

# Die Wärmepumpe – ein Überblick

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Grundlagen.....</b>	<b>2</b>
1.1 Prinzip der Wärmepumpe.....	2
1.2 Technische Realisierung .....	2
1.3 Einzelheiten.....	2
1.4 Kältemittel (Arbeitsgase) .....	4
<b>2 Einteilung.....</b>	<b>5</b>
2.1 nach dem Verfahren.....	5
2.2 nach der Wärmequelle.....	5
2.3 nach der Wärmenutzung: .....	5
2.4 nach der Arbeitsweise: .....	5
2.5 Nach Gebäudetechnik .....	6
2.6 nach der Bauart.....	6
<b>3 Funktionsprinzip .....</b>	<b>6</b>
3.1 Elektrisch angetriebene Kompressions-Wärmepumpe.....	6
3.2 Wärmepumpe mit Öl- oder Gasmotorantrieb.....	7
<b>4 Bauart .....</b>	<b>7</b>
4.1 Überblick.....	7
4.2 Split.....	7
<b>5 Geschichte .....</b>	<b>7</b>
5.1 Dampfkomppressionsmaschine .....	7
5.2 Brüdenkompression .....	8
5.3 Jüngste Entwicklung.....	9

# 1 Grundlagen

## 1.1 Prinzip der Wärmepumpe

Eine Wärmepumpe ist eine grosse Maschine, die unter Aufwendung technischer Arbeit thermische Energie aus einem Reservoir mit niedrigerer Temperatur (in der Regel ist das die Umgebung) aufnimmt und – zusammen mit der Antriebsenergie – als Nutzwärme auf ein zu beheizendes System mit höherer Temperatur (Raumheizung) überträgt.

Der verwendete Prozess ist im Prinzip die Umkehrung eines Wärme-Kraft-Prozesses, bei dem Wärmeenergie mit hoher Temperatur aufgenommen, teilweise in mechanische Nutzarbeit umgewandelt und die Restenergie bei niedrigerer Temperatur als Abwärme abgeführt wird, meist an die Umgebung.

Das Prinzip der Wärmepumpe verwendet man auch zum Kühlen (so beim Kühlschrank), während der Begriff «Wärmepumpe» nur für das Heizaggregat verwendet wird. Beim Kühlprozess ist die Nutzenergie die aus dem zu kühlenden Raum aufgenommene Wärme, die zusammen mit der Antriebsenergie als Abwärme an die Umgebung abgeführt wird.

## 1.2 Technische Realisierung

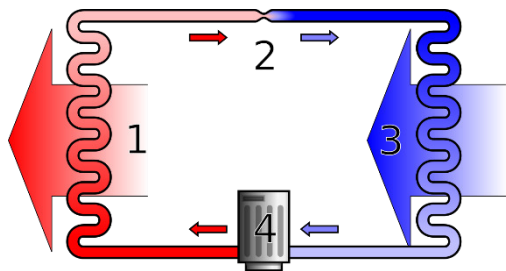


Abbildung 1: Grundprinzip Wärmepumpe

Wärmepumpen werden in der Regel mit Medien betrieben, die bei niedrigem Druck unter Wärmezufuhr verdampfen und nach der Verdichtung auf einen höheren Druck unter Wärmeabgabe wieder kondensieren. Der Druck wird so gewählt, dass die Temperaturen des Phasenübergangs einen für die Wärmeübertragung ausreichenden Abstand zu den Temperaturen von Wärmequelle und Wärmesenke haben. Je nach verwendetem Stoff liegt dieser Druck in unterschiedlichen Bereichen.

Die Abbildung zeigt das Schaltbild mit den vier für den Prozess erforderlichen Komponenten: Verdampfer (3), Verdichter (4), Kondensator (1) und Drossel (2). Theoretisch wäre es möglich, die Arbeitsfähigkeit des Kondensates beim Entspannen auf den niedrigeren Druck durch eine Kraftmaschine, beispielsweise eine Turbine, zu nutzen. Doch dabei würde die Flüssigkeit teilweise verdampfen und so grosse technische Schwierigkeiten bei einem nur geringen Energiegewinn verursachen. Deshalb verwendet man der Einfachheit halber hier eine Drossel (Entspannung mit konstanter Totalenthalpie).

