möglichst stationär betrieben werden sollte.

Ein dritter Prototyp wurde an der ETH-Zürich unter Laborbedingungen und Einhaltung der DIN-Normen 8900 und 33830 detailliert untersucht: Bild 8-15. Sie ergaben dieselben erfreulichen Ergebnisse. Bei 0°C / 35°C wurde ein Nutzungsgrad von 143% und bei 0°C / 50°C ein solcher von 135% gemessen (PER 1.43 bzw. 1.35). Im Falle der Nutzung eines Teils der Abwärme durch Aufstellen in einem Wohnraum würden diese Werte sogar 150% bzw. 142% betragen. Durch ein einfaches Vertauschen der Anschlüsse kann mit der DAWP übrigens im Sommer auch gekühlt werden. Als problematisch erwies sich die Warmwasserbereitung [Stierlin et. al 1993], [Stierlin und Wassermann 1996].

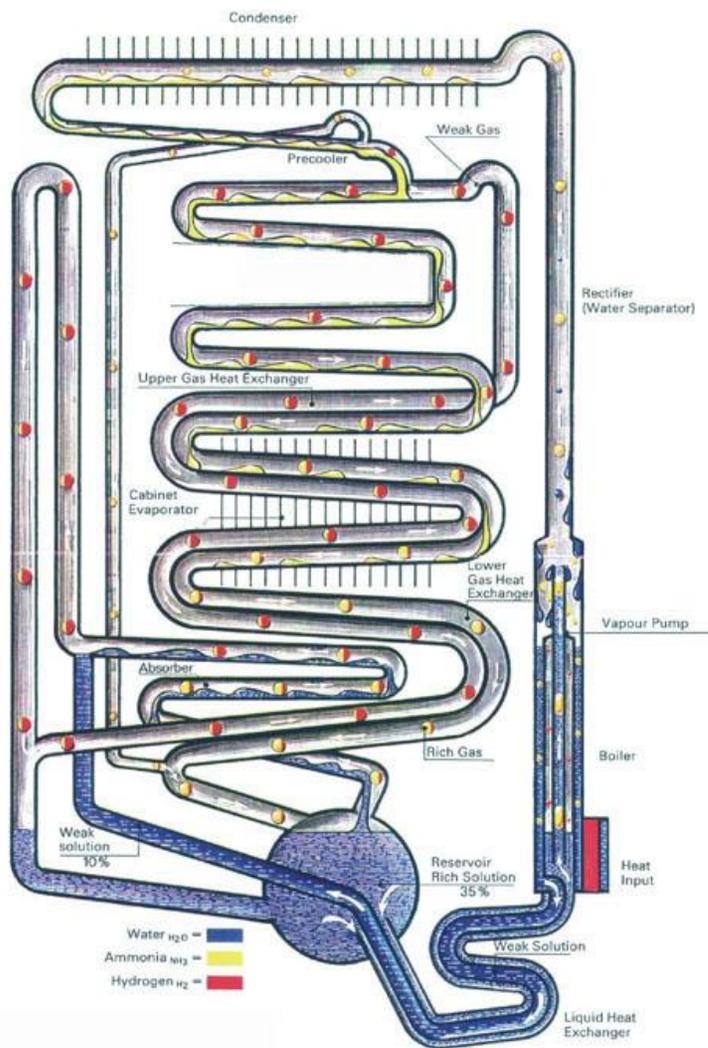


Bild 8-14 Funktionsprinzip der Diffusions-Absorptions-Wärmepumpe DAWP [Wassermann 2007]



Bild 8-13 Erstes Funktionsmuster der DAWP



Bild 8-15 Labortest der DAWP an der ETH Zürich, 1993

In einem weiteren Schritt wurde die Kombination einer Diffusions-Absorptionswärmepumpe mit einem konventionellen Gaskessel für die Spitzenlastdeckung ausgearbeitet. Diese Kombination wurde als **“AWP-Kessel”** bezeichnet, und es wurde verlangt, dass diese einen Gesamtnutzungsgrad von 125% bis 130% erreichen sollte. Die Planung des AWP-Kessels sah eine intelligente Steuerung für den optimalen Einsatz von DAWP und Kessel sowie einem Gaskessel entsprechend einfache Anschlüsse an die Heizung vor. Um die schweizerischen Kesselhersteller zum Mitmachen zu bewegen, wurde eine Marktstudie durchgeführt und eine detaillierte Anforderungsliste aufgestellt. Leider war dann aber keiner der im internationalen Masstab kleinen Schweizer Kesselhersteller bereit, das hohe Entwicklungsrisiko einzugehen. In der Folge wanderte die weitere Entwicklung nach Deutschland und Holland ab (siehe Abschnitt 8.3).

Nachdem SIBIR an Electrolux verkauft wurde, gründete Carl Ulrich Wassermann (war während vier Jahren Leiter der Abteilung „Engineering“ bei SIBIR) 1990 die Firma **ENTEX Energy**⁵³. ENTEX entwickelt Diffusions-Absorptionssysteme für unterschiedliche Anwendungen wie Kühlschränke für Hotelzimmer und mit Erdgas betriebene Klimatisierungseinheiten. In den späten 1990er Jahren entwickelte Wassermann eine **zweite Generation von Diffusions-Absorptionswärmepumpen**. Sie zeichnet sich aus durch das Fehlen von Druckbehältern: Die Ammoniak-Wasser-Lösung befindet sich nur noch im Innern von Rohrleitungen. Weiter wurde

⁵³ ENTEX Energy, CH-5445 Eggenwil, www.entex-energy.ch.

auch die Fertigung des Aggregats vereinfacht. Die Heizleistung der bis 4 Moduleinheiten beträgt je 1.9 kW. Der Nutzungsgrad soll 150% erreichen. Bei der Fertigstellung dieses Berichts sind Verhandlungen mit europäischen Herstellern noch im Gang.

ABSORPTIONSWÄRMEPUMPEN IN WOHNÜBERBAUUNGEN

Um 1995 wurde in der Wohnsiedlung "Im Bilander" in Brugg mit 342 Wohnungen eine Wärmepumpenanlage installiert. Diese übernimmt rund 40% des Wärmebedarfs der Siedlung. Bei dieser Pilotanlage wird in einer ersten Stufe Wasser für ein lokales **Mitteltemperaturnetz** mit einer kommerziellen **870 kW Lithium-Bromid/Wasser-Absorptionswärmepumpe** mit Grundwasser (10°C-13°C) als Wärmequelle auf eine Temperatur von 50°C (Vorlauf) / 40°C (Rücklauf) erwärmt. Ab diesem Mitteltemperaturniveau wird die Restwärmerzeugung für die Warmwasserbereitung mit elektrischen Wärmepumpen übernommen. Unter Berücksichtigung der Hilfsenergien für die Umwälzpumpen resultierte ein Gesamtnutzungsgrad von 130% (PER = 1.3) [Krüsi 1996]. Dieser Wert liegt klar unter demjenigen einer modernen Kombination Blockheizkraftwerk – Wärmepumpe oder Kombikraftwerk – Wärmepumpe. Dieses System wurde deshalb nicht mehr weiter verfolgt.

8.2.2 Wärmepumpe für den Einfamilienhaus-Sanierungsmarkt

Als Resultat koordinierter Anstrengungen von Herstellern, Installateuren, Verbänden, öffentlicher Unterstützung und Bauherren hat der Wärmepumpenanteil beim Bau neuer Einfamilienhäuser einen Anteil von 75% erreicht: Bild 8-1. Im viel grösseren Sanierungsmarkt erreicht der Anteil an Wärmepumpen aber erst etwa 3%. In anderen Ländern ist dieser Anteil noch viel kleiner. Dies lässt auf ein **sehr hohes Potenzial im Sanierungsmarkt** schliessen.

Jeder neu installierte Kessel bedeutet eine verpasste Gelegenheit für eine effizientere Heizung. Allein in Europa passiert dies pro Jahr etwa eine Million Mal. Es werden also fast diskussionslos höhere CO₂-Emissionen akzeptiert, als es der Stand der Technik ermöglichen würde.

Wo liegen die Hindernisse? Die älteren Warmwasser-Zentralheizungssysteme weisen im Allgemeinen eine hohe Vorlauftemperatur auf. Konventionelle Wärmepumpen stossen an ihre Grenzen, wenn sie die mit den **hohen Heizungstemperaturen** im Sanierungsmarkt verbundenen **hohen Temperaturhübe** überwinden müssen. Auf Initiative von Hans Ulrich Schärer, Fabrice Rognon und Martin Zogg wurde deshalb 1998 das Vorhaben "**Swiss Retrofit Heat Pump**" gestartet. Ziel der Entwicklung war eine Sanierungsmarkt-Wärmepumpe, welche die Anforderungen für alte Zentralheizungssysteme bei hohem Wirkungsgrad und tragbaren Kosten erfüllen. Dieses Vorhaben hatte zwischen 1998 und 2003 im Wärmepumpenforschungsprogramm des Bundesamts für Energie (BFE) **oberste Priorität**.

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 bis 60°C ohne Zusatzheizung bewältigen können. Hauptanforderungen waren mit Luft als Wärmequelle (einschliesslich aller Hilfsantriebe) Lorenz-Wirkungsgrade von über 37.5% im ganzen Betriebsbereich und von 42.5% für den Testpunkt mit Luft 2°C / Wasser 50°C. Die übrigen Anforderungen sind in [Zogg 2002a] aufgeführt.

Zur Unterstützung der Schweizer Wärmepumpenhersteller wurden durch das BFE eine Reihe flankierender Forschungsprojekte gestartet. Diese bearbeiteten sowohl die thermodynamischen Herausforderungen wie auch Themen der Regelung. Sie wurden in Zusammenarbeit zwischen Herstellern, Hochschulen und dem Wärmepumpentestzentrum durchgeführt.

Hauptthema der Forschungsprojekte waren **neue Kreisprozesse für Kleinwärmepumpen** mit einer Heizleistung unter 25 kW, um die erwähnten Anforderungen für einen hohen Temperaturhub erfüllen zu können. Im Vordergrund standen ein geringerer Heizleistungsabfall, eine tiefere Kompressoraustrittstemperatur und eine höhere Effizienz bei hohen Temperaturhüben. Das Bild 8-16 gibt eine Übersicht über untersuchte Kreisprozesse. Diese wurden zunächst durch Computersimulation optimiert, dann gebaut und im Labor ausgemessen. Die vielversprechendsten Prozesse wurden dann in realen Wärmepumpenheizungen getestet. Die Hauptresultate des Vergleichs der untersuchten Prozesse sind in der Tabelle 8-1 aufgeführt.



Bild 8-16 Im Vorhaben *Swiss Retrofit Heat Pump* untersuchte Wärmepumpenprozesse für hohen Temperaturhub

Die thermodynamisch meist versprechendste Lösung für hohe Temperaturhübe ist die Zweistufen-Wärmepumpe mit zwei Kompressoren gemäss dem Bild 8-17. Eine Wärmepumpe mit diesem Kreisprozess wurde gebaut und getestet [Zehnder et al. 1999]. 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 beiden Kompressoren behinderte. Zudem ist eine Wärmepumpe dieses Typs zu kompliziert, um mit den zu ersetzenden kostengünstigen Kesseln zu konkurrieren.

Tabelle 8-1 Vergleich der untersuchten Kreisprozesse für Sanierungsmarkt-Wärmepumpen. Verbesserung der Heizleistung und der Leistungszahl verglichen mit konventionellen einstufigen Wärmepumpenprozessen [Zogg 2002a]

	2 Stufen 2 Kompressoren	Economizer	Economizer und Sauggaswärme- übertrager	Separater WP- kreislauf für die Kondensat- unterkühlung
Prinzip	Bild 8-17		Bild 8-18	Bild 8-19
Kältemittel	R-407C	R-407C	R-407C	R-407C, R-417A (Isceon 59)
Kompressor	1. Stufe Kolben 2. Stufe Scroll	Kommerzieller Scroll mit Ein- spritzöffnung für flüssige Phase	Scroll Prototyp ⁵⁴ mit Einspritzöff- nung für Dampf	Scroll (Hauptkreislauf) Kolben (Hilfskreislauf)
Verbesserung der Heizleistung	50%	15%	30%	20%
Verbesserung der Leistungszahl	14%	unbedeutend	15%	5%
Kompressor- austrittstemp.	unproblematisch	unproblematisch	unproblematisch	mit R-407C zu hoch

Der Kreisprozess mit **Economizer** und einer **Zwischeneinspritzöffnung für Dampf** ist eine einfachere und kostengünstigere Lösung. Er ist von grösseren Wärmepumpen mit Schraubekompressoren gut bekannt: Ein Kondensatteilstrom wird auf ein mittleres Druckniveau expan-

⁵⁴ Heute kommerziell erhältlich.

diert. 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 Kreislauf hat die folgenden Vorteile (Begründungen in [Zogg 2002a]):

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

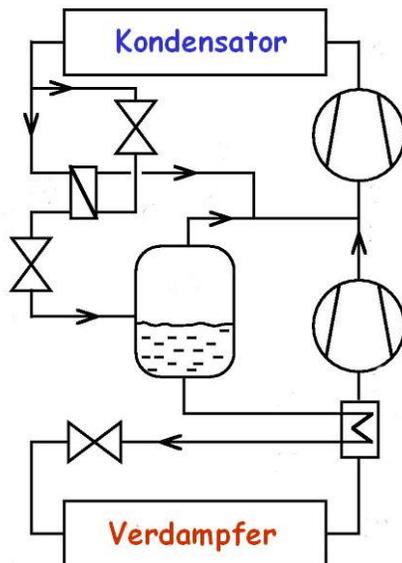


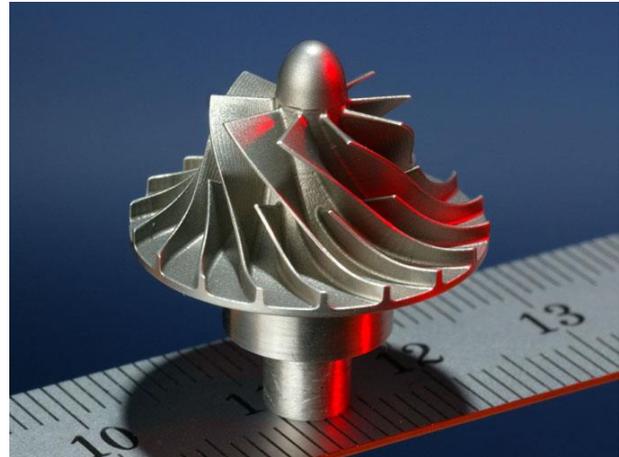
Bild 8-17 Wärmepumpenprozess mit zwei Kompressoren, Economizer und Zwischeneinspritzung. Kolbenkompressor in der ersten und Scroll-Kompressor in der zweiten Stufe. Kältemittel R-407C [Zehnder et al. 1999]

Als 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 Folgeforschungsprojekt wurde dann von der Firma Copeland ein erster Prototyp eines Scrollkompressors mit für die Dampfeinspritzung optimierter Zwischeneinspritzung zur Verfügung gestellt. Zusätzlich wurde die Versuchswärmepumpe noch mit einem Sauggaswärmeübertrager ausgerüstet: **Bild 8-18**. Gegenüber einem einfachen Einstufenprozess wurden damit bei hohen Temperaturhuben mit dem Kältemittel 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 Dampfwischeneinspritzung. Dieser Prozess wurde in der Praxis erstmals von SATAG/Viessmann eingesetzt. **Inzwischen** wurde dieser Prozess (je nach Kältemittel mit oder ohne Sauggaswärmeübertrager) zum **Standardprozess** für Einfamilienhaus-Wärmepumpen mit hohem Temperaturhub.

In einem weiteren Lösungsansatz haben [Reiner et al. 1998] einen **Kreisprozess mit einem separaten Hilfskreislauf** untersucht. Dieser Hilfskreislauf nutzt die Kondensatunterkühlung als Wärmequelle für die Enderwärmung des Zentralheizungswassers: **Bild 8-19**. Ein entsprechendes Wärmepumpen-Funktionsmuster wurde mit den Kältemitteln R-407C und R-417A (Isceon 59) getestet. Bei hohen Temperaturhuben wurde gegenüber einem Einstufenprozess eine Steigerung der Heizleistung um 20% und der Leistungszahl um 5% erreicht. Mit R-417 war

kompressoren ermutigende Ergebnisse. Sie wären kleiner und leichter als bisherige Kompressoren [Schiffmann und Molyneaux 2002].

Bild 8-20 Rotor des Funktionsmusters eines ölfreien Miniatur-Turbokompressors [Schiffmann et al. 2005]



In einer zweiten Projektphase wurde ein erster Einstufenkompressor gebaut und getestet. Die Lagereinheit lief mit einer Luftturbine bis 150'000 U/min problemlos. Der Antrieb mit einem Elektromotor entpuppte sich als schwieriger. Mit einem ersten Motor konnten die Lager bei tieferen Drehzahlen nicht betrieben werden. Mit dem zweiten Versuchsmotor war der Betrieb bis 104'000 U/min erfolgreich – dann kam es zur metallischen Berührung und das Gaslager wurde zerstört [Schiffmann et al. 2005]. Das Projekt wird fortgesetzt.

8.2.3 Weitere Unterstützung durch öffentliche Forschung und Entwicklung

Die folgenden Projekte wurden durch das Wärmepumpenforschungsprogramm des BFE (Bundesamt für Energie) koordiniert und teilweise oder ganz finanziert. Leiter dieses Programms waren Hans Ulrich Schärer (bis 1992), Martin Zogg (bis 2002) und Thomas Kopp (bis heute). Fabrice Rognon und Max Ehrbar sind verantwortlich für die Wärmepumpen-Pilot- und -Demonstrationsprojekte.

HANDBUCH FÜR BESSER WÄRMEPUMPENINSTALLATIONEN

Im Rahmen des Impulsprogramms „RAVEL“ (rationelle Verwendung von Elektrizität) des damaligen Bundesamts für Konjunkturfragen stellten erfahrene Fachleute konsolidiertes technisches Wissen zur direkten Anwendung in der Wärmepumpenpraxis zusammen. In den Jahren 1993 bis 1996 wurden drei Handbücher publiziert. Das erste über die Planung, die Ausführung und den Betrieb von Wärmepumpen [Baumgartner et al. 1993], das zweite über sinnvolle hydraulische Schaltungen [Gabathuler et al. 1994] und das dritte zur Qualitätssicherung [Gabathuler et al. 1996].

KOSTENGÜNSTIGE WÄRMEPUMPENHEIZUNG FÜR NIEDRIGENERGIEHÄUSER

Niedrigenergiehäuser mit einem Jahreswärmebedarf unter $160 \text{ MJ/m}^2\text{a}$ weisen eine dichte und gut isolierte Gebäudehülle, hohe solare Wärmegewinne, Niedrigtemperatur-Wärmeverteilungssysteme 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].

HYDRAULISCHE STANDARDSCHALTUNGEN

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 Wärmeverteilssysteme, 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 Angeboten verschiedener Hersteller [Afjei et al. 2002], [Gabathuler et al. 2002b].

EFFIZIENZSTEIGERUNG DURCH OPTIMIERTES ABTAUEN

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]. Als Datengrundlagen dienten die Messungen des Wärmepumpentestzentrums in Winterthur-Töss (WPZ). Sie wurden ergänzt durch weitere Messungen im Labor und durch Feldmessungen. Aus den Messungen im WPZ wurden 6 Wärmepumpen mit **Prozessumkehrabtauung** und 7 Wärmepumpen mit **Heissgasabtauung** analysiert. Es wurden auch unkonventionelle Abtaulösungen wie Nutzen der Wärme aus dem Wärmeverteilssystem oder Abtauen mit Raumluft (Luftabtauung) untersucht. Überraschenderweise ergibt die Heissgasabtauung über eine Betriebsdauer von 15 Jahren etwa dieselben Gesamtkosten wie die Prozessumkehr. Die Luftabtauung schneidet recht gut ab – sie ist aber mit einem beträchtlichen Raumkomfortverlust verbunden.