## 1.3 Einzelheiten

Bei der Wärmepumpe werden physikalische Effekte des Übergangs einer Flüssigkeit in die gasförmige Phase und umgekehrt ausgenutzt. So zeigt Propan die Eigenschaft, abhängig vom Druck und seiner Temperatur einerseits entweder gasförmig oder flüssig zu sein und andererseits als Gas bei Kompression heiss zu werden und sich bei Entspannung abzukühlen: Propan bei normalem Luftdruck und niedriger Aussentemperatur (zum Beispiel 5 °C) ist gasförmig; komprimiert man es, wird es wärmer, bleibt aber gasförmig. Kühlt man es dann auf Zimmertemperatur ab, wird es flüssig (dabei sinkt der Druck wieder etwas). Wenn man das flüssige Propan entspannt, verdampft es (es wird wieder zu Gas) und wird dabei sehr kalt.

Diesen Effekt nutzt man bei der Wärmepumpe aus: Das Propangas wird im Verdichter durch einen Motor zusammengepresst und erhitzt sich dabei. Das heisse, komprimierte Gas kann dann im Wärmetauscher seine Wärme an das Wasser der Heizungsanlage abgeben. Dabei kühlt sich das komprimierte Gas ab und kondensiert zu flüssigem Propan (der Wärmetauscher einer Wärmepumpe wird deshalb Kondensator genannt). Beim anschliessenden Durchgang durch das Expansionsventil, eine Drossel (in einfachen Modellen eine extreme Engstelle im Rohr), wird das flüssige Propan entspannt, verdampft dabei und wird sehr kalt (deutlich kälter als 5 °C). Lässt man das kalte Gas dann durch einen zweiten

Wärmetauscher (meist ausserhalb des Hauses) strömen, der von aussen – zum Beispiel durch Grundwasser oder die Aussenluft – immer bei zum Beispiel 5 °C gehalten wird, erwärmt sich das sehr kalte Gas auf 5 °C und die Umgebung kühlt sich um 1 oder 2 °C ab. Auf diese Weise nimmt das Propan aus dem Grundwasser oder der Aussenluft genauso viel Wärme auf, wie es vorher an das Heizungswasser abgegeben hat. Es wird dann wieder dem Verdichter zugeführt, und der Prozess beginnt von neuem.

Die benötigte Energie zum Antrieb der Wärmepumpe verringert sich, das heisst der Betrieb wird umso effizienter, je geringer die Temperaturdifferenz zwischen Quelle und Senke z. B. der Vorlauftemperatur der Heizungsanlage ist. Diese Bedingung erfüllen Niedertemperaturheizungen am besten, deshalb wird die Wärme im Wohnraum häufig durch eine Flächenheizung z. B. Fussbodenheizung abgegeben.

Je nach Auslegung des Systems kann der Heizenergieaufwand um zirka 30 bis 50 % reduziert werden. Durch Kopplung mit Solarstrom, Haushaltsstrom oder Erdgas zum Antrieb der Wärmepumpe kann die Kohlendioxidemission im Vergleich zum Heizöl oder Gas erheblich gesenkt werden.

Der Auswahl der richtigen Wärmequelle kommt eine besondere Bedeutung zu, denn diese bestimmt massgeblich die maximal erreichbare Arbeitszahl einer Wärmepumpe.

«Ein Mass für die Effizienz einer Wärmepumpe ist die Jahresarbeitszahl. Sie beschreibt das Verhältnis der Nutzenergie in Form von Wärme zur aufgewendeten Verdichterenergie in Form von Strom.» Bei guten Anlagen ist dieser Wert grösser als 5.0 (Direktverdampfungsanlagen). Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass bei der Berechnung der Jahresarbeitszahl weder Nebenverbräuche noch Speicherverluste berücksichtigt werden.

**Wirtschaftlichkeit:** Bei der Beheizung von kleineren Wohngebäuden werden Wärmepumpen elektrisch angetrieben. Wenn sie unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten mit einer herkömmlichen Heizung, z. B. Gas, verglichen werden, bietet die Jahresarbeitszahl einen Indikator für einen Betriebskostenvergleich zwischen Wärmepumpe und Gasheizung. Falls der Strompreis für die Wärmepumpe (in CHF/kWh) höher als der Gaspreis (in CHF/kWh) multipliziert mit der Jahresarbeitszahl ist, so ist zu erwarten, dass schon die Stromkosten für die Wärmepumpe höher als die Kosten für das Verbrennen von Gas sind. Sinngemäss gilt dies auch für den Vergleich einer Wärmepumpe mit einer Ölheizung. In dieser Rechnung werden die durch Verbrennungsprozesse freigesetzte CO<sub>2</sub>-Menge und der einhergehende Erderwärmungsprozess sowie freigesetzter Feinstaub und mögliche Folgeschäden nicht berücksichtigt.

Bei noch in Betrieb befindlichen älteren Kohlekraftwerken kann aus drei Teilen Wärmeenergie nur ein Teil Strom gewonnen werden. Für strombetriebene Wärmepumpen ist es notwendig, einen möglichst hohen Anteil regenerativ erzeugten Stroms im Strommix zu erreichen.

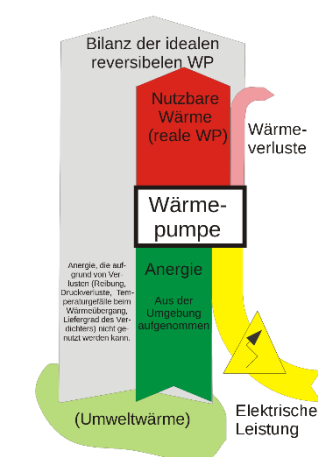


Abbildung 2: Leistungsbilanz

Bei der direkten elektrischen Beheizung, zum Beispiel mit Heizstäben, entspricht die erzeugte Wärmeenergie genau der eingesetzten elektrischen Energie (COP=1). Die elektrische Energie ist aber wesentlich hochwertiger als Wärmeenergie bei niedriger Temperatur, denn durch Einsatz einer Wärmekraftmaschine kann immer nur ein Teil der Wärmeleistung wieder in elektrische Leistung umgeformt werden.

Der Abluft, der Aussenluft, dem Erdboden, dem Abwasser oder dem Grundwasser kann Wärme durch Einsatz einer Wärmepumpe entzogen werden. Ein Vielfaches der für die Wärmepumpe eingesetzten elektrischen Leistung kann der Wärmequelle (Luft, Erdboden) entzogen werden und auf ein höheres Temperaturniveau gepumpt werden. In der Leistungsbilanz wird der Wärmepumpe elektrische Leistung für den Verdichterantrieb und die der Umwelt entzogene Wärme zugeführt. Am Austritt

der Wärmepumpe steht ein Teil der zugeführten Leistung als Wärme auf höherem Niveau zur Verfügung. In der Gesamtleistungsbilanz sind noch die Verluste des Prozesses zu berücksichtigen.

Das Verhältnis von der in den Heizkreis abgegebenen Wärmeleistung zur zugeführten elektrischen Verdichterleistung wird als Leistungszahl bezeichnet. Die Leistungszahl hat einen oberen Wert, der nicht überschritten und aus dem Carnot-Kreisprozess abgeleitet werden kann. Die Leistungszahl wird auf einem Prüfstand ermittelt und gilt nur unter den jeweiligen Prüfbedingungen. Die Leistungszahl wird auch COP genannt (Coefficient Of Performance). Der COP ist Gütekriterium für Wärmepumpen, erlaubt jedoch keine energetische Bewertung der Gesamtanlage.

Um eine möglichst hohe Leistungszahl und somit eine hohe Energieeffizienz zu erlangen, sollte die Temperaturdifferenz zwischen der Temperatur der Wärmequelle und der Nutztemperatur möglichst gering sein. Die Wärmeübertrager sollten für möglichst geringe Temperaturdifferenzen zwischen der Primär- und Sekundärseite ausgelegt sein.

Die Bezeichnung Wärmepumpe beruht darauf, dass Wärme aus der Umgebung auf ein höheres nutzbares Temperaturniveau angehoben (gepumpt) wird. Die Wärmepumpe hat einen Verdichter, der elektrisch oder durch einen Verbrennungsmotor angetrieben wird. Der Verdichter komprimiert ein Kältemittel auf einen höheren Druck, wobei es sich erwärmt. Die beim nachfolgenden Abkühlen und Verflüssigen des Kältemittels freigesetzte Energie wird in einem Wärmeübertrager auf das Wärmeträgermedium des Heizkreises, meistens Wasser oder Sole, übertragen. Das Kältemittel wird anschliessend an einem Expansionsventil entspannt und es kühlt sich ab. Das kalte Kältemittel wird dem Verdampfer (Erdwärmesonden, Luftverdampfer) zugeführt und geht durch Aufnahme von Umgebungswärme (Anergie) in den gasförmigen Zustand über.