EFFIZIENZSTEIGERUNG DURCH ERDREGISTER

Es wurden zahlreiche monovalente Luft/Wasser-Wärmepumpensysteme mit Erdregistern gebaut. Bei diesen wird die Umgebungsluft durch ein im Erdboden verlegtes Rohrleitungssystem (100-250 mm Innendurchmesser, 20-60 m lang, Luftgeschwindigkeit 3 – 10 m/s) zur Wärmepumpe geführt. Die Rohre werden beispielsweise ums Haus oder im Garten verlegt. Grundidee ist das Vorheizen der Luft in kalten Nächten oder auch über längere Perioden mit tiefer Temperatur. Eine Untersuchung zeigte, dass die Jahresarbeitszahl mit solchen Systemen um 5% bis 10% erhöht werden kann. Verglichen mit Erdwärmesondenanlagen ist dies nicht überwältigend. Aber im Sommer kann das Rohrleitungssystem zur passiven Kühlung einen oft entscheidenden Komfortsteigerungsbeitrag leisten [Huber et al. 1995].

GERÄUSCHARME LUFT/WASSER-WÄRMEPUMPEN

Über die Hälfte der Kleinwärmepumpen mit Heizleistungen bis 25 kW nutzen Umgebungsluft als Wärmequelle. Speziell in dicht überbauten Gebieten haben die Luft/Wasser-Wärmepumpen gelegentlich zu Beanstandungen infolge der Geräusentwicklung 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 Einzelmassnahmen [Graf

2002]. Ihre Umsetzung in kommerziellen Luft/Wasser-Wärmepumpen hat bereits zu Erfolgen geführt [Beerhalter 2007].

MODELLIERUNG VON ERDWÄRMESONDEN

Unter der Leitung von Ladislaus Rybach wurden die Studien zur rechnerischen Erfassung von Erdwärmesonden und Erdwärmesondenfeldern an der ETH-Zürich fortgesetzt [Rybach et al. 1990, 1992, 1998], [Rybach 2001, 2004]. **Computersimulationen** sind allerdings nur nützlich, wenn die benötigten **geothermischen Stoffwerte** hinreichend genau bekannt sind. Deshalb wurde 1998/1999 durch Werner Leu und Mitarbeiter 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].

Als Werkzeug für Computersimulationen ganzer Wärmepumpensysteme mit **Erdwärmesonden** wurde durch Arthur Huber⁵⁵ das neue, dynamische Berechnungsmodul **EWS** zur Berechnung der Temperatur des aus der 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 EWS⁵⁶ erlaubt es die dynamische Computersimulation ganzer Wärmepumpenanlagen mit Erdwärmesonden auf Personal Computern. EWS wurde später in das schweizerische Wärmepumpenauslegungsprogramm WpCalc eingebaut [Stalder et al. 2001] und durch Sarah Signorelli und Thomas Kohl, dem Nachfolger von Ladislaus Rybach, am Institut für Geophysik der ETH-Zürich, validiert [Signorelli und Kohl 2002].

ÖKOLOGISCHE EINWIRKUNG VON ERDWÄRMESONDEN

Das damalige Bundesamt für Umwelt- Wald und Landschaft **BUWAL** (heute Bundesamt für Umwelt) liess die ökologischen Einwirkungen von Erdwärmesonden auf den **Erdboden** und das **Grundwasser** gründlich abklären. Darauf veröffentlichte das BUWAL 1994 **Richtlinien** für die Installation von Erdwärmesonden. Dies war eine weitere Schweizer Pionierarbeit und hatte auch einen wichtigen Einfluss auf die spätere deutsche Richtlinie VDI 4640 (siehe Abschnitt 8.3). Es war übrigens für die Schweiz nicht sehr einfach, ihrer restriktiven Haltung in diesen Fragen in der beratenden Kommission für die VDI-Richtlinie Gehör zu verschaffen. Eine entsprechende Schweizerische Norm SN 565 384/6 (Erdwärmesonden / Sondes géothermiques / Sonde geothermique) ist in Vorbereitung.

Aus ökologischen Gründen wurden in der Schweiz Direktexpansionssysteme für Wärmepumpen mit ölgeschmierten Kompressoren nie zugelassen, falls dazu alternative Lösungen möglich sind. Und die gibt es immer. Als einzige Ausnahme wären im Moment ölfreie CO₂-Kreisläufe möglich [Beck 2007], [Rognon 2007].

REGENERATION VON ERDWÄRMESONDEN - NACHHALTIGKEIT

Eine detaillierte Untersuchung der Nützlichkeit einer **Sommerregeneration** einzelner Erdwärmesonden und ganzer Erdwärmesondenfelder durch thermische Solaranlagen zeigte ein ernüchterndes Ergebnis. Meistens vermag der durch die Regeneration bewirkte Mehrertrag nicht einmal die dafür benötigte Umwälzpumpenenergie 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].

⁵⁵ Arthur Huber, Huber Energietechnik, Zürich, www.hetag.ch.

⁵⁶ Dies wurde durch eine Kombination numerischer Berechnung in Sondennähe mit einer analytischen Rechnung im entfernteren Erdbodenbereich erreicht.

KOMBINIERTES KÜHLEN UND HEIZEN MIT ERDWÄRMESPEICHER

In der Nutzung der Abwärme von Kälteanlagen und Klimaanlage zur Raumheizung und Warmwasserbereitung liegt im Vergleich zu getrenntem Kühlen und Heizen ein grosses Energiesparpotenzial. Bei Kälteanlagen ist der Kälteleistungsbedarf während dem Jahr oft annähernd konstant. Dies gilt auch für den Wärmeleistungsbedarf zur Warmwasserbereitung. Im Gegensatz dazu gibt es in der Schweiz nur im Sommer einen allfälligen Bedarf zur Raumkühlung und nur im Winter einen Raumheizungsbedarf. Der entsprechende Heiz- oder Kühlbedarf variiert zudem mit der sich laufend ändernden Umgebungstemperatur. Deshalb stimmen im Allgemeinen die Bedürfnisse zum Kühlen und Heizen weder im Tagesverlauf noch saisonal überein.

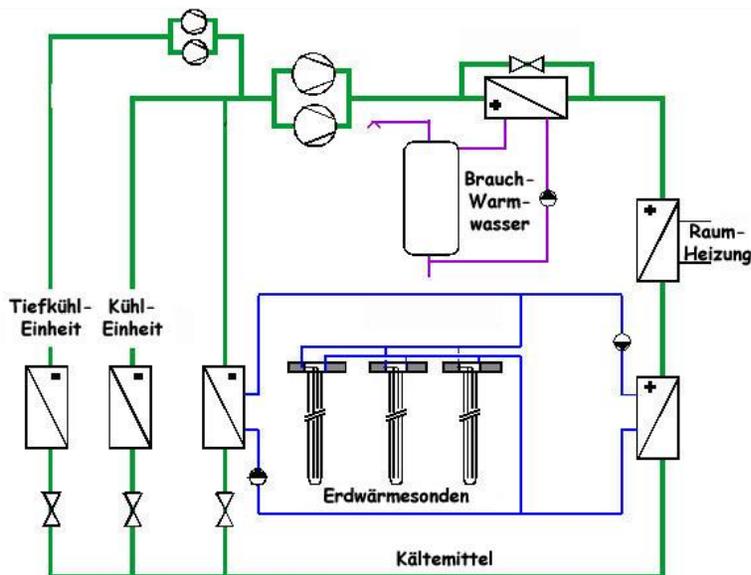


Bild 8-21 Vereinfachtes Funktionsschema einer von KWT für ein Restaurant⁵⁷ gebauten Anlage mit kleinem Erdwärmespeicher zur kombinierten Heizung und Kühlung [Good et al. 2001]



Bild 8-22: Kompressor des untersuchten Anlagebeispiels [KWT, CH-3123 Belp]

Während tägliche Schwankungen noch durch Warmwasserspeicher aufgefangen werden können, erfordert der **Ausgleich jahreszeitlicher Schwankungen Erdwärmespeicher mit Erdwärmesondenfeldern**. Bei niedrigem Wärmebedarf kann die Überschusswärme aus den Kondensatoren der Kälteanlagen im Erdboden gespeichert werden. Dies ist typisch für den Sommerbetrieb. Bei typischem Winterbetrieb dominiert der Raumheizungsbedarf, und die Wärme aus dem Erdboden kann dann als zusätzliche Wärmequelle genutzt werden. Das Bild 8-21 zeigt das Prinzip einer solchen von KWT eingeführten Anlage (Bild 8-22) für das kombinierte Heizen und Kühlen. Sie ist typisch für den **Gewerbekältebereich** mit Kälte- und Tiefkühl-einheiten, die mit der Warmwasserbereitung und der Raumheizung kombiniert werden. Für solche Systeme zur kombinierten Heizung und Kühlung wurde im Auftrag des Bundesamts für Energie ein **Planungshandbuch** ausgearbeitet. Darin wird das in fünf Schritte unterteilte Auslegungsvorgehen an einem praktischen Beispiel illustriert [Good 2000], [Good et al. 2001]. Die Dimensionierung grosser Erdwärmesondenfelder aufgrund detaillierter Computersimulationen wird in [Rohner et al. 2005] behandelt.

UMWELTRELEVANZ NATÜRLICHER KÄLTEMITTEL

Als Schweizer Beitrag zum Annex 22 (F+E-Vorhaben 22 „Compression Systems with Natural Working Fluids“) des IEA Wärmepumpenprogramms wurde 1966 eine erste **Ökobilanz (Life Cycle Assessment (LCA))** zur Umweltrelevanz alternativer Kältemittel durchgeführt [Weibel 1996]. In einer zweiten Studie wurde der Ökobilanzvergleich auf alle relevanten Umwelteinwirkungen natürlicher und synthetischer Kältemittel für **schweizerische Stromproduktionsver-**

⁵⁷ Autobahnrestaurant Grauholz bei Bern.

hältnisse erweitert und vertieft. Diese neue Ökobilanzstudie wurde für die Wärmepumpenheizung, die Klimatisierung und die Kälteerzeugung durchgeführt. Es wurden für Systeme mit **Ammoniak, Propan, Kohlendioxid, die Fluorkohlenwasserstoffe (FKWs) R-134a, R-404A, R-407C, R-410A, Isceon 59 (das heutige R-417A) und Chlordifluormethan R-22** als Referenz die folgenden Umwelteinwirkungen analysiert: 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 Kältemitteln und vergleichbarer oder besserer Effizienz als Anlagen mit FKWs ergeben geringere Umweltbelastungswerte. Einzige Ausnahme ist die höhere photochemische Ozonbildung bei Anlagen mit Propan. Wenn die Anlagen mit natürlichen Kältemitteln aber eine tiefere Effizienz aufweisen als jene mit synthetischen Kältemitteln, ist die Situation nicht mehr so eindeutig. Dann ist ein individuelles Abwägen zwischen der Schonung nicht erneuerbarer Primärenergien, der Versauerung, dem Sommersmog, der Giftwirkung in Gewässern und der Emission radioaktiver Emissionen einerseits und dem Treibhauseffekt, dem Ozonschichtabbau und der Giftwirkung auf den Boden andererseits erforderlich, um die ökologischen Vorteile natürlicher Kältemittel zu beantworten. **Hauptschlussfolgerung** der Studie war, dass FKW-Kältemittel noch toleriert werden können, wenn es keine zumutbaren Alternativen mit natürlichen Kältemitteln gibt. Dies aber nur unter den Bedingungen einer regelmässigen, **strikten Dichtheitskontrolle** während der ganzen Anlagelebensdauer und einem fachgerechten **Kältemittelrecycling** vor der Entsorgung der Anlage. Gleichzeitig sollten die Herstellungsverfahren für die FKW-Kältemittel verbessert werden [Frischknecht 1999, 2000], [Zogg 2000b].

2003 wurde mit der Schweizerischen Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV) für die **weitere praktische Verwendung** von FKW-Kältemitteln ein vernünftiger Kompromiss beschlossen: Neue Anlagen mit einer FKW-Füllung von mehr als 3 kg benötigen eine offizielle Bewilligung und die Anlagedichtheit muss jährlich überprüft werden.

WÄRMEÜBERGANG BEI FKW- UND NATÜRLICHEN KÄLTEMITTELN

Unterstützt durch das Wärmepumpenforschungsprogramm des Bundesamts für Energie wurden an der ETH-Lausanne umfassende Untersuchungen zum Wärmeübergang bei der Verdampfung von **alternativen Kältemitteln** in glatten und strukturierten Rohren ohne und mit Schmierölen durchgeführt. Für den experimentellen Teil wurde eine spezielle Versuchsanlage mit neigbaren Rohren gebaut [Thome 1994, 1996], [Kattan et al. 1995], [Thome et al. 1997]. Die Untersuchungen wurden auch auf das natürliche Kältemittel **Ammoniak** ausgedehnt [Zürcher et al. 1997]. An der ETH-Zürich wurde der Wärmeübergang bei überkritischem **CO₂** untersucht [Treppe Ch. 1997].

AMMONIAKWÄRMEPUMPE FÜR EINFAMILIENHÄUSER

Die ausgezeichneten thermodynamischen Stoffeigenschaften von Ammoniak sind bestens bekannt. Es wird deshalb in grossen Anlagen in hohem Umfang eingesetzt. Es gibt aber noch keine kommerziellen Kleinwärmepumpen mit Ammoniak. Im Rahmen des Wärmepumpenforschungsprogramms des Bundesamts für Energie wurde deshalb die Entwicklung einer Ammoniak-Kleinwärmepumpe gestartet. Zuerst wurden die Vorteile von Ammoniak gegenüber Propan oder R-407C für Kleinwärmepumpen theoretisch untersucht. Die Resultate für Ammoniak waren ermutigend – insbesondere für kleine Temperaturhübe, wie sie bei Fussbodenheizungen genügen. Mit Ammoniak sind für solche Wärmepumpen Druckverhältnisse um 15 nötig. Ohne Gegenmassnahmen würde dies mit einem einzigen Kompressor zu hohe Austrittstemperaturen ergeben. Ein Kleinkompressor mit Zwischeneinspritzung ist nicht verfügbar, und eine Zweistufenanlage wäre zu aufwändig. Deshalb wurde ein Schraubenverdichter oder ein Flü-

gelzellenverdichter mit einem hohen Ölumlaufl zur Kühlung vorgeschlagen [Boyman et al.1997].

Bild 8-23 Funktionsmodell einer Wärmepumpe mit Ammoniak als Kältemittel und einem offenen Flügelzellenverdichter [Kopp 2001]



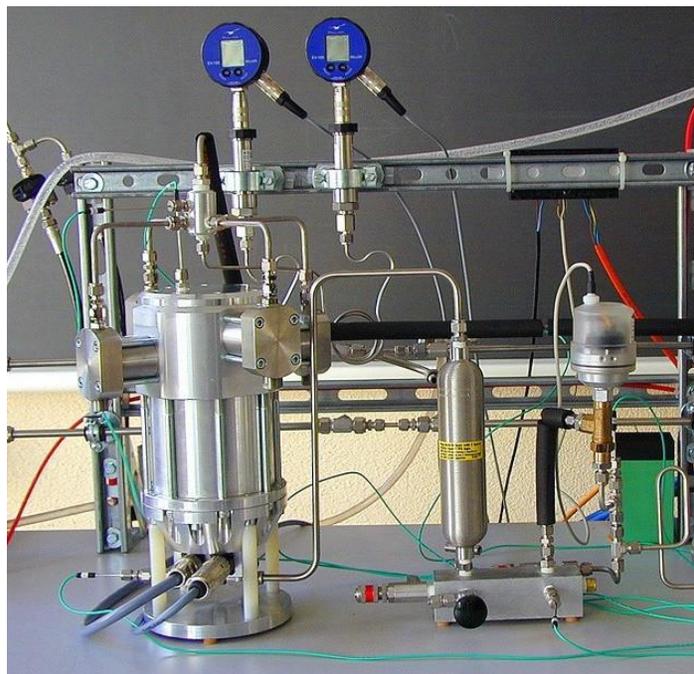
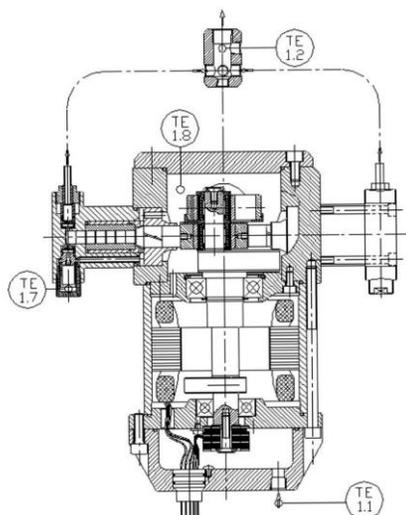
In der zweiten Projektphase wurde ein Funktionsmuster einer Sole/Wasser-Wärmepumpe mit einem offenen Flügelzellenverdichter ausgelegt, gebaut und nach zahlreichen Rückschlägen schliesslich doch noch erfolgreich gestartet: Bild 8-23 [Kopp 2001]. In der dritten Projektphase wurden mit dem Flügelzellenverdichter und einem kleinen Schraubenkompressor umfangreiche Versuche durchgeführt. Dabei wurden die folgenden Leistungszahlen erreicht: 2.4 bei $-7^{\circ}\text{C}/50^{\circ}\text{C}$ und 2.7 bei $2^{\circ}\text{C}/50^{\circ}\text{C}$. Der Grund für diese bescheidenen Resultate liegt im hohen Öldurchsatz. Die Wärmepumpe schaffte einen maximalen Temperaturhub von einer Soletemperatur von -20°C auf eine Senkenwassertemperatur von 60°C . Der Economizer bewirkte eine Erhöhung der Leistungszahl um 6% und der Heizleistung um 12%. Einige Tests wurden auch mit dem kleinen Schraubenkompressor ohne Zwischeneinspritzmöglichkeit gefahren. Beide für die Versuche benützten Kompressoren vermochten nicht zu befriedigen. Eine Kommerzialisierung der Ammoniak-Kleinwärmepumpe wäre nur mit geeigneteren Kompressoren möglich [Geisser und Kopp 2003].

KLEINER OELFREIER CO_2 KOMPRESSOR

Überkritische CO_2 -Prozesse kämpfen immer noch mit Schmierölproblemen. Ziel eines im Rahmen der IEA⁵⁸ durch geführten BFE-Forschungsvorhabens war deshalb ein Machbarkeitsnachweis für einen kleinen, ölfreien, halbhermetischen **CO_2 -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 (750 bis 2'900 U/min) konstruiert und gebaut: Bild 8-24. Das Funktionsmuster wurde über den ganzen Leistungs- und Drehzahlbereich erfolgreich getestet und erbrachte vielversprechende Resultate [Baumann 2001], [Baumann und Conzett 2002].

⁵⁸ Beitrag der Schweiz zum **Annex 27** (F+E-Vorhaben 27 "Selected Issues on CO_2 as a Working Fluid in Compression Systems") des Wärmepumpenprogramms der Internationalen Energieagentur.