Ein Nachteil der Wärmepumpe ist der deutlich höhere apparative Aufwand. Besonders kostenintensiv sind wirkungsvolle Verdampfer (Erdwärmesonden, erdverlegte Flächenverdampfer) durch die damit verbundenen Erdarbeiten. Die Investitionen gegenüber einem konventionellen Gas- oder Heizölbrenner sind deutlich höher. Dafür ist der regelmässige Aufwand für Wartung und Instandhaltung deutlich geringer, zum Beispiel fallen keine Reinigungs- und Schornsteinfegerkosten an.

Der Wärmepumpenprozess, nach Rudolf Plank Plank-Prozess genannt, wird auch als Kraftwärmemaschine bezeichnet. Der Grenzfall einer reversibel arbeitenden Kraftwärmemaschine ist der linksläufige Carnotprozess.

## 1.4 Kältemittel (Arbeitsgase)

Von 1930 bis zum Anfang der 1990er Jahre waren die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) die bevorzugten Kältemittel. Sie kondensieren bei Raumtemperatur unter leicht handhabbarem Druck. Sie sind nicht giftig, nicht brennbar und reagieren nicht mit den üblichen Werkstoffen. Wenn FCKW freigesetzt werden, schädigen sie jedoch die Ozonschicht der Atmosphäre und tragen zum Ozonloch bei. In Deutschland wurde daher der Einsatz von Fluorchlorkohlenwasserstoffen im Jahr 1995 verboten. Die als Ersatz verwendeten Fluorkohlenwasserstoffe (FKW) schädigen nicht die Ozonschicht, tragen jedoch zum Treibhauseffekt bei und sind im Kyoto-Protokoll als umweltgefährdend erfasst. Als natürliche Kältemittel gelten reine Kohlenwasserstoffe wie Propan oder Propylen, wobei deren Brennbarkeit besondere Sicherheitsmassnahmen erforderlich macht. Anorganische, nicht brennbare Alternativen wie Ammoniak, Kohlendioxid oder Wasser wurden ebenfalls für Wärmepumpen eingesetzt. Aufgrund spezifischer Nachteile haben sich diese Kältemittel nicht im grösseren technischen Massstab durchsetzen können. Ammoniak (NH<sub>3</sub>) und Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) werden generell in industriellen Kühlanlagen wie Kühlhäusern und Brauereien eingesetzt. CO<sub>2</sub> ist anstelle von Fluorkohlenwasserstoffen für die Klimatisierung von Fahrzeugen angedacht und wird bereits von ersten Herstellern eingesetzt (Stand 2017).

## 2 Einteilung

### 2.1 nach dem Verfahren

- Kompression (mechanische Energie als Antriebsleistung)
- Absorption (Hochtemperaturwärme als Antriebsleistung; siehe: Absorptionswärmepumpe)
- Adsorption (zum Beispiel Adsorption und Desorption eines Stoffes an einer Oberfläche wie Aktivkohle oder einem Zeolith, dabei wird die Adsorptionswärme frei oder auch die Desorptionswärme aufgenommen)
- Peltier-Effekt
- Magnetokalorischer Effekt

### 2.2 nach der Wärmequelle

- Aussenluft
- Abluft
- Grundwasser (mit Schluckbrunnen)
- Oberflächenwasser
- Erdwärme
- Erdwärmesonde
- CO<sub>2</sub>-Sonde
- Direktverdampfer-Sonde mit Kältemittel gefüllt
- Spiralkollektor
- flächig verlegter Wärmeübertrager mit Soleflüssigkeit befüllt
- flächig verlegter Wärmeübertrager mit Kältemittel befüllt
- thermisch aktivierte Fundamente
- Abwärme von industriellen Anlagen
- Abwasserwärmerückgewinnung (AWRG)
- Nutzung von Latenter Wärme in Form eines Eisspeichers

### 2.3 nach der Wärmenutzung:

- Kühlen
- Gefrieren
- Warmwasser
- Heizung
- mit Flächenheizung Fussbodenheizung, Wandheizung, Deckenheizung
- mit Heizkörpern, Radiatoren, Konvektoren
- mit Gebläse-Konvektoren

### 2.4 nach der Arbeitsweise:

Es gibt verschiedene physikalische Effekte, die in einer Wärmepumpe Verwendung finden können. Die wichtigsten sind:

- Die Verdampfungsenthalpie bei Wechsel des Aggregatzustandes (flüssig/gasförmig);

- die Reaktionswärme bei Mischung zweier verschiedener Stoffe;
- die Temperaturabsenkung bei der Expansion eines (nicht idealen) Gases (Joule-Thomson-Effekt);
- der thermoelektrische Effekt;
- das Thermotunneling-Verfahren;
- sowie der magnetokalorische Effekt.

## 2.5 Nach Gebäudetechnik

Wärmepumpen werden vielfach auch zur Erwärmung von Wasser für die Gebäudeheizung (Wärmepumpenheizung) und Bereitstellung von Warmwasser eingesetzt. Eingesetzt werden können Wärmepumpen sowohl allein, in Kombination mit anderen Heizungsarten, sowie in Fern- und Nahwärmesystemen. Zu letzterem zählt z. B. die Kalte Nahwärme. Üblich sind die folgenden Kombinationen (Abkürzungen in Klammern):

- Wasser/Wasser-Wärmepumpe (WWWP) mit Entzug der Wärme aus dem Grundwasser über Förder- und Schluckbrunnen, aus Oberflächenwässern oder Abwässern
- Sole/Wasser-Wärmepumpe (SWWP), als Wärmequellen dienen:
  - Erdwärmesonden und Erdwärmekollektoren (Spiralkollektoren, Grabenkollektoren, Erdwärmekörbe etc.)
  - die Sonnenenergie über Sonnenkollektoren und Pufferspeicher
  - der Umgebung über Massivabsorber, Energiezaun, o. ä.
- Luft/Wasser-Wärmepumpe (LWWP) mit Entzug der Wärme aus Abluft oder Aussenluft, seltener auch mit Vorerwärmung durch Erdwärmetauscher, Fassadenkollektoren oder ähnlichem; Wärmeabgabe über wasserführende Heizsysteme, preiswert und häufig verwendet
- Luft/Luft-Wärmepumpen (LLWP) werden nur in grossen Gebäuden zur Erwärmung oder Kühlung der Zuluft von Lüftungsanlagen (Klimaanlagen) verwendet.

## 2.6 nach der Bauart

- Monoblock-Wärmepumpen
- Split-Wärmepumpen

# 3 Funktionsprinzip

## 3.1 Elektrisch angetriebene Kompressions-Wärmepumpe

Die elektrisch angetriebene Kompressions-Wärmepumpe stellt den Hauptanwendungsfall von Wärmepumpen dar. Das Kältemittel wird in einem geschlossenen Kreislauf geführt. Es wird von einem Verdichter angesaugt, verdichtet und dem Verflüssiger zugeführt. Der Verflüssiger ist ein Wärmeüberträger, in dem die Verflüssigungswärme an ein Fluid – zum Beispiel an einen Warmwasserkreis oder an die Raumluft – abgegeben wird. Das verflüssigte Kältemittel wird dann zu einer Entspannungseinrichtung geführt (Kapillarrohr, thermisches oder elektronisches Expansionsventil). Durch die adiabate Entspannung wird das Kältemittel abgekühlt. Der Saugdruck wird durch die Entspannungseinrichtung in Kombination mit der Förderleistung des Verdichters in der Wärmepumpe so eingestellt, dass die Satttdampftemperatur des Kältemittels unterhalb der Umgebungstemperatur liegt. In dem Verdampfer wird somit Wärme von der Umgebung an das Kältemittel übertragen und führt zum Verdampfen des Kältemittels. Als Wärmequelle kann die Umgebungsluft oder ein Solekreis genutzt werden, der die Wärme aus dem Erdreich aufnimmt. Das verdampfte Kältemittel wird dann von dem Verdichter angesaugt. Aus dem oben beschriebenen Beispiel ist ersichtlich, dass durch Einsatz der elektrisch betriebenen Wärmepumpe bei dem vorausgesetzten Temperaturniveau kein wesentlich

höherer thermischer Wirkungsgrad gegenüber der konventionellen Direktbeheizung möglich ist. Das Verhältnis verbessert sich zugunsten der elektrisch angetriebenen Wärmepumpe, wenn Abwärme auf hohem Temperaturniveau als untere Wärmequelle genutzt werden kann oder die Geothermie auf hohem Temperaturniveau unter Verwendung eines geeigneten Erdwärmekollektors genutzt werden kann.