Bild 8-24 Funktionsmuster eines kleinen, ölfreien CO₂ Kompressors [Baumann 2001]



PULSBREITENMODULATION – EIN FORTSCHRITTLICHES KONZEPT

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 die Pulsbreitenmodulation eingeführt. **Grundidee dieses neuen Konzepts** ist die volle Nutzung der thermischen Trägheit von Gebäude und zentralem Wärmeverteilungssystem zum Erreichen möglichst langer Wärmepumpenbetriebszeiten ohne merklichen Komfortverlust. Ein weiteres Ziel ist die Elektrizitätskostenreduktion durch einen möglichst langen Betrieb in Niedertarifzeiten. Das Konzept der Pulsbreitenmodulation wurde mit drei unterschiedlichen Lösungsansätzen realisiert. Sie unterscheiden sich in den Methoden zur Bestimmung der benötigten Wärmemenge und der optimalen Verteilung der Betriebsperioden über den ganzen Tag.

Bei den beiden einfacheren Methoden wird der Wärmebedarf entweder aus der **Energiekennlinie** (Tageswärmebedarf in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur) oder aus der **Laufzeitkennlinie** (Wärmeleistungsbedarf gemäss Energiekennlinie dividiert durch die Wärmeleistungsproduktion gemäss der Wärmepumpenkennlinie) bestimmt. Die dritte Methode, die **modellbasierte prädiktive Regelung**, ist wesentlich komplexer. Sie erfasst die thermische Trägheit von Gebäude und Wärmeverteilungssystem durch ein physikalisches Modell. Diese Variante schätzt die Umgebungstemperatur in den folgenden Stunden aus den in den letzten 24 Stunden gemessenen Temperaturen. Bei der Optimierung der paketweisen Wärmezufuhr werden die Leistungszahl der Wärmepumpe wie auch die Tarifstrukturen und die von den Elektrizitätswerken vorgegebenen Betriebsunterbrechungszeiten für Wärmepumpen berücksichtigt. Der modellbasierte prädiktive Regler kann je nach Präferenz des Betreibers entweder einen minimalen Elektrizitätsverbrauch oder minimale Elektrizitätskosten anstreben.

Die neuen Regler wurden in einem für Heizungssanierungen typischen Einfamilienhaus mit einer Luft/Wasser-Wärmepumpe erprobt: [Bild 8-26](#). Das Warmwasser-Zentralheizungssystem war mit einem in Serie geschalteten Wärmespeicher ausgestattet. Die Wärmeverteilung erfolgte über eine Fussbodenheizung (FBH) und Radiatoren (RAD). Die Heizleistungsanteile konnten von 33% FBH / 67% RAD bis 33% RAD / 67% FBH verändert werden.



Bild 8-26 Für den Test der drei Pulsbreitenmodulations-Konzepte benütztes Einfamilienhaus [Gabathuler et al. 2002a]



Bild 8-25 Dynamischer Wärmepumpenprüfstand für Vergleichstests unter definierten Bedingungen [Zogg und Shafai 2001]

Gegenüber der herkömmlichen aussentemperaturgeführten Rücklauftemperaturregelung (ARL) ergaben sich mit der **Pulsbreitenmodulation** bei vergleichbarem Komfort in den beheizten Räumen folgende **Vorteile** [Gabathuler et al. 1998, 2002a], [Shafai et al. 1999, 2002]:

- Die Wärmepumpen konnten mit einem Niedertarifanteil von 60% bis 70% gefahren werden (gegenüber 43% bei ARL).
- Es ergaben sich längere Wärmepumpenlaufzeiten im Teillastbereich von 0.5...1.5 Stunden.
- Die Umwälzpumpe musste während den Zeiten mit ausgeschalteter Wärmepumpe nicht betrieben werden → tieferer Hilfsenergiebedarf.
- Einfache Einstellung (keine Heizkurveneingabe, keine Koppelung von Heizkurve und Zeitprogramm sowie von Heizkurve und Warmwasserbereitung).
- Optimale Nutzung von Niedertarifzeiten ohne Überdimensionierung der Wärmepumpe.

In den Projektphasen 3 und 4 wurden zum Vergleich der drei erwähnten Regelungskonzepte in Zusammenarbeit mit Industriepartnern Versuche unter identischen Randbedingungen mit einem an der ETH-Zürich eigens dafür gebauten dynamischen Prüfstand (**Bild 8-25**) durchgeführt [Zogg und Shafai 2001], [Gabathuler et al. 2003]. In der vierten Projektphase wurde die Regelung durch prädiktive Pulsbreitenmodulation durch eine **adaptive SelbstEinstellung erweitert**. Dies erforderte eine on-line Parameteridentifikation des Hausmodells. In einer weiteren Erweiterung hat der Regler nun auch **Zugriff auf die Wettervorhersagedaten** von MeteoSchiweiz. Dies erlaubt eine bessere Voraussage der in den kommenden Stunden zu erwartenden Temperaturen und Solarstrahlung. Schliesslich wurde auch noch die Warmwasserbereitung integriert. Der neue Regler benötigt nach der Inbetriebnahme der Wärmepumpe und insbesondere auch nach der Austrocknungsphase neuer Häuser kein manuelles Nachjustieren mehr. Er reduziert die Heizkosten ohne Komforteinbusse um rund 10% gegenüber konventionellen Reglern. Dies wird hauptsächlich durch eine bessere Nutzung von Niedertarifzeiten erreicht [Bianchi et al. 2005].

FORTGESCHRITTENE FEHLERERKENNUNG UND DIAGNOSEMETHODEN

Während dem Betrieb einer Wärmepumpe können Fehler, wie die Belagsbildung auf Wärmeübertrageroberflächen (Fouling), Komponentenversagen oder Kältemittelverlust 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. Es wurden eine physikalische Methode zur Erfassung wichtiger Parameter und Kennzahlen (HeatWatch) und eine Fuzzy-Methode zur automatischen Fehlererkennung (FuzzyWatch) ausgearbeitet. Die „Black-Box-Methode“ FuzzyWatch kommt mit einer **minimalen Anzahl von Sensoren** (in der Regel einige Temperatursensoren) aus, während HeatWatch bessere Klassifizierungsergebnisse liefert. Die entwickelte Software ermöglicht dem Überwachungssystem in einer Trainierphase die **automatische Fuzzy-Regelbildung** und lässt sich auf einem modernen Wärmepumpenregler programmieren. 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].

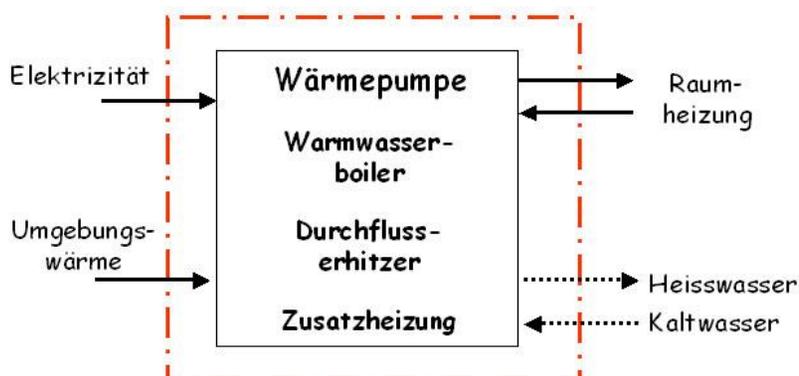
DYNAMISCHER WÄRMEPUMPENTEST

Der übliche Wärmepumpentest auf der Basis der Europäischen Norm EN 14511 ist ein Test bei stationärem Betrieb. Aber insbesondere im Ein-/Aus-Betrieb verursachen die An- und Auslaufphasen eine deutliche Verschlechterung der Heizleistung der Wärmepumpen. Ein dynamischer Wärmepumpentest soll diese im **realen Betrieb** auftretenden Verluste erfassen. Ein erster Ansatz dazu wurde ausgearbeitet [Shafai et al. 2000] und wurde an Sole/Wasser- und Luft/Wasser-Wärmepumpen bereits mit Erfolg getestet [Ehrbar und Hubacher 2001].

WÄRMEPUMPENTEST FÜR KOMBINIERTHE HEIZUNG UND WARMWASSERBEREITUNG

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 wird deshalb immer dringender, einen Wärmepumpentest durchzuführen, welcher die Gesamteffizienz für kombinierte Raumheizung und Warmwasserbereitung liefert. Trotzdem sind die bestehenden Testverfahren auf die separate Raumheizung (oder –Kühlung) und die separate Warmwasserbereitung beschränkt. Auf die Initiative von Martin Zogg wurde deshalb 2002 ein internationales Vorhaben als **Annex 28** (F+E-Vorhaben „Test Procedure and Seasonal Performance Calculations for Residential Heat Pumps with Combined Space and Domestic Hot Water Heating“) **des IEA Wärmepumpenprogramms** gestartet. An diesem nehmen die Schweiz (Projektleitung), Österreich, Kanada, Frankreich, Deutschland, England, Japan, Norwegen, Schweden und die U.S.A. teil. Projektziel ist ein neues Testverfahren, welches die nötigen Daten zur korrekten Berechnung der Jahresarbeitszahl kombinierter Heizungs-Warmwasser-Systeme ermöglicht. Das Bilanzgebiet umfasst dabei die Wärmepumpe, den Boiler (oder Durchlauferhitzer) und optionale Zusatzwärmer für die Spitzendeckung: Bild 8-27.

Bild 8-27 Bilanzgrenzen für den Test von Wärmepumpen mit kombinierter Raumheizung und Warmwasserbereitung



Die Resultate des Vorhabens wurden 2005 an der Eröffnungsveranstaltung der 8. Internationalen Wärmepumpenkonferenz in Las Vegas vorgestellt. Teile davon fanden bereits Eingang in Normen. So wurde der Berechnungsansatz in die Europäische Norm EN 14335 übernommen, und das deutsche Normengremium hat sie in ihre nationale DIN-Norm implementiert. Die Resultate des Annex 28 werden auch Eingang in die Arbeitsgruppen des Europäischen Komitees für Normung CEN finden [Wemhöner und Afjei 2005]. Die Schweizer Beiträge an den Annex 28 waren nebst der Projektleitung eine Berechnungsmethode für die Jahresarbeitszahl [Afjei und Wemhöner 2003] und ein experimenteller Ansatz basierend auf den Erfahrungen des Schweizerischen Wärmepumpentestzentrums in Winterthur-Töss [Montani 2003].

8.2.4 Unterstützung durch Verbände und den Bund

POLITISCHE RANDBEDINGUNGEN

Die Schweizer Stimmbürger und Stimmbürgerinnen haben in einer Referendumsabstimmung vom 23. Oktober 1990 mit einer Mehrheit von 53.6% einem **zehnjährigen Moratorium für die Nuklearenergie** zugestimmt. Das war eine Folge der Atomkraftwerkskatastrophe von Tschernobyl von 1986 und dem jahrelangen Widerstand der Bevölkerung gegen den Bau eines grossen, neuen Kernkraftwerks in Kaiseraugst. Die politische Antwort auf diese neue Situation war das **Aktionsprogramm „Energie 2000“**. Es setzte die folgenden bis zum Jahr 2000 zu erreichende Ziele: Verbrauch an fossiler Energie und CO₂-Produktion nicht grösser als 1990, Steigerung der Nutzung erneuerbarer Energien um 0.5% bezüglich dem Gesamtenergiebedarf und um 3% bezüglich dem Raumheizungsbedarf, Erhöhung der Elektrizitätsproduktion aus Wasserkraftwerken um 5% und jener aus den bestehenden Kernkraftwerken um 10%.

„Energie 2000“ wird durch das **Aktionsprogramm „EnergieSchweiz“** mit analogen Zielen und einem Jahresbudget von rund 40 Millionen Franken oder 0.1% des Bundesbudgets fortgesetzt. Nebst anderen Punkten wurde das Ziel einer Reduktion der CO₂-Emissionen bis 2010 um 10% gesetzt. Um die Umsetzungsherausforderungen effizient lösen zu können, wurden 5 **Energieagenturen** gegründet. Die Wärmepumpentechnologie wird durch die Agentur Erneuerbare Energien und Energieeffizienz AEE abgedeckt. In dieser ist auch die Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz FWS vertreten [Schmid 2001].

FÖRDERGEMEINSCHAFT WÄRMEPUMPEN SCHWEIZ FWS

1992 arbeitete Hans Ulrich Schärer vom Bundesamt für Energiewirtschaft ein **Strategiepapier** zum Erreichen der Ziele des Aktionsprogramms „Energie 2000“ aus. Er wies dabei auf das hohe Energiesparpotenzial der Wärmepumpentechnologie hin. Wärmepumpen hatten damals in neuen Gebäuden nur einen Marktanteil von etwa 7.5%. 1991 gab es in der Schweiz etwa 37'000 Wärmepumpen. Schärer postulierte bis zum Jahr 2000 einen Ausbau der Wärmepumpenheizungen um weitere 100'000 Einheiten mit einer Gesamtwärmeleistung von 2'500 MW. Er schloss in seine Strategie auch die Beschaffung der zusätzlichen elektrischen Energie durch Ersatz der elektrischen Widerstandsheizungen sowie der zusätzlichen Stromproduktion durch Dampfturbinen in Kehrlichtverbrennungsanlagen und durch Blockheizkraftwerke ein. Schärer hat die Wärmepumpentechnik übrigens stets zu den erneuerbaren Energien gezählt, was sich später als vorteilhaft für die politische Akzeptanz und für die Finanzierung der flankierenden Massnahmen zeigte [Schärer 1992, 2007].

Auf der Basis dieses Strategiepapiers arbeitete Franz Beyeler einen detaillierten Aktionsplan für Marketing und Kommunikation aus [Beyeler, Lehni 1992]. Aufgrund seines Aktionsplans schlug er die Schaffung der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz vor [Beyeler 2007].

Gabriella Brugger, damalige Leiterin der Stabsstelle für Energiewirtschaft des Kantons Zürich, erhielt von ihrem Vorgesetzten Rudolf Kriesi, dem Begründer des sehr erfolgreichen Minergie-

konzepts⁵⁹, den Auftrag, die Wärmepumpentechnik durch die Gründung eines Informations- und Qualitätssicherungszentrums zu unterstützen. Sie wusste, worum es ging, brachte sie doch von ihrem Elternhaus sehr schlechte Erfahrungen mit einer erbärmlichen Wärmepumpenanlage mit. Dank ihrer ausgezeichneten Kommunikationsfähigkeit gelang es ihr, die (zumindest zu Beginn) misstrauische Wärmepumpengemeinschaft zu motivieren und den Auftrag in einem gesamtschweizerischen Rahmen zu einem erfolgreichen Ende zu führen.

1993 wurde auf der Grundlage einer engen Zusammenarbeit zwischen Gabriella Brugger, Hans Ulrich Schärer (BFE), Franz Beyeler (MKR Consulting), Ruedi Kriesi (Kanton Zürich) und Hanspeter Eicher (Energie Schweiz) die **Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz** (FWS) gegründet. Verantwortliche Mitglieder dieses Verbandes waren ab Beginn der Bund (vertreten durch Fabrice Rognon vom BFE), die Kantone, der Verband der Schweizerischen Elektrizitätswerke VSE⁶⁰, die Verbände der relevanten Installateure VSHL und SSIV⁶¹ und die Mitglieder der Arbeitsgemeinschaft Wärmepumpen AWP. Dieter Wittwer von INFEL⁶² war der erste Geschäftsleiter der FWS [Brugger und Eicher 1994], [Mariani-Brugger 2007], [Schärer 2007], [Szokody 2007].

Hauptziel der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz ist die **Verbreitung effizienter Wärmepumpensysteme von hoher Qualität zu einem erschwinglichen Preis** gemäss dem Motto „zufriedene Wärmepumpenbesitzer vor hohen Verkaufszahlen“. Bereits im Dezember 1993 organisierte die FWS ihre ersten **Tage der offenen Tür** in Worbladen. Die Besucher konnten dort eine Wärmepumpe im Betrieb sehen und erhielten neutrale Informationen. Die erste öffentliche Wärmepumpenausstellung, die sogenannte **“Wärmepumpen-Expo”**, wurde durch Franz Beyeler organisiert und öffnete ihre Tore im November 1996 [Beyeler 2007].

Heute ist die Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz für alle an der Wärmepumpentechnik interessierten Personen ein ausgezeichnetes, **neutrales Informationszentrum**. Sie stellt eine wertvolle Dokumentation zur Verfügung. Die Dokumente können in Deutsch, Französisch und Italienisch bequem von der Internetseite der FWS www.fws.ch heruntergeladen werden. Eine Übersicht über den aktuellen Stand der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz findet man in [Peterhans und Rognon 2005].

⁵⁹ In der Schweiz wurde **Minergie** zu einem Synonym für die Nachhaltigkeit neuer und sanierter Gebäude. Das Konzept wurde durch Rudolf Kriesi begründet. Der Standard Minergie ist ein in der Schweiz und im Ausland registriertes Markenzeichen. Das Ziel von Minergie ist die Förderung der Anwendung von Konstruktionsstrategien und Techniken, welche es auf kostengünstige Art und Weise erlauben, die Abhängigkeit von nicht erneuerbaren Energien zu reduzieren. Der Minergie-Standard verfolgt aber noch weitere Ziele wie gesunde Raumluft, hoher thermischer Komfort in allen Jahreszeiten und Lärmschutz. Die Erfahrung von neuen Bauten zeigt, dass die Mehrkosten gegenüber einem herkömmlichen Gebäude weniger als 1 % betragen. Sie sind durch die geringeren Heizkosten in wenigen Jahren amortisierbar. Der Minergie-Standard ist in der Schweiz bereits sehr weit verbreitet und allgemein anerkannt. So gewähren viele Banken für Gebäude mit dem Minergie-Markenzeichen günstigere Finanzierungsbedingungen. Minergie hat bei entsprechender Verbreitung das Potenzial, die durch die Raumheizung verursachten CO₂-Emissionen zu halbieren. Weitere Informationen in www.minergie.ch.

⁶⁰ Verband der Schweizerischen Elektrizitätswerke VSE, www.vse.ch.

⁶¹ „Verband der Schweizer Heizungs- und Lüftungsfirmer VSHL“ und „Verband der Schweizerischen Spenglermeister- und Installateure SSIV; später zur „suissetec“ (Schweizerisch-Liechtensteinischer Gebäudetechnikverband) vereint, www.suissetec.ch.

⁶² INFEL Informationsstelle für Elektrizitätsanwendung, Zürich.

8.2.5 Qualitätssicherung

WÄRMEPUMPEN TEST- UND AUSBILDUNGSZENTRUM - EINE PIONIERINSTITUTION

Auf dem Weg von den Prototypen der Pioniere zu verlässlichen Produkten ist eine strikte Qualitätskontrolle unumgänglich. Es gab dazu einen offensichtlichen Bedarf, der durch die Elektrizitätswerke, politische Akteure und zukunftsorientierte Hersteller unterstützt wurde. Zahlreiche Hersteller und Lieferanten leisteten allerdings auch erheblichen Widerstand gegen die Einführung einer Qualitätskontrolle. Gabriella Brugger hat das Eis gebrochen. Sie stand an der Gründungsversammlung des unabhängigen **Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum (WPZ) in Winterthur-Töss** als Juristin etwa 100 Technikern und Ingenieuren gegenüber. Viele Hersteller und Lieferanten waren immer noch sehr skeptisch: „Und was geschieht, wenn niemand zum Testen kommt?“ Aber dank dem grossen Engagement und der Führungskraft von Karl-Heinz Handl⁶³, Brugger und der ausgezeichneten Zusammenarbeit zwischen den Elektrizitätswerken NOK (Handl), EKZ⁶⁴ (Georgio Lehner) sowie EWZ⁶⁵, dem Kanton Zürich und nicht zuletzt dem Bundesamt für Energiewirtschaft wurde das Testzentrum schliesslich realisiert. Die NOK und das EKZ waren für den Betrieb des Zentrums verantwortlich, und das Bundesamt für Energiewirtschaft übernahm den Hauptanteil der Betriebskosten. Max Ehrbar vom Neutechnikum Buchs (NTB), der das Testzentrum konzipiert hatte, wurde als technischer Experte engagiert. Später wurde das Wärmepumpentestzentrum auch durch den Energieforschungsfonds der Elektrizitätsindustrie PSEL⁶⁶ und dann durch die AXPO⁶⁷ mitfinanziert. Mit diesem Wärmepumpentestzentrum hat die Schweiz erneut **europäische Pionierarbeit** geleistet. Die offizielle Einweihung erfolgte am 26. Januar 1993. Die ersten Tests wurden noch gegen Ende 1993 gestartet. Der Test von Luft/Wasser-, Wasser/Wasser- und Sole/Wasser-Wärmepumpe erfolgte nach der Europäischen Norm EN 255. Für Umgebungsluft als Wärmequelle wurde ein vollständiger Abtauzyklus in den Test integriert. Die Hersteller mussten nur rund 30% der anfallenden Kosten übernehmen [Handl 1993], [Ochsner 1993], [Mariani 2007], [Schärer 2007].