### **3.2 Wärmepumpe mit Öl- oder Gasmotorantrieb**

Ein deutlich höherer thermischer Wirkungsgrad kann erreicht werden, wenn die Primärenergie als Gas oder Öl in einem Motor zur Erzeugung technischer Arbeit zum direkten Antrieb des Wärmepumpenverdichters genutzt werden kann. Bei einem exergetischen Wirkungsgrad des Motors von 35 % und einer Nutzung der Motorabwärme zu 90 % kann ein gesamtthermischer Wirkungsgrad von 1,8 erzielt werden. Allerdings muss der erhebliche Mehraufwand gegenüber der direkten Beheizung berücksichtigt werden, der durch wesentlich höhere Investitionen und Wartungsaufwand begründet ist. Es gibt jedoch bereits Gaswärmepumpen am Markt (ab 20 kW Heiz-/Kühlleistung aufwärts), welche mit Service-Intervallen von 10.000 Stunden (übliche Wartungsarbeiten für Motor) und alle 30.000 Betriebsstunden für den Ölwechsel auskommen und so längere Wartungsintervalle haben als Kesselanlagen. Zusätzlich ist zu bemerken, dass bestimmte Hersteller von motorgetriebenen Gaswärmepumpen diese in Serienproduktion herstellen, welche in Europa auf Lebensdauern von mehr als 80.000 Betriebsstunden kommen. Dies ist der Fall aufgrund des ausgeklügelten Motorenmanagements, der niedrigen Drehzahlen und der optimierten Geräteprozesse.

## **4 Bauart**

### **4.1 Überblick**

Geht es um die Bauart einer Wärmepumpe, sind heute zwei Varianten erhältlich. Der grösste Teil aller Umweltheizungen wird als Monoblockwärmepumpe hergestellt. Dabei befinden sich alle für den Betrieb benötigten Komponenten (Bsp.: Verdampfer, Verdichter, Verflüssiger, Expansionsventil) in einer kompakten Einheit, die sich im Innen- oder im Aussenbereich aufstellen lässt.

### **4.2 Split**

Luft-Wärmepumpen sind darüber hinaus auch in der von Klimageräten bekannten Splitbauweise erhältlich. Sie bestehen dabei aus mindestens einer Aussen- sowie einer Inneneinheit, welche durch Kältemittelleitungen miteinander verbunden sind. Die Ausseneinheit enthält den Ventilator, den Verdampfer sowie den Verdichter und damit alle Bauteile, die im Betrieb Geräusche verursachen. In der Inneneinheit befinden sich hingegen nur der Verflüssiger und das Expansionsventil. Ausserdem enthält die Inneneinheit die erforderliche Technik, um die Anlage an das übrige Heizsystem anzuschliessen. Sie arbeitet besonders leise und lässt sich daher nahezu überall installieren.

## **5 Geschichte**

### **5.1 Dampfkomppressionsmaschine**

Die Geschichte der Wärmepumpe begann mit der Entwicklung der Dampfkomppressionsmaschine. Sie wird je nach Nutzung der zu- oder der abgeführten Wärme als Kältemaschine oder als Wärmepumpe bezeichnet. Ziel war noch lange Zeit die künstliche Eiserzeugung zu Kühlzwecken. Dem aus den USA stammenden Jacob Perkins ist 1834 der Bau einer entsprechenden Maschine als erstem gelungen. Sie enthielt bereits die vier Hauptkomponenten einer modernen Wärmepumpe: einen Kompressor, einen Kondensator, einen Verdampfer und ein Expansionsventil.