1996 wurden die Prüfungen auf Luft/Luft-Wärmepumpen ausgedehnt. Um Schlaumeiereien vorzubeugen, wurde die wärmesenkenseitige Differenz zwischen Vorlauf- und Rücklauftemperatur als Zusatz zur EN 255 auf einen Maximalwert von 10 K reduziert. Dieses Problem wurde auch im Ausland erkannt. Die neue Europäische Prüfnorm EN 14511, welche die EN 255 ersetzte, ist mit einer Beschränkung auf maximal 5 K noch strenger.

Seit 1998 wird die elektrische Sicherheitsprüfung nach der Europäischen Prüfnorm EN 60 335-2-240 ebenfalls am Wärmepumpentestzentrum durchgeführt. 2003 wurde das Wärmepumpentestzentrum von Winterthur-Töss an die Fachhochschule **Buchs** (vormals Neutechnikum Buchs NTB) gezügelt. Dort wird die Wärmepumpenprüfung nach EN 14511 seit 2004 für Heizleistungen **bis 60 kW** fortgesetzt. Zusätzlich wurde die Prüfung von Wärmepumpenboilern nach der EN 255-3 eingeführt. Neben der konventionellen Leistungszahl werden die Testergebnisse an Sole/Wasser- und an Wasser/Wasser-Wärmepumpen neu auch mit einer modifizierten Leistungszahl, der sogenannten „**Standard-Energiekennzahl SEKZ**“, angegeben. Diese trägt im Gegensatz zur konventionellen Leistungszahl (COP) dem Energiebedarf für die Energiequellen-Umwälzpumpe durch einen für die beiden Fälle standardisierten Ansatz Rechnung [Nani 2005].

⁶³ Karl-Heinz Handl war zu jener Zeit Vizedirektor der Nordostschweizerischen Kraftwerke (NOK, www.nok.ch). Das Testzentrum wurde in einer Unterstation der NOK in Winterthur-Töss aufgebaut,

⁶⁴ EKZ Elektrizitätswerke des Kantons Zürich, www.ekz.ch.

⁶⁵ EWZ Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (Zürich City electric utility), www.stadt-zuerich.ch/internet/ewz/home.html.

⁶⁶ Projekt und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft PSEL.

⁶⁷ Die AXPO Holding ist ein führendes Schweizer Energieunternehmen mit Sitz in Baden, www.axpo.ch.

Der Erfolg des Wärmepumpentestzentrums lässt sich aus der Anzahl der bis November 2007 geprüften Wärmepumpen erkennen: Luft/Wasser 118, Sole/Wasser 200, Wasser/Wasser 122, Wärmepumpenboiler 7. Seit Beginn der Prüfungen werden die Resultate in regelmässig erscheinenden **Bulletins** veröffentlicht. Heute können sie von www.wpz.ch heruntergeladen werden.

DACH-GÜTESIEGEL FÜR WÄRMEPUMPEN

Um den Konsumenten die Wahl einer effizienten Wärmepumpe hoher Qualität mit gesichertem Unterhalt nach der Inbetriebnahme zu erleichtern, wurde 1998 von Deutschland (D), Österreich (A) und der Schweiz (CH) das **DACH-Gütesiegel** eingeführt. Es wurde 1999 erstmals vergeben und ist heute wohl das renommierteste Gütesiegel in Europa. Momentan laufen die Verhandlungen mit dem Europäischen Wärmepumpenverband EHPA (European Heat Pump Association, <http://ehpa.fiz-karlsruhe.de>) um das DACH-Gütesiegel in ein europäisches Gütesiegel überzuführen.

Für die Erteilung des DACH-Gütesiegels müssen die folgenden **Anforderungen** erfüllt sein:

- Bei Wärmepumpen bis zu einer Heizleistung von 60 kW müssen wenigstens 20 Einheiten pro Jahr hergestellt werden (keine Prototypen).
- Minimale Effizienzanforderungen auf der Basis von Messungen nach der Europäischen Prüfnorm EN 14511: Tabelle 8-2.
- Bestehen der Sicherheitsprüfungen für das Europäische Sicherheitskennzeichen CE und gemäss den Schweizer SEV-Normen.
- Elektrische Anschlüsse gemäss den Anforderungen der Elektrizitätswerke.
- Erfüllen der Anforderungen an die Dokumentation für Planung und Installation.
- Serviceorganisation muss verfügbar sein.
- Zwei Jahre Vollgarantie und zehn Jahre garantierte Ersatzteilverfügbarkeit.

Tabelle 8-2 Momentane Minimalanforderungen des DACH-Gütesiegels an die Leistungszahl

Wärmepumpentyp	Wärmequellentemperatur	Minimale Leistungszahl (COP) bei einer Wärmesenktemperatur von 35 °C
Sole/Wasser	Sole = 0 °C	4
Luft/Wasser	Luft = 2°C	3
Wasser/Wasser	Wasser = 10 °C	4.5
Direktverdampfung	Erdboden = 4 °C	4

Das DACH-Gütesiegel ist nur für drei Jahre gültig. Nach Ablauf dieser Frist ist ein neues Gesuch einzureichen. Das Gütesiegelkomitee⁶⁸ der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz ist für die Gütesiegelerteilung in der Schweiz zuständig. Weitere Einzelheiten in www.fws.ch.

DACH-GÜTESIEGEL FÜR ERDWÄRMESONDEN

Im Gegensatz zum DACH-Gütesiegel für Wärmepumpen wird beim DACH-Gütesiegel für Erdwärmesonden die ausführende Bohrfirma beurteilt. Entsprechend wird es nur an geprüfte Bohrfirmen vergeben. Nach Ausbildungskursen wird die Ausführung im Feld periodisch geprüft und das Bohrpersoneal muss alljährliche Kurse besuchen. Ein wichtiges Ziel ist die Verhinderung jeder Art von Grundwasserverschmutzung. 2001 wurden in der Schweiz die ersten

⁶⁸ Vorsitzender der Schweizerischen Gütesiegelkommission war bis 2002 Peter Suter, und ab dann Max Ehrbar.

DACH-Gütesiegel für Erdwärmesonden an die Firmen Frutiger, Hastag, KWT und Geotherm vergeben. Die exakten Anforderungen zur Erteilung des Gütesiegels findet man in www.fws.ch.

FELDANALYSE GANZER WÄRMEPUMPENSYSTEME FAWA

Eine hocheffiziente Wärmepumpe ist eine Sache – ein hocheffizientes vollständiges Wärmepumpensystem eine andere. Selbst wenn die bestverfügbaren Wärmepumpen eingesetzt werden, kann von der Wärmequelle bis zur Wärmeverteilung in die einzelnen Räume vieles schief gehen. Aus dieser Erkenntnis beschloss das Bundesamt für Energiewirtschaft 1995 auf die Initiative von Fabrice Rognon eine umfassende **systematische Feldanalyse ausgeführter Wärmepumpensysteme** durchführen zu lassen. Ziele des Vorhabens **FAWA** (Feldanalyse Wärmepumpen) war die Aufdeckung von Systemschwächen und die Ermittlung der besten Wärmepumpensysteme. Von 1996 bis 2003 wurden unter der Leitung von Peter Hubacher total 236 Wärmepumpensysteme im **Heizleistungsbereich bis 20 kW** ausgemessen. Unter diesen waren grob 45% Luft/Wasser-, 45% Sole/Wasser- und der Rest (als Kontrollbeispiele) Wasser/Wasser- sowie Grundwasser/Wasser-Systeme. 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 liegen deutlich über den Mittelwerten aller gemessenen Anlagen. Dabei waren diese „Meisteranlagen“ keineswegs exotische, sondern einfach streng nach den heute 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 Kältemittel** besitzt [Nani et. al 2005].

AUSBILDUNG DER INSTALLATEURE

Ab Beginn war die Ausbildung der Installateure für die Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz ein wichtiger Pfeiler der Qualitätssicherung. Hansueli Bruderer war der erste Leiter des Ausbildungsbereichs der FWS. Seit 2006 wird ein regelmässig stattfindender Dreitagesausbildungskurs angeboten. Die erfolgreichen Absolventen erhalten ein Zertifikat (www.fws.ch).

WÄRMEPUMPENDOKTOR

Die Mitglieder der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz haben mit dem „**Wärmepumpendoktor**“ noch einen vierten Pfeiler der Qualitätssicherung für Wärmepumpenanlagen. Dieser kann angerufen werden, wenn sich zwischen den Installateuren und den Endkunden Uneinigkeiten ergeben sollten. Ein erster Augenschein des Wärmepumpendoktors ist für den Kunden gratis. Er führt normalerweise zu einer gütlichen Einigung. Glücklicherweise sind solche Probleme aber selten – zum Einsatz des Wärmepumpendoktors kommt es nur in 0.25% der installierten Anlagen. Die ersten Wärmepumpendoktoren waren Georgio Lehner von den Elektrizitätswerken des Kantons Zürich EKZ und Gyula Szokody von Hoval Herzog [Mariani 2007], [Szokody 2007].

8.2.6 Brüdenkompression

In der Schweiz erfolgt die gesamte Kochsalz- und Zuckerproduktion in Brüdenkompressionsanlagen. Die Mehrstufenkompressoren aus den Anfangszeiten wurden durch einstufige Radialkompressoren mit hohen Tangentialgeschwindigkeiten ersetzt⁶⁹. Die Anlagen werden vollautomatisch betrieben [Hoyer 2007]. Eindampfanlagen des Systems **Escher Wyss** werden seit mehr als 80 Jahren gebaut. Diese Prozesstechnologie wurde weltweit in der Kochsalz- und Zuckerproduktion, in der chemischen Grundstoffindustrie, in der Behandlung hochbelasteter Abwässer usw. eingesetzt. Die Anlagen wurden unter den folgenden Firmennamen ausgelegt und gebaut: 1924 – 1981 Escher Wyss; 1981 – 1991 Sulzer - Escher Wyss; 1992 – 1996 Sulzer Chemtech; 1996 – 1999 CT Environment ; 1999 – 2000 VA TECH WABAG; 2001 – 2004 Messo und ab 2004 GEA Messo (www.geamesso.com). Die Escher-Wyss-Technologie wird aber auch durch die Schweizer Firma EVATHERM in Othmarsingen⁷⁰ weitergeführt.

8.3 Internationale Meilensteine der Wärmepumpenheizung

Seit 1990 begann in Europa das **definitive “Abheben”** der Wärmepumpenheizungstechnik. Die Gründe waren im Wesentlichen dieselben wie die bei der Schweiz bereits beschrieben. Einige Länder wie Deutschland, in denen die Elektrizität zu einem grossen Anteil aus Kohle produziert wird, hatten es schwieriger, eine im Vergleich zur Kesselheizung deutliche Reduktion der CO₂-Produktion zu erreichen. Das Qualitätsproblem der Vorperiode wurde erkannt und als Konsequenz wurde grösseres Gewicht auf die **Qualitätssicherung** gelegt.

Erdgekoppelte Wärmepumpen wurden populärer. Diverse Personal-Computer-Programme für eine genauere Auslegung von einfachen Erdwärmesonden und Erdwärmesondenfeldern wurden verfügbar, darunter das weit verbreitete EED (Earth Energy Designer) [Hellström und Sanner 2000]. Eine ausgezeichnete Übersicht von führenden Wissenschaftlern [Lund et al. 2003] erwähnt eine weltweit installierte Heizleistung von 9'500 MW, welche durch rund 800'000 Wärmepumpenanlagen produziert werden. Als in der Nutzung des Erdreichs als Wärmequelle für Wärmepumpen führend werden Österreich, Kanada, Deutschland, Schweden, die Schweiz und die U.S.A. aufgeführt.

In Europa wurden **natürliche Kältemittel** schon früh gefördert. Die ersten Wärmepumpen mit **Propan** erschienen 1993. Innerhalb des IEA-Wärmepumpenprogramms wurden Richtlinien für die Verwendung natürlicher Kältemittel aufgestellt [Stene J. 1998], [IEA-HPC 1999], [Schieflbein 1999]. Neulich wurde in Europa mit dem Projekt **SHERHPA** (Sustainable Heat and Energy Research for Heat Pump Applications) ein neuer Anlauf für die Verwendung natürlicher Kältemittel unternommen. Dieses Projekt der Europäischen Union richtet sich an kleine und mittlere Unternehmen. Es umfasst die Entwicklung, die Herstellung und das Testen effizienter und kostengünstiger Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln. Es steht im Einklang mit der künftigen Umweltgesetzgebung Europas. Das Vorhaben wird durch die beiden unabhängigen Verbände **Greth** (Heat Equipment Association) und **EHPA** (European Heat Pump Association) koordiniert. Die Kerngruppe setzt sich aus 18 KMUs aus 11 Ländern zusammen. Die Forschungs- und Entwicklungsaufgaben werden von 9 europäischen Kompetenzzentren übernommen. Natürliche Kältemittel haben gegenüber den synthetischen Kältemitteln unterschiedliche thermodynamische und chemische Eigenschaften. Dies erfordert Neukonstruktionen oder zumindest Anpassungen der Hauptkomponenten wie Wärmeübertrager und Kompressoren. Gleichzeitig sind angepasste Regelungsstrategien zu entwickeln. Weitere Herausforderungen

⁶⁹ Die Tangentialgeschwindigkeiten der Rotoren reichen heute bis 500 m/s, und die Rotoren werden aus Titan gefertigt.

⁷⁰ EVATHERM AG, CH-5504 Othmarsingen (www.evatherm.com); Geschäftsleiter ist der frühere Berechnungsleiter von Escher Wyss [Hoyer 2007].

sind Materialkompatibilität und die Minimierung des Kältemittelinhalts. Nach ersten Untersuchungen werden in der nächsten Projektphase 10 Prototyp-Systeme mit Heizleistungen von 2 bis 100 kW ausgelegt, gebaut und getestet [Thonon 2006].

DEUTSCHLAND

In Deutschland übernimmt der **TÜV** (Technischer Überwachungs-Verein) die offizielle Wärmepumpenprüfung und ist auch verantwortlich für die Gewährung des DACH-Gütesiegels. Seit 1997 wird das Auslegungs-Know-how im Bereich **erdgekoppelter Wärmepumpenanlagen** in konzentrierter Form als **VDI-Richtlinie 4640**⁷¹ herausgegeben. An der Erarbeitung dieser VDI-Richtlinie haben auch Österreich und die Schweiz mitgearbeitet.

1993 hat Stiebel Eltron ihre erste **Propan-Wärmepumpe** vorgestellt und berichtete einige Jahre später über die damit erworbenen Markterfahrungen [Schiefelbein 1999]. Für **Niedrigenergiehäuser** mit kontrollierter Lüftung hat die Firma eine bemerkenswerte Wärmepumpe mit integrierter Wärmerückgewinnung und Warmwasserbereitung auf den Markt gebracht. Sie ist auch mit zusätzlicher Solarwärmenutzung erhältlich. 2006 baute Stiebel Eltron in Holzminden **Europas grösste Wärmepumpenfabrik**.

Die ersten **Wärmepumpenwäschetrockner** (Wärmepumpentumbler) wurden 1997 getestet und 1998 auf den Markt gebracht [AEG 1988]. Bitzer fertigt seit 2003 ebenfalls hermetische Scrollkompressoren [Frommann 2004].

Infolge fehlenden Interesses der potenziellen Schweizer Hersteller verkaufte der **Diffusions-Absorptionswärmepumpen**-Pionier, Hans Stierlin, seine Erfindung ins Ausland. Weitere Versuche wurden bei **Buderus** in Deutschland bereits 1994 durchgeführt. 1997 wurde der Zusammenarbeitsvertrag zwischen Stierlins Kleinstfirma Creatherm und Buderus unterzeichnet. Das Diffusions-Absorptionswärmepumpen-Projekt hat Buderus in seiner holländischen Tochterfirma **Nefit Fasto** fortgesetzt. 1999 wurden umfangreiche Feldtests mit einem Zusatzkessel für die Spitzendeckung – dem „AWP-Kessel“, wovon die Schweizer Forscher 1995 träumten – durchgeführt. Die Versuche fielen sehr befriedigend aus. Die im Abschnitt 8.2.1 bereits erörterten alten Ergebnisse wurden bestätigt: Heizleistung eines Moduls 3.6 kW, Nutzungsgrad 150% im Alleinbetrieb und 132% beim Betrieb als AWP-Kessel [Blom 2000], [Laue und Heidelberg 2000]. Im Jahr 2000 wurde dem nun als „**Buderus Loganova**“ bezeichneten Prototypen eine Auszeichnung der deutschen Gasindustrie zugesprochen. Es gab viel Publizität um den bevorstehenden Marktauftritt der Buderus Loganova. Sie ist im Markt aber noch immer nicht erhältlich. Das Hauptproblem liegt wohl in der Massenproduktion der komplizierten Rohr-in-Rohr-Anordnung gemäss dem Bild 8-14.

Die Idee eines Betriebes von **Erdwärmesonden mit CO₂ als Arbeitsmittel** entstand im europäischen Projekt COHEPS. Die CO₂-Wärmerohrlösung (heat pipe) wurde 1988 durch das Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen FKW in Hannover patentiert. Um Korrosionsprobleme zu meistern, wird gegenwärtig ein flexibles Stahlrohrsystem aus nichtrostendem Stahl untersucht [Kruse et al. 2008].

ÖSTERREICH

Wie bereits beschrieben, gehen in den U.S.A. erste Versuche mit **Direktexpansions-Erdkollektoren** auf das Jahr 1945 zurück. Direktexpansionssysteme weisen Vorteile (keine Wärmeträgerumwälzpumpe, guter Wärmeübergang bei der Verdampfung) aber auch Nachteile

⁷¹ VDI-Richtlinie 4640 - Thermische Nutzung des Untergrundes; Blatt 1: Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte, Dezember 2000; Blatt 2: Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, September 2001; Blatt 3: Unterirdische Thermische Energiespeicher, Juni 2001; Blatt 4: Direkte Nutzung, September 2004; www.vdi.de/vdi/organisation/schnellauswahl/fgkf/get/richtlinien/.

le (Ölrückführung bei vertikalen Systemen, Gefahr des Mitreissens von Flüssigkeit, Kältemittelfüllung sollte bereits beim Wärmepumpenhersteller erfolgen) auf. Sie wurden in der Schweiz aus ökologischen Gründen nie erlaubt (siehe Abschnitt 8.2.3). In Österreich sind sie aber sehr erfolgreich, und es gibt ein offizielles Testinstitut für Systeme mit Direktexpansion in Wien⁷². Direktexpansionssysteme erreichten 1996 in Österreich einen Anteil von 66% [Halozan 1997].

2001 hat Karl Mittermayr **Erdwärmesonden mit verdampfendem CO₂** für praktische Anwendungen zum Funktionieren gebracht. Zu den offensichtlichen Vorteilen (keine Umweltprobleme und wenn ölfrei, keine Zirkulationspumpe (Thermosyphon), hoher Wärmeübergangskoeffizient, stärkste Verdampfung an Stellen mit höchster Temperatur) gesellen sich auch erhebliche Nachteile (hoher Druck → teure Kupferrohre mit Kunststoff-Korrosionsschutz oder flexible nichtrostende Stahlrohre, maximale Tiefe von ca. 75 m, keine passive Sommerkühlung ohne Zirkulationspumpe, sehr hohe Dichtigkeitsanforderungen). Bis 2007 wurden bereits etwa 500 CO₂-Sonden installiert [Ehrbar et al. 2004], [Rieberer et al. 2005], [Wenzel 2007]. Diese Erdwärmesondenvariante wird durch die VDI-Richtlinien 4640 nicht abgedeckt.

SKANDINAVIEN (NORWEGEN, SCHWEDEN, DÄNEMARK, FINNLAND)

Besonders in **Schweden** führte eine starke Abneigung gegen Kernkraftwerke zu Initiativen zur Reduktion des Energiebedarfs. Wärmepumpen wurden als eine sehr interessante **Alternative zu elektrischen Widerstandsheizungen** erkannt, da sie den Bedarf an elektrischer Energie um Faktoren reduzieren. Am Institut für Technologie der Universität Lund wurde die von Per Eskilson begonnene Modellierung von **Erdwärmesonden** durch Göran Hellström zu einer wegweisenden, thermischen Analyse von **Erdwärmespeichersystemen** erweitert [Hellström 1991].

Das Qualitätsgütesiegel **P-mark** in Schweden und der nordische **Schwan** als Ökogütesiegel wurden bis heute beibehalten [Forsén 2005]. Wie mit der beschriebenen Heizkörperwärmepumpe in der Schweiz gab es auch in Schweden eine **Einzelraumwärmepumpenentwicklung** durch Eufor von Härnösand. Es handelte sich um ein erdgekoppeltes Direktexpansionssystem mit einer hohen Jahresarbeitszahl [Falén 1995].

Die **dänische** Firma **Sabroe** führte 1990 **Hochtemperaturkompressoren für Ammoniak** ein. Dies ermöglichte eine Steigerung der Wärmesenktemperatur auf über 70 °C. Auch in der Schweiz wurden zahlreiche Sportzentren mit künstlichen Eisbahnen und Hallenschwimmbäder wie auch Wohngebäude mit diesem Kompressor ausgerüstet [Reiner 2007]. 1997 kaufte Sabroe die Kälteabteilung von **ABB** (früher BBC) [Kunis et al. 2004].

Auch in **Norwegen** gab es einen Versuch zum Bau einer **kleinen Wärmepumpe mit Ammoniak** als Kältemittel [Jonassen und Stene 1997]. In Norwegen und Schweden wurden zahlreiche **grosse Wärmepumpensysteme** gebaut. Die dabei aus der Schweiz stammenden Anlagen wurden im Abschnitt 8.2.1 bereits beschrieben. Der Grund für den Bau der grossen Anlagen liegt in den bereits existierenden grossen Fernheiznetzwerken, dem tiefen Elektrizitätspreis und in manchen Fällen auch in der leichten Verfügbarkeit des Meeres als Wärmequelle.

U.S.A. UND KANADA

In den U.S.A. hielt die Zunahme der auf dem Dampfkompansionsprinzip beruhenden **Wärmepumpen und Klimatisierungseinheiten** an. 1999 gab es in den U.S.A. einen einzigen Hersteller kleinerer Wärmepumpen und Klimatisierungsanlagen nach dem Absorptionsprinzip. Es gab aber weltweite Anstrengungen zur Entwicklung der **Absorptionswärmepumpen** [Radermacher et al. 1994], [Ab-Sorption 1996]. Absorptionswärmepumpen konnten sich aber für

⁷² Österreichisches Forschungs- und Prüfzentrum Arsenal, A-1210 Wien;
www.arsenal.ac.at/org/org_contacts_de.html.

die Raumheizung und die Warmwasserbereitung gegenüber den kostengünstigeren und effizienteren Dampfkomppressionswärmepumpen bis heute nicht richtig durchsetzen. Die verfügbaren Absorptionswärmepumpen sind Einfach-Effekt Ammoniak-Wasser-Aggregate mit einem Nutzungsgrad um 150%. Versuchsanlagen mit dem komplizierteren GAX-Kreislauf (**G**enerator-**A**bsorber heat **e**xchanger) erreichten deutlich höhere Werte [Burget 1999]. 1990 unterstützte Ontario Hydro ein Programm zur Installation erdgekoppelter Wärmepumpen in Wohngebieten ohne Erdgasanschluss (www.centreforenergy.com).

CHINA

2005 wurden in China Prototypanlagen zur Nutzung von **Rohabwasser** als Wärmequelle für die Heizung im Winter und als Wärmesenke für die Sommerkühlung installiert. Sie wurden in einem Hotel und einem Einkaufszentrum in Harbin mit Erfolg getestet. Harbin ist eine im Winter sehr kalte Stadt in der Provinz Heilongjiang in Nordostchina [Fangchao 2005].

BRÜDENKOMPRESSION

Heute beträgt die **Weltkochsalzproduktion** 2'300'000 Tonnen pro Jahr. Der Anteil an Brüdenkompressionsanlagen nimmt stetig zu. Die europäischen Hersteller von Brüdenkompressionsanlagen wurden im Abschnitt 8.2.6 erwähnt. Beizufügen ist noch die Firma HPD in den U.S.A.

9 SONDERPRINZIPIEN

ADSORPTION

Den Adsorptionsaggregaten wurden viele Forschungsarbeiten gewidmet. Es wurden aber nur wenige Anwendungen im solarthermischen Bereich praktisch realisiert. Amundsen hat 1930 einen Haushalt-Adsorptionskühlschrank mit Aktivkohle / Methylalkohol gebaut . Ab 1950 wurden für die Adsorptionskühlung neue chemische Verbindungen wie Silicagel (ergab nur mässige Resultate) und Zeolithe („Molekularsiebe“, ergab bessere Resultate). Heute ist eine gewisse Wiederbelebung der Adsorptionskühlung mit solarthermischem Betrieb zu beobachten. Adsorptionswärmepumpen zu Heizzwecken konnten sich nicht durchsetzen [Nagengast et al. 2006], [Thevenot 1979].

THERMOELEKTRISCHER EFFEKT

Eine **thermoelektrische Kühlung** tritt auf, wenn ein elektrischer Strom durch zwei ungleiche Metalle oder Halbleiter (n-Typ oder p-Typ) fließt, welche miteinander an zwei Stellen verbunden sind (Peltier Verbindungen). Eine Verbindung kühlt sich ab, während die andere aufgeheizt wird. Der elektrische Strom bewirkt deshalb einen Wärmetransport von einer Verbindung zur anderen. Dieser Effekt wurde 1834 durch den Physiker Jean **Peltier** entdeckt. 1909 und 1912 publizierte Edmund Altenkirch zwei Artikel zur thermoelektrischen Kühlung. Das Phänomen blieb aber bis nach 1945 eine Laboratoriumskuriosität. 1949 konstruierte A.F. Loffe den ersten thermoelektrischen Kühlschrank. In den Jahren 1949/1950 gab die Verwendung von Halbleitern Anlass zu neuer Hoffnung, einen wesentlich stärkeren Effekt als mit reinen Metallen zu erreichen. In der Sowjetunion wurden mehrere thermoelektrische Haushaltskühlschränke gebaut. Aber die immer noch geringe Effizienz des thermoelektrischen Effekts liess auch nach 1960 nur einige sehr spezielle Anwendungen wie das thermoelektrische Kühlen in der Medizin oder in der Radioelektronik zu [Thevenot 1979], [Nagengast et al. 2006].

STIRLINGPROZESS

John Herschel soll 1834 als erster versucht haben, den **Stirlingprozess zum Kühlen** einzusetzen. Aus Beschreibungen in einer Publikation von Alexander Kirk im Jahr 1876 scheint es, dass das Prinzip der Kühlung mit dem Stirlingprozess in technischen Kreisen durchaus bekannt war. Aber erst sehr viel später, ab 1946, wurde der Stirlingprozess bei Philips unter der Leitung von J. W. L. Köhler für die Tieftemperaturanwendung zur Gasverflüssigung zur praktischen Reife entwickelt. 1957 waren nach dem Stirling-Prinzip arbeitende Maschinen in der Lage, Temperaturen bis hinunter zu 12 K zu erzeugen [Global Cooling 2004].

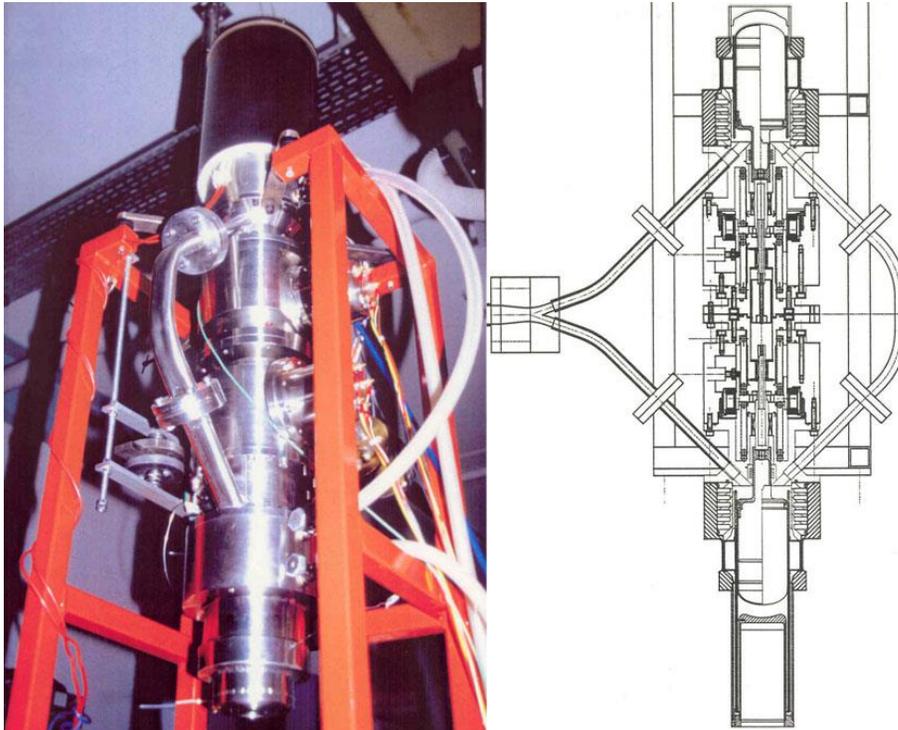


Bild 9-1 Vuilleumier Stirling-Wärmepumpe mit Resonanzgassäule [Budliger 1995]

Die Kombination einer Stirlingantriebsmaschine mit einer Stirlingwärmepumpe wird als **Vuilleumier-Wärmepumpe** bezeichnet. In der Schweiz begann Jean-Pierre Budliger mit der Entwicklung einer neuen Technologie für Vuilleumier-Wärmepumpen. Sie wurde aus der Doppel-Freikolben-Stirlingwärmepumpe von W. Beale abgeleitet. In seinem neuen Konzept ersetzte Budliger den schweren Arbeitskolben mit seiner problematischen Kolbendichtung durch eine in Resonanz **schwingende Gassäule**. Er führte intensive theoretische und experimentelle Studien zu seinem Konzept mit zwei Kolben und einem **Resonanzrohr** dazwischen aus: Bild 9-1. Den Nutzungsgrad dieser neuen Wärmepumpe hat er zu 150% berechnet. Auf der Grundlage seiner Studien baute Budliger mit Unterstützung des Bundesamts für Energiewirtschaft ein Funktionsmodell. Leider wurde die interessante Entwicklung nach ersten Tests aufgrund finanzieller Probleme abgebrochen. Das Funktionsmuster kam zwar noch in Betrieb; aber der prognostizierte Nutzungsgrad von 150% konnte nie experimentell verifiziert werden [Budliger 1987, 1993, 1995].

In den U.S.A. hat die Firma Sunpower von 1989 bis 1995 eine **Freikolben-Stirling-Kältemaschine** mit horizontal entgegengesetzt angeordneten Kolben (Boxer-Prinzip) entwickelt. Es wurde im Space Shuttle eingesetzt [Global Cooling 2004].

MAGNETOKALORISCHER EFFEKT

Wenn ein geeignetes Material in ein starkes Magnetfeld gebracht wird, werden die magnetischen Dipolmomente im Material nach dem Magnetfeld ausgerichtet. Dies produziert eine Re-

duktion der magnetischen Entropie. Damit die Gesamtentropie konstant bleibt, entsteht eine kompensierende Erwärmung des Materials. Wenn das sich immer noch im Magnetfeld befindliche Material anschliessend abgekühlt und dann aus dem Magnetfeld entfernt wird, kühlt es sich weiter ab und bewirkt dadurch einen Kühleffekt. Dieser **magnetokalorische Effekt** (MCE) wurde 1881 vom deutschen Physiker Emil Warburg entdeckt. Er brachte ein Stück reines Eisen in ein starkes Magnetfeld und entdeckte, dass sich seine Temperatur dabei leicht erhöhte. Der magnetokalorische Effekt variierte zwischen 0.5 und 2 K/T (T: Tesla). Wesentliche Fortschritte wurden erst in den späten 1920er Jahren erzielt, als die Kühlung durch adiabatische Entmagnetisierung unabhängig vom holländischen physikalischen Chemiker Peter Debye (1926) und vom amerikanischen Chemiker William F. Giauque (1927) vorgeschlagen wurde. Mit dem Erreichen einer Temperatur von 0.25 K haben Giauque (der 1949 mit dem Nobelpreis für Chemie ausgezeichnet wurde) und sein Kollege, D.P. MacDougall, den magnetokalorischen Effekt 1933 eindrücklich demonstriert.

In den U.S.A. wurde 1929 zwar ein magnetokalorischer Kühlschrank zum Funktionieren gebracht; die Entwickler fanden aber, dass noch weitere Untersuchungen nötig seien [Barclay 1978]. Zwischen 1933 und 1997 wurden in der Anwendung der magnetokalorischen Kühlung eine Reihe von Fortschritten erzielt. 1997 wurde der erste "Giganteneffekt" mit pseudobinären Gadolinium-Legierungen in Raumtemperaturnähe durch Karl A. Gschneidner Jr. und Vitalij. K. Pecharsky an der Iowa State University demonstriert. Dieses Ereignis spornte interessierte Wissenschaftler und Firmen aus aller Welt zur Entwicklung neuer Materialien und Kühlschrankkonstruktionen an. MCE-Laborkühlschränke wurden mit magnetischen Feldstärken von 0.6 T bis 10 T (1 Tesla entspricht etwa dem 20'000-fachen der Feldstärke des Erdmagnetfeldes) betrieben. Magnetfeldstärken über 2 T sind mit Permanentmagneten schwer zu erzeugen. Sie erfordern supraleitende Elektromagnete. Das wachsende Interesse an der magnetokalorischen Technik wird illustriert durch die Gründung der „Working Party on Magnetic Refrigeration“ des internationalen Instituts für Kältetechnik (www.mcwp.ch) und der Durchführung einer ersten internationalen Konferenz in der Schweiz im Jahr 2005 [Egolf et al. 2005], [Gschneidner et al. 2005].

Kürzlich haben Peter Egolf, Osman Sari, Andrej Kitanovski und ihre Assistenten an der Fachhochschule der Westschweiz in Yverdon-les-Bains eine neues, rotierendes, magnetokalorisches Prinzip zum Bau von Kühlaggregaten und Wärmepumpen entwickelt [Kitanovski et al. 2004], [Egolf et al. 2006]. In ihrem System werden die vier thermomagnetischen Prozessschritte (adiabatische Magnetisierung, isomagnetische Wärmeabfuhr, adiabatische Entmagnetisierung, isomagnetische Wärmezufuhr) in einfacher Weise kontinuierlich durchgeführt [Sari 2007], [Vuarnoz 2007]. Eine theoretische Machbarkeitsstudie für eine **magnetokalorische 8 kW Wärmepumpe** ergab für eine Wärmequelle von 0 °C und eine Wärmesenke von 30°C interessante Ergebnisse [Egolf 2007]. Da mit einem Kaskadenelement ein maximaler Temperaturhub von nur 8 K erreicht werden kann, wird ein Temperaturhub von 35 K realistischweise kaum überschritten. Das BFE-Forschungsprojekt wird mit dem Bau eines Funktionsmusters weitergeführt.

WIRBELROHR

Der Franzose Georges Ranque entdeckte 1933 den **Wirbelrohreffekt**. Sein Wirbelrohr wurde 1947 vom Deutschen Rudolf Hilsch verbessert. Beim tangentialen Eindüsen von Luft in ein zylindrisches Rohr entsteht eine rotierende Expansionsströmung, welche den Luftstrom in einen kalten und einen warmen Strom aufteilt. Dieses System ist von grosser Einfachheit – seine Effizienz ist aber äusserst gering. Für Wärmepumpenanwendungen kommt es deshalb nicht in Frage. Die Anwendung des Wirbelrohrs ist auf den Spezialfall beschränkt, bei dem auf einfache Weise ein kurzzeitiger Temperatursturz mit ohnehin zur Verfügung stehender Druckluft erzeugt wird [Thevenot 1979].

10 REFERENZEN

ABB 2008. *Web Imaging HDI800 – History*, www.abb.com.

Ab-Sorption 1996. Proceedings of the International Absorption Heat Pump Conference, Vol. 1-3, September 17-20, 1996, Montréal, Canada.

Adolph U. 2004. *Die Kältetechnik und das Energieproblem: die 1970er Jahre*, in [Dienel 2004], S.105-137.

AEG 1988. *Neuer Wäschetrockner mit Wärmepumpe*, Wärmepumpe, Bd.8, Nr.1, S.1.

AFB 1988. *Alternative Wärme aus der Limmat – ETH-Zürich, Wärmepumpe Walche FHK, Reaktivierung und Ausbau*, Broschüre, Amt für Bundesbauten, CH-3001 Bern.

Afjei Th., A. Bühring, M. Dürig, A. Huber, P. Keller, E. Shafai, P. Widmer, G. Zweifel 2000. *Kostengünstige Wärmepumpenheizung für Niedrigenergiehäuser: Technisches Handbuch - Grundlagen, Planungsvorgehen und Praxisbeispiele*, Schlussbericht Phase4, Bundesamt für Energie, Bern.

Afjei Th. 2002. *Heat pump heating systems for low energy houses in Switzerland*, preprints, 7th International Energy Agency Heat Pump Conference, Beijing, 19-22 May 2002, China Academy of Building Research, Vol. 2, pp.827-839.

Afjei Th., U. Schonhardt, C. Wemhöner, G. Zweifel, M. Achermann, R. von Euw, U. Stöckli, P. Renaud 2002. *Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen STASCH, Teil 2: Grundlagen und Computersimulationen*, Schlussbericht, ENET-Nr.220218, Bundesamt für Energie, Bern.

Afjei Th., C. Wemhöner 2003. *Seasonal performance calculation for residential heat pumps with combined space heating and hot water production (FHBB Method)*, Schlussbericht 230183, Bundesamt für Energie, Bern.

IEA HPP Annex 23 1999. *Heat Pump Systems for Single-Room Applications*, final report, IEA Heat Pump Centre.

Arnold L. 1993. *Wärme für die guten Stuben*, Haus-Tech, Nr.7-8, S.46-48.