Lord Kelvin sagte die Wärmepumpenheizung bereits 1852 voraus, indem er erkannte, dass eine «umgekehrte Wärmekraftmaschine» für Heizzwecke eingesetzt werden könnte. Er erkannte, dass eine solche Heizeinrichtung dank dem Wärmeentzug aus der Umgebung (Luft, Wasser, Erdreich) weniger



Primärenergie benötigen würde als beim konventionellen Heizen. Aber es sollte noch rund 85 Jahre dauern, bis die erste Wärmepumpe zur Raumheizung in Betrieb ging. In dieser Periode wurden die Funktionsmuster der Pioniere auf der Basis einer rasch fortschreitenden wissenschaftlichen Durchdringung insbesondere auch durch Carl von Linde und des Fortschritts der industriellen Produktion durch verlässlichere und besser ausgelegte Maschinen ersetzt. Die Kältemaschinen und -anlagen wurden zu industriellen Produkten und im industriellen Massstab gefertigt. Um 1900 lagen die meisten fundamentalen Innovationen der Kältetechnik für die Eisherstellung und später auch die direkte Kühlung von Lebensmitteln und Getränken bereits vor. Darauf konnte später auch die Wärmepumpentechnik aufbauen.

## 5.2 Brüdenkompression

In der Periode vor 1875 wurden Wärmepumpen erst für die Brüdenkompression (offener Wärmepumpenprozess) in Salzwerken mit ihren offensichtlichen Vorteilen zur Holz- und Kohleinsparung verfolgt. Der österreichische Ingenieur Peter von Rittinger versuchte 1857 als erster, die Idee der Brüdenkompression in einer kleinen Pilotanlage zu realisieren. Vermutlich angeregt durch die Experimente von Rittinger in Ebensee, wurde in der Schweiz 1876 von Antoine-Paul Piccard von der Universität Lausanne und dem Ingenieur J.H. Weibel vom Unternehmen Weibel-Briquet in Genf die weltweit erste wirklich funktionierende Brüdenkompressionsanlage mit einem zweistufigen Kompressor gebaut. 1877 wurde diese erste Wärmepumpe der Schweiz in der Saline Bex installiert. Um 1900 blieben Wärmepumpen Visionen einiger Ingenieure. Der Schweizer Heinrich Zoelly schlug als erster eine elektrisch angetriebene Wärmepumpe mit Erdwärme als Wärmequelle vor. Er erhielt dafür 1919 das Schweizer Patent 59350. Aber der Stand der Technik war noch nicht bereit für seine Ideen. Bis zur ersten technischen Realisierung dauerte es noch rund zwanzig Jahre. In den USA wurden ab 1930 Klimaanlage zur Raumkühlung mit zusätzlicher Möglichkeit zur Raumheizung gebaut. Die Effizienz bei der Raumheizung war allerdings bescheiden.

Während und nach dem Ersten Weltkrieg litt die Schweiz an stark erschwerten Energieimporten; in der Folge baute sie ihre Wasserkraftwerke stark aus. In der Zeit vor und erst recht während des Zweiten Weltkriegs, als die neutrale Schweiz vollständig von kriegführenden faschistisch regierten Ländern umringt war, wurde die Kohleknappheit erneut zu einem grossen Problem. Dank ihrer Spitzenposition in der Energietechnik bauten die Schweizer Firmen Sulzer, Escher Wyss und Brown Boveri in den Jahren 1937 bis 1945 rund 35 Wärmepumpen und nahmen sie in Betrieb. Hauptwärmequellen waren Seewasser, Flusswasser, Grundwasser und Abwärme. Besonders hervorzuheben sind die sechs historischen Wärmepumpen der Stadt Zürich mit Wärmeleistungen von 100 kW bis 6 MW. Ein internationaler Meilenstein ist die in den Jahren 1937/38 von Escher Wyss gebaute Wärmepumpe zum Ersatz von Holzöfen im Rathaus Zürich. Zur Vermeidung von Lärm und Vibrationen wurde ein erst kurz zuvor entwickelter Rollkolbenkompressor eingesetzt. Diese historische Wärmepumpe beheizte das Rathaus während 63 Jahren bis ins Jahr 2001. Erst dann wurde sie durch eine neue, effizientere Wärmepumpe ersetzt. Zwar wurden durch die erwähnten Firmen bis 1955 noch weitere 25 Wärmepumpen gebaut. Die in den 1950er und 1960er Jahren laufend fallenden Erdölpreise führten dann aber zu einem dramatischen Verkaufseinbruch für Wärmepumpen. Im Gegensatz dazu blieb das Geschäft im Brüdenkompressionsbereich weiterhin erfolgreich. In anderen europäischen Ländern wurden Wärmepumpen nur sporadisch bei gleichzeitigem Kühlen und Heizen (z. B. Molkereien) eingesetzt. In Deutschland wurde 1968 die erste erdgekoppelte Wärmepumpe für ein Einfamilienhaus in Kombination mit einer Niedertemperatur-Fussbodenheizung von Klemens Oskar Waterkotte realisiert.