American Society of Mechanical Engineers 1980. *The Equitable Building Heat Pump System - A National Historic Mechanical Engineering Landmark*, downloadable from www.asme.org/Communities/History/Landmarks.

Austmeyer K.E, M.Bruhns, A.Dickopp, F.Hoyer, K.Kleinhenz, R.Wimmerstedt, W.Wölk 1987. *Mechanische Brüdenkompression*, VDI-Gesellschaft Energietechnik VDI-GET, VDI-Verlag, Düsseldorf.

Austmeyer K.E, M.Bruhns, A.Dickopp, F.Hoyer, K.Kleinhenz, R.Wimmerstedt, W.Wölk 1993. *Mechanical Vapour Recompression*, VDI-Gesellschaft Energietechnik, VDI-Verlag, Düsseldorf.

AWP 2007. *Liste aller Publikationen* (List of all publications), www.jgp.ch/awp/listep.htm.

Baehr H.D. 2005. *Thermodynamik*, 12th ed., Springer Berlin/ New York / London/ Paris/ Tokyo.

Barclay J.A. 1978. *The Design and Performance of a Magnetic Refrigerator and Heat Engine*. Progress in Refrigeration Science and Technology, Proc. of the 15th Int. Congress of Refrigeration, Venise, Vol. 1.

Bauer B. 1944. *Das Wärmepump-Ergänzungswerk des Fernheizkraftwerkes (FHK) der ETH*, Schweizerische Bauzeitung, Bd.123, Nr.5, S. 52-55.

Baumann E., E. Züllig 1983. *Wärmepumpe im Mehrfamilienhaus - Betriebserfahrungen und Messresultate einer monovalenten WP-Heizanlage*, Schweizer Ingenieur und Architekt, Bd.101, Nr.43, S. 1021-1026.

- Baumann H. 2001. *Ölfreier CO₂-Kleinkompressor*, Schlussbericht, ENET-Nr.210125, Bundesamt für Energie, Bern.
- Baumann H., M. Conzett 2002. *Small Oilfree Piston Type Compressor for CO₂*, proceedings of the 2002 International Compressor Engineering Conference, Purdue University, West Lafayette, Indiana, U.S.A.
- Baumann M., H.-J. Laue, P. Müller 2007. *Informationspaket Wärmepumpe – Heizen mit Umweltwärme*, 4th ed., BINE Informationsdienst, FIZ Karlsruhe.
- Baumgartner Th., R. Gabathuler, H. Mayer, G. Szokody 1993. *Wärmepumpen – Planung, Bau und Betrieb von Elektrowärmepumpenanlagen*, Bundesamt für Konjunkturfürfragen, Eidgenössische Drucksachen- und Materialzentrale, CH-3000 Bern, Nr.724.356.
- Beck R. 2007. Private Mitteilung, Rolf Beck, CH-3125 Toffen.
- Beerhalter M. 2007. Private Mitteilung, Manfred Beerhalter, Leiter Forschung und Entwicklung, Danfoss Steinmann Wärmepumpen, CH-3038 Kirchlintach.
- Bundesamt für Energiewirtschaft BEW / Delta Energie 1983. *Das Potenzial von Wärmepumpen-Heizungen im Falle eines Erdöl-Lieferstopps*, Bundesarchiv Bern.
- Bertsch S., M. Ehrbar, P. Hubacher 2002. *Verbesserung des Abtauens bei luftbeaufschlagten Verdampfern, Phase 2: Bewertung der Abtauprozesse*, Schlussbericht, ENET-Nr.220187, Bundesamt für Energie, Bern.
- Beyeler F. 2007. Private Mitteilung, Franz Beyeler, MKR Consulting, CH-3006 Bern, www.mkr.ch.
- Bianchi M., E. Shafai, H. Gabathuler 2005. *Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen, Phase 4: Erweiterung der PBM-Regler für Kombianlagen*, Schlussbericht 250108, Bundesamt für Energie, Bern.
- Bitterli J. 1986. *Verbrennungsmotor-Wärmepumpen: Anwendung in Heizzentralen*, Schweizer Ingenieur und Architekt, Bd.104, Nr.16, S. 372-373.
- Blattmann H. 1981. *Wärmepumpen: Unseriöse und unerfahrende Firmen gefährden das Energiesparen*, Tages-Anzeiger-Magazin, Nr.22, S.20-27.
- Blom J. 2000. *The Gas-Fired Residential Diffusion-Absorption Heat Pump*, IEA Heat Pump Centre Newsletter, Vol. 18, No.4, pp. 15-17.
- Borel L. 1980. *Economie énergétique et exergie*, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Institut de Thermodynamique.
- Borel L., J. J. Morf, L. Silberring, Ch. Strahm 1981. *Pompes à chaleur – Technologie, économie et possibilités d'application*, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Institut de Thermodynamique.
- Bosshart O. 2008. Private Mitteilungen und Originalplan von Escher Wyss, Otto Bosshart, AXIMA Kältetechnik, CH-8401 Winterthur.
- Boyman T., Th. Schmid, A. Flück 1997. *Kleinwärmepumpen mit Ammoniak - Phase 1: Vergleich von Ammoniak mit Propan, R407C und R22*, Schlussbericht, ENET-Nr.9719746/2, Bundesamt für Energie, Bern.
- Brand F., M. Zehnder, D. Favrat 2000. *Pompe à chaleur à haute température, Phase 1: Solution avec compresseur à injection vapeur*, Schlussbericht, ENET-Nr.9934445, Bundesamt für Energie, Bern.
- Brechbühl B., B. Dürr, P. Hubacher 1983. Planung und Einbau einer Gasmotor-Wärmepumpenanlage in der Oberstufenschulanlage Fuhr, Wädenswil, Schriftenreihe Enfog, Bd.120, Enfog, CH-9202 Gossau.
- Brugger G., H.-P. Eicher 1994. *Wir wollen zufriedene Wärmepumpen-Besitzer – Fördergemeinschaft Schweiz und Energie 2000*, Schweizer Ingenieur und Architekt, Bd.112, Nr.17, S. 294-295.

- Brügger P., R. Mosbacher, H. Ronner, B. Scherrer 1991. *Wie die Heizung Karriere machte – 150 Jahre Sulzer-Heizungstechnik*, Sulzer Infra, Winterthur.
- Brugnoli C. 2007. Private Mitteilungen, Carlo Brugnoli, CH-3125 Toffen.
- Brunner H. R., W. Hoppe, G. V. Lengyel-Konopi 1981. *Betrachtungen zur Entwicklung der energetischen Konzeption der Zuckerfabrik & Raffinerie Aarberg AG*, Zuckerindustrie, Bd.106, Nr.1, S. 42-47.
- Brunner H. R. 1992. *Neue kontinuierliche Verdampfungskristallisation mit Brüdenkompression in der Zuckerfabrik+Raffinerie Aarberg AG*, Zuckerindustrie, Bd.117, S. 443-468.
- Brunner H.R., K. Geckert, Th. Frankenfeld 1992. *Energietechnik und Wärmewirtschaft*, Zuckerindustrie, Bd.117, S. 454-458.
- Budliger J.-P. 1987. *New Concept for a Stirling Heat Pump System*, ASME-Paper 87-WA/AES-5, U.S.A.
- Budliger J.-P. 1993. *Stirling Heat Pump System with Resonance Tube*, proceedings of the 6th International Stirling Engine Conference (ISEC), Eindhoven.
- Budliger J.-P. 1995. *Stirling Technology for the Home*, IEA Heat Pump Centre Newsletter, Vol.13, No.4, pp.31-34; *Stirling Heat Pump with Resonance Tube - a Supercharged Vuilleumier Process*, 19th International Congress of Refrigeration 1995, proceedings, Vol. IVb, pp.1120-1127; *Progress Made on the Stirling Heat Pump with Resonance Tube - a Supercharged Vuilleumier Process*, 7th International Conference on Stirling Cycle Machines ICSC 95 (Tokyo), proceedings, pp. 465-470.
- Bula K., W. Bachofner 1979. *Wärmepumpen für Privathäuser*, Technische Rundschau Sulzer, Bd.61, Nr.3, S. 99-103.
- Bundesrat 1949. *Kreisschreiben des Bundesrates an sämtliche Kantonsregierungen betreffend die Wärmegewinnung aus Gewässern*, vom 18.Oktober 1949, Bundesarchiv Bern.
- Burckhardt Compression 2007. *World's most Powerful Single Frame Compressor Delivered*, Media Release in www.burckhardtcompression.com.
- Burget L.W., M.D. Byars, K. Schultz 1999. *Absorption Systems: The Future, more than a Niche?*, proceedings of the International Sorption Heat Pump Conference, Munich, pp.13-24.
- Cardwell D.S.L. 1971. *From Watt to Clausius: The Rise of Thermodynamics in the Early Industrial Age*. Heinemann, London.
- Carnot S., R.Clausius, R. Mayer 2003. *Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers - Über die bewegende Kraft der Wärme - Die Mechanik der Wärme -Abhandlungen zur Entstehung der Thermodynamik*, Reihe Ostwalds Klassiker, Bd.37, Harri Deutsch, Frankfurt am Main.
- Cashflo 2007. *The History of Some Compressor Types*, www.cashflo.co.uk.
- Cizmar J., E. Zahnd, D. Trüssel 2001. *Feldmessung einer Retrofit-Wärmepumpe*, Schlussbericht, ENET-Nr.210061, Bundesamt für Energie, Bern.
- Clausius R. 1865. *The Mechanical Theory of Heat – with its Applications to the Steam Engine and to Physical Properties of Bodies*, John van Voorst, London.
- Cleveland C., P. Saundry 2007. *Perkins, Jacob*, Encyclopedia of Earth, Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment, Washington, D.C.
- von Cube H.L., F. Steimle 1978. *Wärmepumpen – Grundlagen und Praxis*, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- von Cube H.L., F. Steimle, H. Lotz, J. Kunis (editor) 1997. *Lehrbuch der Kältetechnik*, Bd.1, 4. Auflage, C.F. Müller, Heidelberg.
- Deiss Ch. 2007. *Energiequelle zum Heizen und Kühlen - Grösste Abwasserenergiegenutzungsanlage in der Schweiz*, Gas-Wasser-Abwasser, Bd.87, Nr.6, S.413-420.

- Dieckmann J.T., A. J. Erickson, A. C. Harvey, W. M. Toscano 1979. *Research and Development of an Air-Cycle Heat-Pump Water Heater*, final report, DOE EERE Research Reports, Foster-Miller Associates, Inc., Massachusetts, U.S.A.
- Dienel H.-L., E. Prandner, M. Pühl (Hrsg.) 2004. *Der DKV und die Geschichte der deutschen Kälte- und Klimatechnik*, Alfons W. Gentner, Stuttgart.
- Dietler M. 2003. Abwärmenutzung aus bestehendem Schmutzwasserkanal in Binningen, Schlussbericht 240041, Bundesamt für Energie, Bern.
- Dubacher G. 2007. Private Mitteilungen, Georg Dubacher, Leiter Energiedienstleistungen, EWZ, CH-8050 Zürich.
- Dummer G., L. Schmidhammer 1991. *Grosstechnische Nutzung der Thermokompression bei der Destillation von 1,2-Dichlorethan*, Chem.-Ing.-Tech., Bd.63, No. 1, S. 75-76.
- Dürr B., P. Hubacher 1984. *Mehrfamilienhausanlage Oberuzwil MFH 17*, Schriftenreihe Enfog, Bd.121, Enfog, CH-9202 Gossau.
- Dürr B., P. Hubacher 1985. *Einfamilienhausanlage St.Gallenkappel*, Schriftenreihe Enfog, Bd.118, Enfog, CH-9202 Gossau.
- Dürr L. 1996. *Die Wärmepumpenheizung im Rathaus von Zürich*, Heizung und Lüftung, Bd.63, Nr.1, S.17-21.
- Eberhard F. 2007. Private Mitteilungen, Fredy Eberhard, Abteilungsleiter Service-Center Technik und Material, Stadt Zürich, CH-8050 Zürich.
- Egli M. 1938. *Die Wärmepumpenheizung des zürcherischen Rathauses*, Bulletin SEV/VSE, Bd.29, Nr.11, S.2-15.
- Egli M. 1940. *Die Wärmepumpen-Heizung des renovierten zürcherischen Rathauses*, Schweizerische Bauzeitung, Bd.116, Nr.6, S.59-64; Nr.7, S. 73-75.
- Egli M. 1943. *Das Projekt der Wärmepumpenanlage des neuen Kantonsspitals Zürich*, Elektrizitäts-Verwertung, Nr.7-9; redaktioneller Beitrag 1944 in Schweizerische Bauzeitung, Bd.123, S.163.
- Egli M. 1944. *Erfahrungen aus dem Betrieb der Wärmepumpen-Heizung im Rathaus von Zürich*, Schweizerische Bauzeitung, Bd.123, Nr.8, S.59-64; 73-75.
- Egolf P.W., O. Sari, A. Kitanovski, F. Gendre 2005 (ed.). *First International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature*, proceedings, Montreux, Switzerland.
- Egolf P.W., A. Kitanovski, O. Sari, A-C. Derrik, F. Gendre 2006. *Magnetic Refrigerator and/or Heat Pump using Magnetocaloric Fluid and Process for Magnetic Heating and/or Cooling with such a Refrigerator and/or Heat Pump*, Patent WO/2006/136041.
- Egolf P.W. 2007. *Studie über eine magnetische Wärmepumpe für ein Erdregister-Fussboden-Heizungssystem*, S. 47-53 in [Kopp und Rognon 2007].
- Ehrbar M., B. Hubacher 2001. *Dynamischer Wärmepumpentest; Validierung des Modellansatzes und Entwicklung einer Prüfprozedur; Phase 2*, Schlussbericht 210127, Bundesamt für Energie, Bern.
- Ehrbar M., S. Bassetti, E. Rohner, A. Peterlunge 2004. *Pumpenlose Erdwärmesonde, Phase 1: Potentialabklärung, Machbarkeitsstudie energetisch und wirtschaftlich*, Schlussbericht 240113, Bundesamt für Energie, Bern.
- Eskilson P. 1987. *Thermal analysis of heat extraction boreholes*, Doctoral Dissertation, University of Lund, Sweden.

- Etterlin A. 1985. *Energiezentrale Luzern – alternative Energieversorgung – Bauvorhaben SBB + PTT im Bahnhofgebiet Luzern*, SBB Kreisdirektion II, Luzern.
- Eulachhof 2006. www.eulachhof.ch; <http://daten.allreal.ch/presse/db/db-eulachhof.pdf>;
www.minergie.ch/download/Referat_Rolf_Mielebacher_04.12.2007.pdf;
www.solaragency.org/dokumente//M-07-09-21%20Eulachhof.pdf?PHPSESSID=b2288fb6f3e7e204f1d6823437e
- Falén P. 1995. *The Nordic Heat Pump Competition*, IEA Heat Pump Centre Newsletter, Vol. 13, Nr.3.
- Fangchao L. 2005. *Chinese team uses raw sewage to heat or cool buildings*, SciDev.Net,
www.scidev.net/content/news/eng/chinese-team-uses-raw-sewage-to-heat-or-cool-buildings.cfm.
- Fankhauser H.-R. 2007, Private Mitteilung, Hans-Rudolf Fankhauser, Zuckerfabrik, CH-8270 Aarberg.
- Favrat D. 1989. *Thermopompes et frigopompes: Filières technologiques et perspectives*, Conférence on "La couche d'ozone, sa sauvegarde et la santé", EPFL, Lausanne.
- Favrat D., A. Tastavi 1995. *Experience with 3.9MWth Ammonia Heat Pumps*, IEA Workshop on Compression Systems with Natural Working Fluids, Trondheim.
- Favrat D. 2007. Private Mitteilung; Daniel Favrat, Professor an der EPFL, Laboratoire d'énergétique industrielle, CH-1015 Lausanne.
- Fischer B. 2004. *Die Kältetechnik und der DKV 1909-1945*, in [Dienel 2004], S.11-56.
- Fluri P. 2007. Private Mitteilungen, Peter Fluri, Baudirektion Kanton Zürich, CH-8090 Zürich.
- Forsén M. 2005. *Heat Pumps Technology and Environmental Impact*, Swedish Heat Pump Association, SVEP. http://ec.europa.eu/environment/ecolabel/pdf/heat_pumps/hp_tech_env_impact_aug2005.pdf
- Friotherm 2003. *Unitop 50FY Type Heat Pump from Friotherm is Upgrading Untreated Sewage of 9.6°C to Heating Energy of 90°C in Oslo*, www.friotherm.com/downloads/skoyen_e11.pdf.
- Friotherm 2008. *History from Sulzer Brothers to Friotherm*, www.friotherm.com und private Mitteilungen, Andreas Rindisbacher, Friotherm, CH-8401 Winterthur.
- Frommann A. 2004. *Das Umweltproblem und die Suche nach neuen Geschäftsfeldern: die 1980er Jahre*, in [Dienel 2004], S.138-159.
- Frischknecht R. 1999. *Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel - Ökobilanzen von Wärmepumpen und Kälteanlagen*, Schlussbericht, ENET-Nr.9933303 Bundesamt für Energie, Bern.
- Frischknecht R. 2000. *Life Cycle Assessment for Commercial Refrigeration Systems Operated in Switzerland*, proceedings, Helsinki Symposium on Industrial Ecology and Material Flows, August 30 - September 3, 2000, University of Jyväskylä, Helsinki, Finland, pp.63-71.
- Gabathuler R., Ch. Gmür, E. Häuselmann, H. Mayer, E. Schadegg 1994. *Standardschaltungen - Praxiserprobte Schaltungen für Wärmepumpen, Wärmekraftkopplung, Wärmerückgewinnung und Abwärmennutzung*, Bundesamt für Konjunkturfragen, Eidgenössische Drucksachen- und Materialzentrale, CH-3000 Bern, Nr.724.359.
- Gabathuler R., Th. Baumgartner, R. Stebler 1996. *Projektbezogene Qualitätssicherung – Qualitätssicherungsmodell für Haustechnikprojekte*, Bundesamt für Konjunkturfragen, Eidgenössische Drucksachen- und Materialzentrale, CH-3000 Bern, Nr.724.353.
- Gabathuler H.R., H. Mayer, E. Shafai, R. Wimmer 1998. *Pulsweitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen, Phase I*, Schlussbericht, ENET-Nr.9723972/1, Bundesamt für Energie, Bern.
- Gabathuler H.R., H. Mayer, E. Shafai, R. Wimmer 2002a. *Pulsweitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen, Phase 2*, Schlussbericht, ENET-Nr.38848, Bundesamt für Energie, Bern.