Das Erdölembargo von 1973 und die zweite Erdölkrise 1979 führten zu einer Verteuerung des Erdöls um bis zu 300 %. Diese Situation begünstigte die Wärmepumpentechnik enorm. Es kam zu einem eigentlichen Wärmepumpenboom. Dieser wurde aber durch zu viele inkompetente Anbieter im Kleinwärmepumpenbereich und den nächsten Ölpreiszerfall gegen Ende der 1980er Jahre jäh beendet. In

den 1980er Jahren wurden auch zahlreiche von Gas- und Dieselmotoren angetriebene Wärmepumpen gebaut. Sie waren allerdings nicht erfolgreich. Nach einigen Betriebsjahren hatten sie mit zu häufigen Pannen und zu hohen Unterhaltskosten zu kämpfen. Demgegenüber setzte sich im Bereich grösserer Wärmeleistung die als «Totalenergiesysteme» bezeichnete Kombination von Blockheizkraftwerken mit Wärmepumpen durch. So wurde an der ETH-Lausanne nach dem Konzept von Lucien Borel und Ludwig Silberring durch Sulzer-Escher-Wyss 1986 eine 19,2-MW-Totalenergieanlage mit einem Nutzungsgrad von 170 % realisiert. Als grösstes Wärmepumpensystem der Welt mit Meerwasser als Wärmequelle wurde 1984–1986 durch Sulzer-Escher-Wyss für das Fernwärmenetz von Stockholm ein 180-MW-Wärmepumpensystem mit 6 Wärmepumpeneinheiten zu je 30 MW geliefert. Die Palette der Wärmequellen wurde erweitert durch thermoaktive Gebäudeelemente mit integrierten Rohrleitungen, Abwasser, Tunnelabwasser und Niedertemperatur-Wärmenetze.

1985 wurde das Ozonloch über der Antarktis entdeckt. Darauf wurde 1987 mit dem Montreal-Protokoll eine weltweite konzertierte Aktion zum rigorosen Ausstieg aus den FCK-Kältemitteln beschlossen. Dies führte zu weltweiten Notprogrammen und einer Wiedergeburt von Ammoniak als Kältemittel. Innerhalb von nur vier Jahren wurde das chlorfreie Kältemittel R-134a entwickelt und zum Einsatz gebracht. In Europa wurde auch die Verwendung brennbarer Kohlenwasserstoffe wie Propan und Isobutan als Kältemittel vorangetrieben. Auch Kohlenstoffdioxid gelangt vermehrt zum Einsatz. Nach 1990 begannen die hermetischen Scrollkompressoren die Kolbenkompressoren zu verdrängen. Die Kleinwärmepumpen wurden weniger voluminös und wiesen einen geringeren Kältemittelinhalt auf. Der Markt für Kleinwärmepumpen benötigte aber noch einen gewissen „Selbstreinigungseffekt“ und konzertierte flankierende Massnahmen zur Qualitätssicherung, bevor gegen das Ende der 1980er Jahre ein erfolgreicher Neustart möglich wurde.

### 5.3 Jüngste Entwicklung

Ab 1990 begann eine rasante Verbreitung der Wärmepumpenheizung. Dieser Erfolg fusst auf technischen Fortschritten, grösserer Zuverlässigkeit, ruhigeren und effizienteren Kompressoren sowie besserer Regelung – aber nicht weniger auch auf besser ausgebildeten Planern und Installateuren, Gütesiegeln für Mindestanforderungen und nicht zuletzt auch auf einer massiven Preisreduktion. Dank Leistungsregulierung durch kostengünstigere Inverter und aufwändigere Prozessführungen vermögen heute Wärmepumpen auch die Anforderungen des Sanierungsmarktes mit hoher energetischer Effizienz zu erfüllen.