- Gabathuler H.R., H. Mayer, Th. Afjei 2002b. *Standardschaltungen für Kleinwärme-pumpenanlagen STASCH, Teil 1: Planungshilfe*, Schlussbericht, ENET-Nr.220216, Bundesamt für Energie, Bern. En français: Renaud P., H.R. Gabathuler, H. Mayer, Th. Afjei 2002. *Schémas standards pour petites installations de PAC, 1ère partie: fiches techniques*, Schlussbericht, ENET-Nr.220217, Bundesamt für Energie, Bern.
- Gabathuler H.R., E. Shafai, H. Mayer, R. Frei, B. Illi, M. Bianchi, J. Bruderer, F. Sidler 2003. *Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen; Phase 3: Vergleich der PBM-Regler auf dem dynamischen Prüfstand*, Schlussbericht 230223, Bundesamt für Energie, Bern.
- Gass J. 1984. *Neue Technologien: Gasmotor-Wärmepumpe und Sonnenkollektoranlage*, Schweizer Ingenieur und Architekt, Bd.102, Nr.12, S.224-226.
- Geisser E., Th. Kopp 2003. *Kleinwärmepumpe mit Ammoniak, Phase 3: Flügelzellenverdichter mit Economizer und Schraubenverdichter*, Schlussbericht 230166, Bundesamt für Energie, Bern.
- Giger H. 2007. Private Mitteilungen, Herbert Giger, Fachpartner Manager Wärme, BKW FMB Energie, CH-3000 Bern.
- Global Cooling 2004. *Brief History of Stirling Machines*, 94 North Columbus Road, Athens, Ohio 45701 U.S.A.; www.globalcooling.com.
- Good J. 2000. *Kälte und Wärme aus einem System*, Gebäudetechnik Bd.2, Nr.3, S.20-22.
- Good J., A. Huber, P. Widmer, Th. Nussbaumer, D. Trüssel, Ch. Schmid 2001. *Gekoppelte Kälte- und Wärmeerzeugung mit Erdwärmesonden, Handbuch zum Planungsvorgehen*, Schlussbericht, ENET-Nr.210001, Bundesamt für Energie, Bern.
- Graf H.R. 2002. *Lärmreduktion bei Luft/Wasser- Wärmepumpenanlagen - Grundlagen und Massnahmen*, Schlussbericht, ENET-Nr.220193, Bundesamt für Energie, Bern.
- Grimm H. 2007. Private Mitteilungen, Heinz Grimm, CH-3047 Bremgarten.
- Groff G.C. 2005. *Heat Pumps – who Uses them and why?*, proceedings 8th IEA Heat Pump Conference, Las Vegas, IEA Heat Pump Centre (www.heatpumpcentre.org).
- Grüniger E. 2007. Private Mitteilungen, Emil Grüniger, Soltherm, CH-8852 Altendorf.
- Gschneidner K.A., V.K. Pecharsky, A.O. Tsokol 2005. *Recent Developments in Magnetocaloric Materials*, Institute of Physics Publishing, Rep. Prog. Phys., Vol.68, pp.1479-1539.
- Gubser O. 1975. *Die Wärmepumpenanlage in der Kläranlage Meilen-Herrliberg-Uetikon am See*, HeizungKlima, Nr.12, S.17-20.
- Gubser O. 1976. *Heizenergie aus Abwasser: Wärmepumpenanlage in der Kläranlage Meilen - Herrliberg - Uetikon*, Schweizerische Bauzeitung, Bd.94, Nr.43, S.647-649.
- Guex S., M. Zehnder, D. Favrat 2002. *Pompe à chaleur air-eau à haute température, phase 2*, Schlussbericht, ENET-Nr.220219, Bundesamt für Energie, Bern.
- Editorial enclosure 2007. Gas-Wasser-Abwasser, Bd.87, Nr.10.
- Halozan H. 1997. *Direct-Evaporation Ground-Coupled Heat Pumps in Austria*, IEA Heat Pump Centre Newsletter, Vol.15, No.3, pp.22-23.
- Handl K.-H. 1993. *Taking a Measured Approach – Heat Pump Promotion in Switzerland*, IEA Heat Pump Centre Newsletter, Vol.11, No. 3.
- Hässig W., R. Bigler, A. Huber, D. Sutter 1998. *Regeneration von Erdwärmesonden, Phase I: Potentialabschätzung*, Schlussbericht, ENET-Nr.9722601, Bundesamt für Energie, Bern.
- Hauptmann F. 2008. Private Mitteilungen, Filip Hauptmann, Verkauf Blockheizkraftwerke, Avesco, CH-4901 Langenthal.

Hellström G. 1991. *Ground Heat Storage – Thermal Analysis of Duct Storage Systems*, Doctoral Dissertation, University of Lund, Sweden.

Hellström G., B. Sanner 2000. *Earth Energy Designer*, user manual, version 2.0, www.buildingphysics.com/manuals/eed.pdf.

Hochbauamt 1941. *Festschrift für das Zürcher Hallenwimmbad*, Städtisches Hochbauamt, Zürich.

Hochbauamt 1980. *Hallenbad City – Pressebericht zur Einweihung vom 15. Juli 1980*, Bauamt II, Zürich.

Hohl H. 2007. Private Mitteilung, Hans Hohl, Technischer Leiter SATAG - Viessmann (Schweiz), SATAG Thermotechnik, CH-9320 Arbon.

Hopkirk R.J., D.J. Gilby, L. Rybach 1985. *Vertical tube earth heat exchangers – the Swiss experience*, proceedings, International Symposium on Geothermal Energy, Hawaii, August 1985.

Hottinger M. 1920. *Die Wärmepumpe*, Schweizerische Bauzeitung, Bd.76, Nr.10, S.107-109.

Hoyer F. 2007. Private Mitteilung, Fredy Hoyer, CH-8049 Zürich (ehemaliger Ingenieur bei Escher Wyss und Fachhochschuldozent).

Hubacher P. 1987. *Wärmepumpen mit Erdsonden – Erdreichtemperatur- und energetische Messungen an einer Pilotanlage in Frauenfeld*, Zwischenbericht, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern.

Hubacher P. 1990. *Wärmepumpen mit Erdwärmesonden, Ergebnisse einer energetischen Langzeituntersuchung*, Amt für Umwelt und Verkehr, Frauenfeld, Schweiz.

Hubacher B., M. Ehrbar 2000. *Verbesserung des Abtauens bei luftbeaufschlagten Verdampfern, Phase 1: Analyse gängiger Abtauverfahren*, Schlussbericht, ENET-Nr.9816187 Bundesamt für Energie, Bern.

Hubacher P., M. Erb, M. Ehrbar 2004. *Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen FAWA 1996-2003*, Schlussbericht, ENET-Nr.240016, Bundesamt für Energie, Bern.

Hubacher P. 2007. Private Mitteilungen, Peter Hubacher, Hubacher Engineering, CH-9032 Engelburg.

Huber A., Ch. Müller, O. Berchtold 1995. *Luftvorwärmung für Wärmepumpen in Erdregistern*, Schlussbericht, ENET-Nr.9554499, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern.

Huber A. 1997. *Berechnungsmodul für Erdwärmesonden*, Schlussbericht, ENET-Nr.9658807, Bundesamt für Energie, Bern.

Huber A., D. Pahud 1999. *Erweiterung des Programms EWS für Erdwärmesondenfelder*, Schlussbericht, ENET-Nr.9819227, Bundesamt für Energie, Bern.

Humm O. 1996. *Elektroheizungen elegant ersetzen*, HausTech, Nr.5, S.61-63.

Huwylar B. 2007. Private Mitteilung, Beda Huwylar, Huwylar + Koch, CH-8034 Zürich.

IEA 1980. *Common Study on Advanced Heat Pump Systems*, final report, International Energy Agency, Paris.

IEA Heat Pump Centre 1999. *Natural working fluids - a challenge for the future*, workshop proceedings, November 9, 1999, Paris, Report HPC-WR-21, IEA Heat Pump Centre.

IGSHPA 2007. *History of Ground Source Heat Pump Technology*, International Ground Source Heat Pump Association, www.igshpa.okstate.edu/about/about_us.htm.

Imboden D., H. Güttinger, D. Zoller, Ch. Riedi, Hj. Meng 1981. *Wärmepumpen an Oberflächengewässern - Ökologische Probleme und Einsatzmöglichkeiten in der Schweiz*, ausgearbeitet durch die EAWAG im Auftrag der Eidgenössischen Abwärmekommission, Studie Nr.19 der Schriftenreihe des Bundesamts für Energiewirtschaft Bern.

IIR 1998. *Natural Working Fluids'98*, proceedings, IIR – Gustav Lorentzen Conference, June 2-5, 1998, Oslo.

Joachim P. 1980. *Wärmepumpentechnologie*, Bd.1, 2, Haus der Technik, Essen; und *Wärmepumpentagung Essen 1977*, Vulkan-Verlag Essen, 1978.

Jochheim E., T. Bracke 1985. *Gebäudewärmedämmung und Wärmepumpensystem mit Betonabsorbern*, Bauphysik, Bd.7, Nr.2, S.33-38.

Kalberer F. 1981. *Einrichtung zum Wärmeentzug aus Abwasser und Verfahren zu deren Betrieb*, Europäisches Patent EP 058636.

Kalberer D. 2007. *Energie aus Abwasser – aktueller denn je*, Spektrum GebäudeTechnik, Bd.11, Nr.3, S.2-3.

Kalberer D. 2007. Private Mitteilungen, Daniel Kalberer, FEKA Energiesysteme, CH-7310 Bad Ragaz, www.feka.ch.

Kattan N., J.R. Thome, D. Favrat 1995. *Flow Boiling in Horizontal and Vertical Tubes: The Effect of Tube Orientation on Heat Transfer*, preprints of the International Conference „Convective Flow Boiling“, Banff, Kanada, April 30 - May 5, 1995.

Kemm B. 2007. Private Mitteilungen, Bruno Kemm, CEO Saline de Bex, CH- 1880 Bex, www.selbex.com.

Kirn H., A. Hadenfeldt 1979. *Wärmepumpen*, 5 Bände von 1979 bis 1983, C.F.Müller, Karlsruhe.

Kitanovski A., P.W. Egolf, O. Sari 2004. *Method and Devices for Continuous Generation of Cold and Heat by means of the Magneto-Calorific-Effect*, Patent WO/2004/059221.

Kläy H.R. 1994. *Franz Burckhardt und August Burckhardt – Maschinenbauer aus Basel*, Verein für wirtschaftshistorische Studien, Meilen, Switzerland.

Kopp Th. 2001. *Kleinwärmepumpe mit Ammoniak, Phase 2: Bau eines Funktionsmusters* Schlussbericht, ENET-Nr.210012, Bundesamt für Energie, Bern.

Kopp Th., F. Rognon (Hrsg.) 2007. *News aus der Wärmepumpen-Forschung*, Tagungsband der 14. Tagung des BFE-Forschungsprogramms „Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte“ vom 13. Juni 2007, Bundesamt für Energie, Bern.

Kruse H., W.Stiller, H.Rüssmann 2008. *Stand der Entwicklung und Markteinführung des FKW-CO₂-Erdwärmerohres*, Geothermische Energie, Bd.16, Nr.3, S.26-31.

Krüsi P. 1996. *Im Bilander, Brugg - Untersuchung der energietechnischen Sanierung einer Grossüberbauung mit Absorptionswärmepumpe und Niedertemperaturwärmeverteilung*, Schlussbericht, ENET-Nr.9106660, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern;

Krüsi P. 2000. *Absorptionswärmepumpe für Grossüberbauung*, Heizung-Klima, Bd.23, Nr.9, S.85-90.

Kunckler H. 1975. *Sonnennutzung – Wärmepumpen – Wohnbauten*. Elektrizitätsverwertung, Nr.3, Sonderdruck, S.1-12.

Kunis J., M. Stahl, H. Weise 2004. *Ein Jahrzehnt der Veränderungen: die 1990er Jahre*, in [Dienel 2004], S.160-212.

Kuratli R., O. Abegg, H. Hohl – SATAG 1997. *Device for Increasing the Evaporator Pressure in Heat Pumps and/or Refrigeration Machines with Zeotropic Refrigerant*, European Patent EP 0801278.

Laue H.-J., R. Heidelck 2000. *Innovative Wärmepumpenprojekte auf der EXPO 2000*, Wärmepumpe aktuell, Nr.2, S.3.

Lenning A. 1971. *Absorptionskühlaggregat*, Patent Application (Offenlegungsschrift) 1 601 071, Deutsches Patentamt.

Leu W. 1998. *Geothermische Eigenschaften des Schweizer Molassebeckens*, Schlussbericht, ENET-Nr.9723763, Bundesamt für Energie, Bern.

Leu W., B. Keller, Th. Mégel, U. Schärli, L. Rybach 1999. *PC-Programm für geothermische Eigenschaften des Schweizer Molassebeckens - Benutzerhandbuch zum Programm SwEWS*, Schlussbericht, ENET-Nr.9723763, Bundesamt für Energie, Bern.

Leu W., Th. Mégel, U. Schärli 2006. *Geothermische Eigenschaften der Schweizer Molasse (Tiefenbereich 0-500m); Datenbank für Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Gesteinsdichte und Porosität - Überarbeitung 2006*, Schlussbericht 260067, Bundesamt für Energie, Bern.

Leuenberger J.M., M. Koebel, J.C. Mayor, A. Ray, A. Tsukada, A. Ernst, M. Werder 1982. *Fortgeschrittene Wärmepumpensysteme*, Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung EIR, Schriftenreihe des Bundesamtes für Energiewirtschaft, Bd.24, Bern.

Lieberherr J. 2007. Private Mitteilungen und Broschüre „Schweizer Rheinsalinen“, Schweizerhalle, Jürg Lieberherr, CEO Vereinigte Schweizerische Rheinsalinen Schweizerhalle, CH-4133 Pratteln.

Linde 2004. *125 Jahre Linde – eine Chronik*, Linde AG, Wiesbaden, www.linde.com.

Loewer H. 1981. *Technische Möglichkeiten und Entwicklungsstand der Sorptionswärmepumpe*, Ki Klima – Kälte – Heizung, Nr.5, S.255-262.

Lund J., B. Sanner, L. Rybach, R. Curtis, G. Hellström 2003. *Ground Source Heat Pumps – a World Review*, Renewable Energy World, July-August 2003, pp.218-227.

Mariani-Brugger G. 2007. Private Mitteilung; Gabriella Mariani-Brugger, CH-7252 Klosters- Dorf, www.gabriellamariani.ch.

Matl G. 1984. *Die „Wärmepumpe im industriellen Einsatz bei der Saline Ebensee*, VDI-Berichte 533, VDI-Verlag, S.109-121.

Meili A. 1990. *Grundlagen zur direkten Brüdenverdichtung bei der Destillation*, verfahrens-technik, Bd.24, Nr.9, S.24-36.

Mendler W. 2007. Private Mitteilung, Werner Mendler, Fachleiter Energiemanagement, Stadt Zürich, Immobilien-Bewirtschaftung, Lindenhofstrasse 21, CH-8021 Zürich.

Meszaros I. 2007. Private Mitteilung; Istvan Meszaros, Sulzer Chemtech, CH-8404 Winterthur.

Montani A. 2003. *Wärmepumpentest für die kombinierte Raumheizung und Warmwasseraufbereitung*, Schlussbericht 230224, Bundesamt für Energie, Bern.

Moran M.J., H.N. Shapiro 2007. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, John Wiley + Sons, Chichester/New York/Weinheim/Brisbane/Singapore/Toronto.

Mucic V., B. Schermann 1984. *Zweistoff-Kompressions-Wärmepumpe*, Fernwärme int. Bd.13, Nr.2, S.79-81.

Müller E.-A. 2005. *Heizen und Kühlen mit Abwasser*, Gas-Wasser-Abwasser gwa, Bd.85, Nr.2, S.93-99.

Murphy K.P., B.A. Phillips 1984. *Development of a Residential Gas Absorption Heat Pump*, Int. J. of Refriger., Vol. 7, No.1, pp.56-58.

Mustoe F.J. 1977. *Elektromechanische Wärmepumpen – Einsatzmöglichkeiten und Entwicklungsaussichten in der Schweiz*, Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung, Würenlingen.

Nagengast B., G.C. Groff, E. Kraus 2006. *Air Conditioning and Refrigeration Chronology*, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers ASHRAE, www.ashrae.org/publications.

Nani M. 2005. *Bestimmung der Kategorie Energieeffizienz*, WPZ-Bulletin 2005-01, S.19.

www.ntb.ch/files/1/3896/WPZ%20Bulletin%202001-2005%20DE.pdf

Nani M., P. Hubacher, M. Ehrbar 2005. *Qualitäts-Prüfung von Klein-Wärmepumpen mittels Norm- und Feldmessungen - Teilprojekt Effizienzsteigerung Norm- und Feldmonitoring Bestanlagen*, Jahresbericht, Bundesamt für Energie, Bern.

Nani M. 2008. Private Mitteilung. Marco Nani, Leiter des Wärmepumpentestzentrums, CH-9471 Buchs.

Nellen, Ch., K. Boulouchos 2000. *Natural Gas Engines for Cogeneration : Highest Efficiency and Near-Zero-Emissions through Turbocharging, EGR and 3-Way Catalytic Converter*, International Fall Fuels and Lubricants Meeting, Baltimore, Maryland October 10-19; SAE Technical Paper Series 2000-01-2825.

Nellen, Ch., K. Boulouchos, Ch. Schaer, Ch. Onder 2000: *Regelung des SwissMotors für den Einsatz in der Praxis*, Schlussbericht 200146, Bundesamt für Energie, Bern.

Ochsner E. 1993. *Wärmepumpen-Test-und-Ausbildungszentrum in Töss*, HeizungKlima, Nr.10, S.65-68.

Ostertag A. 1946. *Die Wärmepumpe für Raumheizung in den U.S.A.*, Schweizerische Bauzeitung, Bd.127, Nr.20. S.249-251.

Ostertag A. 1949. *Die Wärmepumpe im Wohlfahrtshaus der „Therma“ in Schwanden*, Schweizerische Bauzeitung, Bd.67, Nr.21, S.294-298.

Ostertag A. 1955. *Über die Anwendung der Wärmepumpe zur Raumheizung*, redaktioneller Beitrag, Schweizerische Bauzeitung, Bd.73, Nr.7. S.88-90.

Ostertag A. 1958. *Wirtschaftliches Heizen mit Wärmepumpen*, Schweizerische Bauzeitung, Bd.76, Nr.45, S.674-681.

Ostertag A. 1974. *Über Möglichkeiten des Wärmepumpeneinsatzes bei der Städtefernheizung*, Schweizerische Bauzeitung, Bd.92, Nr.31, S.741-750.

Ottinger K. 2007. Private Mitteilung, Karl Ottinger, HASTAG, CH-9014 St. Gallen.

Pelet X., D. Favrat, A. Voegeli 1997. *Performance of a 3.9 MW Ammonia Heat Pump in a District Heating Cogeneration Plant: Status after Eleven Years of Operation*, Compression Systems with Natural Working Fluids, Workshop IEA Annex 22, Gatlinburg, TN, U.S.A., Oct. 2-3, 1997.

Peterhans S., F. Rognon 2005. *Heat Pumps in Switzerland – a Success Story*, proceedings 8th IEA Heat Pump Conference, Las Vegas, IEA Heat Pump Centre.

Peters H., P. Brückner, H. Najork 1986. *Möglichkeiten zur Anwendung des Systems Wasser/Zeolith 5A in periodischen Adsorptionswärmepumpen und solarangetriebenen Kälteanlagen*, Luft- und Kältetechnik, Nr.3, S.154-159.

Pietrucha U. 2008. *District Heating and Cooling with Large Centrifugal Chiller-Heat Pumps*, proceedings 9th International Energy Agency Heat Pump Conference, Zurich, Switzerland, May 20-22, 2008.

Philips – OGEM 1978. *Experimentelles Stirling-Wärmepumpensystem für kleine Zentralheizungen*, redaktioneller Beitrag, Schweizerische Bauzeitung, Bd.96, Nr.45, S.853-854.

Promatec 1978. *Wärmepumpenheizungen zur Nutzung der Sonnenenergie und Umgebungswärme*, Schweizerische Bauzeitung, Bd.96, Nr.24, S.486-490.

Radermacher R., K.E. Herold, W. Miller, H. Perez-Blanco, W. Ryan, G. Vliet 1994. *Proceedings of the International Absorption Heat Pump Conference, International Absorption Heat Pump Conference*, January 19-21, 2001, New Orleans, Louisiana, the American Society of Mechanical Engineers, AES-Vol.31, New York.

Rechsteiner J. 2007. Private Mitteilungen; Jürg Rechsteiner, Geschäftsleiter, Multi-Energie, CH-8355 Aadorf.

- Reiner G., M. Zehnder, D. Favrat, E. Zahnd, J. Cizmar, C. Brugnoli, P. Reis 1998. *Wärmepumpe mit Hilfskreislauf zur Kondensatunterkühlung, Phase 2: Experimentelle Untersuchung*, Schlussbericht, ENET-Nr.9824787, Bundesamt für Energie, Bern.
- Reiner G. 2007. Private Mitteilung, Günther Reiner, Projektleiter, SSP Kälteplaner, CH-6400 Luzern.
- Rieberer R., C. Mittermayr, H. Halozan 2005. *CO₂-Thermosyphons as Heat Source for Heat Pumps – 4 Years of Market Experience*, IEA Heat Pump Conference, May 30 – June 2, 2005, Las Vegas, Nevada U.S.A.
- Riesen K. 2007. Private Mitteilungen und Fotosammlung, Kurt Riesen, Operateur Walche-Anlagen, ETH-Immobilien, CH-8092 Zürich.
- Rognon F. 2007. Private Mitteilungen, Fabrice Rognon, Bereichsleiter Wärmepumpentechnologie, Bundesamt für Energie, CH-3003 Bern.
- Rohner E., S. Bassetti, T. Kohl 2005. *New large geothermal storage project in Zurich/Switzerland for heating and cooling*, proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, April 24-29, 2005.
- Rohner E. 2007. Private Mitteilungen, Ernst Rohner Sr., CH-9200 Gossau.
- Rybach L. 1987. *The Vertical Earth Heat Exchanger - a Small-Scale Geothermal Energy System*, proceedings Int. Meeting on Geothermics and Geothermal Energy, Guarujá/S.P., Revista Brasileira de Geofisica No. 5, pp.319-324.
- Rybach L., R.J. Hopkirk, W. Eugster, R. Burkart 1990. *Design and Long-Term Performance of Vertical Earth Heat Exchangers*, proceedings International Symposium on Geothermal Energy, Hawaii, No.1, pp.343-350.
- Rybach L., W.J. Eugster, R.J. Hopkirk, B. Kaelin 1992. *Borehole Heat Exchangers: Long-Term Operational Characteristics of a Decentral Geothermal Heating System*, Geothermics No. 22, pp.861-869.
- Rybach L., R.J. Hopkirk 1995. *Shallow and Deep Borehole Heat Exchangers - Achievements and Prospects*, proceedings World Geothermal Congress 1995, Florence/I, No. 3, pp.2133-2139.
- Rybach L., W. Eugster 1998. *Reliable Long Term Performance of BHE Systems and Market Penetration - The Swiss Success Story*, L. Stiles (ed.), Proc. 2nd Stockton International Geothermal Conference, pp.41-57.
- Rybach L. 2001. *Status and Prospects of Geothermal Heat Pumps (GHP) in Europe and Worldwide; Sustainability Aspects of GHPs*, Proc. International Geothermal Days Germany 2001, pp.111-126.
- Rybach L. 2004. *Use and Management of Shallow Geothermal Resources in Switzerland*, Proc. International Geothermal Days "Poland 2004", K. Popovski & B. Kepinska (eds.), pp.128-136.
- Sanner B. 1992. *Erdgekoppelte Wärmepumpen, Geschichte, Systeme, Auslegung, Installation*, IZW-Berichte 2/92, Karlsruhe.
- Sari O. 2007. *Réfrigération et Pompe à Chaleur Magnétique – premier Démonstrateur Technologique*, pp.55-64 in [Kopp und Rognon 2007].
- SBZ 1944. *Wärmepumpenanlage für die Zürcher Amtshäuser I bis V*, redaktioneller Beitrag, Schweizerische Bauzeitung, Bd.124, Nr.8. S.98/99.
- Schäfer H.A., K. Stephan 1984. *Teillastverhalten und Regelung von Absorptionswärmepumpen zur Gebäudeheizung*, Brennstoff-Wärme-Kraft, Bd.36, Nr.1-2, S.34-36.
- Schär O. 1983. *Technische Voraussetzungen und Bedingungen für den Anschluss von Wärmepumpen*, Bulletin SEV/VSE, Bd.74, Nr.4, S.179-183.
- Schärer H.U. 1992. *Strategiepapier Wärmepumpen*, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern.

- Schärer H.U. 2007. Private Mitteilungen, Hans Ulrich Schärer, Leiter der Sektion Energietechnologie, Bundesamt für Energie, CH-3003 Bern.
- Schiefelbein K. 1999. *Market Experience with Hydrocarbons in Germany*, in [IEA-HPC 1999], pp.51-58.
- Schiffmann J., A. Molyneaux 2002. *Compresseur radial pour pompe à chaleur bi-étagée, Phase 1: Etude de faisabilité*, Schlussbericht 220195, Bundesamt für Energie, Bern.
- Schiffmann J., D. Favrat, A. Molyneaux 2005. *Compresseur radial pour pompe à chaleur bi-étagée, Phase 2*, Schlussbericht 250093, Bundesamt für Energie, Bern.
- Schindler-Fässler G., C. Schindler 1944. *Das Wärmepumpen-Ergänzungswerk des Fernheizkraftwerks der ETH*, Schweizerische Bauzeitung, Bd.124, Nr.13, S.157-162.
- Schmid H.-L. 2001. *EnergieSchweiz mit neuem Fokus – Das Nachfolgeprogramm von Energie 2000*, Bulletin SEV/VSE, Bd.92, Nr.3, S.9-14.
- Scholten W. 2004. *Staatliche Trennung und doppelter Wiederaufbau*, in [Dienel 2004], S.57-82.
- Schwanner I., R.J. Hopkirk, E. Nagel 1983. *Die vertikale Erdsonde im Betrieb – Messungen, Modellsimulation und Prognose des Langzeitverhaltens*, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern.
- Schwarzwald E. 2002. *Wärmepumpen-Tumbler für Mehrfamilienhäuser*, Schlussbericht 220239 Bundesamt für Energie, Bern.
- Shafai E., H.R. Gabathuler, H. Mayer 1999. *Pulse-Width Modulation for Low-Power Heat Pump Heating Systems*, preprints, IEA Heat Pump Conference, May 31 - June 2, 1999, Berlin.
- Shafai E., D. Zogg, M. Ehrbar, L. Wirth 2000. *Dynamischer Wärmepumpentest, Phase 1: Modellansatz für die prüftechnische Charakterisierung der Minderwärmeproduktion*, Schlussbericht, ENET-Nr.9933684, Bundesamt für Energie, Bern.
- Shafai E., R. Wimmer, H. P. Geering. *A New Control Approach for Heat Pump Heating Systems*, preprints 7th International Energy Agency Heat Pump Conference, Beijing, 19-22 May 2002, Vol.1, pp.146-157.
- Segal B. 1995. *A Short History of Internet Protocols at CERN*, CERN IT-PDP-TE, <http://ben.web.cern.ch/ben/TCPHIST.html>.
- Signorelli S., Th. Kohl 2002. *Validieren des Programms EWS und Optimieren der Erdwärmesondenlänge*, Schlussbericht, ENET-Nr.220186 Bundesamt für Energie, Bern.
- Signorelli S., Th. Kohl, L. Rybach 2005. *Sustainability of Production from Borehole Heat Exchanger Fields*, proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, April 24-29, 2005.
- Signorelli S. 2008. Private Mitteilung, Sarah Signorelli, GEOWATT AG, CH-8050 Zürich.
- Silberring L. 1986. *La Centrale d'Energie de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne à Ecublens*, Dr. Ludwig Silberring AG, Zürich.
- Stalder M., A. Huber, S. Albrecht 2001. *Erweiterung des Programms WPCalc mit dem Berechnungsmodul für Erdwärmesonden EWS*, Schlussbericht, ENET-Nr.210110 Bundesamt für Energie, Bern.
- Steiger P., C.U. Brunner, H.-H. Becker, W. Stoos, B. Wick 1977. *Plenar – Wärmeverbund Schweiz – Ergänzungen und Präzisierungen*, Arbeitsgruppe PLENAR, Zürich.
- Steiner R. 2007. Private Mitteilungen, Rolf Steiner (ehemaliger Redaktor der technischen Zeitschriften von Sulzer / Sulzer Burckhardt / Burckhardt Compression), Steinackerweg 39, CH-8405 Winterthur.
- Stene J. 1998. *Compression Systems with Natural Working Fluids – Guidelines for Design and Operation*, final report of the IEA-HPP-Annex 22, IEA Heat Pump Centre.

- Stenzel B. 2004. *Kälteindustrie und Mittelständler in der Kältetechnik der 1960er Jahre*, in [Dienel 2004], S.83-104.
- Stierlin H. 1969. *Absorptions-Kälteanlage und Verfahren zu ihrem Betrieb*, Schweizer Patent 475527.
- Stierlin H., C. Wassermann, W. Dörfler, J. Bösel 1993. *Messungen an Diffusions-Absorptions-Wärmepumpen DAWP*, Schlussbericht, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern.
- Stierlin H., C. Wassermann 1996. *Feldversuche mit Gaswärmepumpe*, Gas Wasser Abwasser GWA. Bd.76, Nr.3, S.238-242.
- Stohler F. 1995. *Wärmerückgewinnung aus Abwasser mittels kalter Fernleitung*, HeizungKlima, Nr.11, S.118-123.
- SVG 1981. *Wärmepumpentagung 6./7.November 1980 und 15./16.Januar1981*, Umweltschutz/ Gesundheitstechnik, Nr.1/2, S.1-20, 33-64.
- SVK 1981. *Richtlinien für Wärmepumpen*, SVK-Richtlinie Nr.3, AWP Arbeitsgemeinschaft Wärmepumpen Schweiz, Zürich.
- Szokody G. 1975. *Wärmepumpenanlage für 40 Einfamilienhäuser*, klima-kälte-technik, Nr.10, S.212-214.
- Szokody G. 1984. *Die Arbeit der Technischen Kommission der AWP*, HeizungKlima, Nr.12, S.98-99.
- Szokody G. 1990. *Eignung der Wärmepumpe bei Sanierungen*, HeizungKlima, Nr.7, S. 47.
- Szokody G. 2007. Private Mitteilungen, Gyula Szokody, ehemaliger Produktleiter Wärmepumpen und Solaranlagen von Hoval-Herzog, Leiter der technischen Kommission der AWP von 1980 bis 1995, CH-8340 Hinwil.
- Tastavi A. 1994. *Centrale de chauffage par thermopompes et turbines à gaz de l'école polytechnique fédérale de Lausanne*, Laboratoire d'énergie industrielle de l'EPFL, Lausanne, pp.1-14.
- Thevenot R. 1979 (Translated by J.C. Fidler). *A History of Refrigeration Throughout the World*, International Institute of Refrigeration, Paris.
- Thome J.R. 1994. *Two-Phase Heat Transfer to New Refrigerants*, 10th International Heat Transfer Conference, Brighton England, July 14-18, 1994.
- Thome J.R. 1996. *Two-Phase Flow Patterns of Refrigerant-Oil Mixtures Inside Horizontal Tubes*, proceedings of the ASHRAE Summer Meeting, San Antonio, Texas (USA), June 1996.
- Thome J.R., N. Kattan, D. Favrat 1997. *Evaporation in Microfin Tubes*; O.Zürcher, J.R. Thome, D. Favrat. *Prediction of Two-Phase Flow Patterns for Evaporation of Refrigerant R407C Inside Horizontal Tubes*, proceedings of the Convective Flow and Pool Boiling Conference II, Irsee BRD, 1997.
- Thomson W. 1852. *On the Economy of Heating and Cooling of Buildings by Means of Currents of Air*, proceedings of the Philosophical Society, Vol. 3, pp.269-272.
- Thonon B. 2006. *The SHERPHA Project – Natural Refrigerants for Heat Pumps*, IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, Trondheim, Norway, May 28-31, 2006.
- Trepp Ch. 1997. *Heat Transfer of Overcritical Carbondioxide in Tubes*, preprints Workshop "Compression Systems with Natural Working Fluids" of the IEA Annex 22 in Gatlinburg U.S.A., October 1997.
- Truninger P., R.Truninger, M. Hutter 2007: Private Mitteilungen, Paul Truninger, ES-07540 Son Carrio; Rolf Truninger, CH-4513 Langendorf; Max Hutter, CH-3400 Burgdorf.
- Trüssel D., E. Zahnd, J. Cizmar, D. Favrat 2000. *Wärmepumpe mit Zwischeneinspritzung bei Scrollkompressoren*, Schlussbericht, ENET-Nr.9931783, Bundesamt für Energie, Bern.

- Trüssel K. 2007. Private Mitteilungen, Kurt Trüssel, KWT Kälte-Wärmetechnik, CH-3123 Belp.
- VSE 1983. *Empfehlungen für den Anschluss von Wärmepumpenanlagen für Heizung und Warmwassererwärmung an das Netz der Elektrizitätswerke*, Verband der Schweizerischen Elektrizitätswerke, Zürich.
- Vuarnoz D., A. Kitanovski, M. Diebold, P.W. Egolf 2007. *A Magnetic Heat Pump with Porous Magneto Caloric Material*, International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications, ISAMMA, Jeju, South Korea.
- Wanner O. 2004. *Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen*, Schlussbericht 240104, Bundesamt für Energie, Bern.
- Wassermann C. 2007. Private Mitteilungen, Carl Wassermann, Eigentümer der ENTEX Energy AG, CH-5445 Eggenwil (www.entex-energy.ch) und langjähriger, enger wissenschaftlicher Mitarbeiter von Hans Stierlin.
- Weber B. 2007. Private Mitteilung, Bruno Weber, Projektleiter, Pfiffner, CH-8048 Zürich.
- Weibel T. 1996. *Vergleichende Umweltrelevanz des Einsatzes alternativer Kältemittel*, Schlussbericht, ENET-Nr.30465, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern.
- Wemhöner C., Th. Afjei 2005. *Annex 28 - Comprehensive and Uniform Testing and Calculation for Heat Pump Systems*, IEA Heat Pump Centre Newsletter, Vol. 23, No.3, pp.20-21.
- Wenzel B. 2007. *Erdwärme-Projekt CO₂-Erdsonde-Bensheim*, Geothermische Energie, Bd.16, Nr.2, S.19-20.
- Wermelinger B. 1977. *Wärmepumpenanlagen*, Der Autofrigorant, S.6, 19-21.
- Wermelinger B. 1992. *Kältemittlersatz ist ein Gebot der Stunde*, Sulzer Horizonte, Nr.11/12, S.10-11.
- Wermelinger B. 2007. Private Mitteilungen, Bruno Wermelinger, OptiCasa, CH-8180 Bülach.
- Winkler R. 1995. *150 Jahre Wärmepumpe im Salinenbetrieb*, Industriearchäologie, Nr.4, S.7-17.
- Wirth E. 1936. *Die Bestreitung von Wärmeprozessen mittels Wärmepumpe*, Schweizerische Bauzeitung, Bd.107, Nr.17, S.189-190.
- Wirth E. 1955. *Aus der Entwicklungsgeschichte der Wärmepumpe*, Schweizerische Bauzeitung, Bd.73, Nr.52, S.647-650.
- Zehnder M., D. Favrat 1999. *Pompe à chaleur biétagée à haute performance*, Schlussbericht, ENET-Nr.9710478, Bundesamt für Energie, Bern.
- Zehnder M., D. Favrat, E. Zahnd, J. Cizmar, D. Trüssel 2000. *Wärmepumpe mit Zwischeneinspritzung bei Scrollkompressoren*, Schlussbericht, Bundesamt für Energie, Bern.
- Zehnder M., D. Favrat, H. Hohl, C. Olivier, M. Perevozchikov 2002. *High Performance Air-Water-Heat Pump with Extended Application Range for Residential Heating*, 7th International Energy Agency Heat Pump Conference, Beijing, 19-22 May 2002, Vol. 2, pp.146-157.
- Zogg D., E. Shafai 2001. *Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen, Phase 5: Test der Fehlerdiagnosesysteme*, Schlussbericht 210136, Bundesamt für Energie, Bern.
- Zogg D., E. Shafai, H.P. Geering 2001. *A fault diagnosis system for heat pumps*, proceedings of the 2001 IEEE Conference on Control Applications (CCA), Mexico City, pp.70-76.
- Zogg D., E. Shafai, H.P. Geering 2005. *Fault Diagnosis for Heat Pumps with Parameter Identification and Clustering*, Journal Control Engineering Practice, Vol. 4, No.12, pp.1435-1444.
- Zogg H. 2008. Private Mitteilung, Hans Zogg, Sulzer Innotec, Sulzer Archiv, CH-8401 Winterthur.

Zogg M. 1983. *Wärme- und Stofftransportprozesse*, Otto Salle, Frankfurt a.M./Berlin/München und Sauerländer/Aarau/Frankfurt a.M./Salzburg, S. 82.

Zogg M. 1995. *Heizen mit 150% statt 90% Nutzungsgrad: Kombination von Wärme-Kraft-Kopplung und Wärmepumpentechnologie*, Schweizer Ingenieur und Architekt, Bd.113, Nr.43, S.985-987; www.zogg-engineering.ch/publi/1998_GWA_Klein_BHKW.pdf.

Zogg M. 2000. *Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel in Wärmepumpen*, KI Luft- und Kältetechnik, Bd.36, Nr.4, S.177-181; www.zogg-engineering.ch/publi/2000_LCA_nat_KM_SVK.pdf.

Zogg M. 2002a. *The Swiss Retrofit Heat Pump Programme*, preprints, 7th International Energy Agency Heat Pump Conference, Beijing, 19-22 May 2002, China Academy of Building Research, Vol. 1, pp.208-218; www.zogg-engineering.ch/publi/IHPC_Zogg.pdf.

Zogg M. 2002b. *Wärme und Strom aus Brennstoffen – effizient und umweltschonend*, Gas-Wasser-Abwasser gwa, Bd.82, Nr.12, S.907-912; www.zogg-engineering.ch/publi/WKK_WP_Strom.pdf.

Zogg M. 2008a. *History of Heat Pumps - Swiss Contributions and International Milestones*, preprints, 9th International Energy Agency Heat Pump Conference, Zurich, 20-22 May 2008.

Zogg M. 2008b. *History of Heat Pumps - Swiss Contributions and International Milestones*, Swiss Federal Office of Energy, Berne; www.zogg-engineering.ch/publi/HistoryHP.pdf.

Zürcher M., J.R. Thome, D. Favrat 1997. *Flow Boiling of Ammonia in Smooth and Enhanced Horizontal Tubes*, preprints Workshop "Compression Systems with Natural Working Fluids" of the IEA Annex 22, Gatlinburg U.S.A., October 1997.

Zum Autor



Martin Zogg wurde am 30. August 1942 in Ebnat-Kappel geboren.

Er schloss seine Studien in Maschinenbau und Verfahrenstechnik an der ETH-Zürich mit einer Dissertation ab (Dr.sc.techn.).

Martin Zogg sammelte seine erste Industrieerfahrung im Flugzeugbau (Flug- und Fahrzeugwerke, Altenrhein), in der Kraftwerkstechnik (Brown Boveri, Baden), der Tieftemperaturtechnik und der Prozesstechnik (Sulzer Winterthur).

Dann wirkte Martin Zogg

25 Jahre als Professor für Prozesstechnik an der Berner Fachhochschule;

10 Jahre als Leiter des Forschungsprogramms "Umgebungswärme, Abwärmennutzung und Wärme-Kraft-Kopplung" des Schweizerischen Bundesamts für Energie und

7 Jahre als Experte für Forschungsprojekte mit den Schwerpunkten Energie- und Prozesstechnik für die Schweizerische Förderagentur für Innovation (KTI/CTI).