

# AVES Pfannenstil

Aktion für vernünftige Energiepolitik Schweiz (AVES)  
Regionalgruppe Pfannenstil  
c/o Dr. Hans R. Moning AG, Gotthardstrasse 10, 8800 Thalwil  
Postkonto 80-10120-3  
www.aves-zh.ch



---

BULLETIN Nr. 63

November 2010

---

Liebe Leserin, lieber Leser

Mit Wärmepumpen können wir einem Medium ausserhalb unseres Hauses – beispielsweise der Umgebungsluft, Gewässern oder dem Erdreich – Wärme entziehen, um damit unsere Wohnung zu heizen. Das für den Laien Verblüffende daran ist, dass die Temperatur des "angezapften" Mediums tiefer sein kann als die von uns angestrebte Raumtemperatur. Allerdings ist die Wärme nicht ganz zum "Nulltarif" zu bekommen. Dem Prozess muss nämlich Energie zugeführt werden – in der Regel in Form von Elektrizität. Wie Wärmepumpen funktionieren, zeigt Arthur Ruh im Hauptbeitrag dieses Bulletins in fundierter Art und Weise auf.

Wärmepumpen helfen, die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen wirksam zu reduzieren. Ihr Betrieb setzt jedoch eine gesicherte Stromversorgung voraus. Und damit sind wir bereits beim zweiten Thema der vorliegenden Schrift. Am Beispiel des Projekts Linthal 2015, das die Axpo zusammen mit dem Kanton Glarus vorantreibt, zeigen wir, was die Elektrizitätswirtschaft vorausschauend in eine sichere Stromversorgung investiert. Herzstück dieses Vorhabens ist das Pumpspeicherwerk Limmern. Mit Linthal 2015 rüstet sich der Axpo Konzern für den steigenden Bedarf an Spitzen- und Regelenergie. Damit lassen sich kurzfristig auftretende Divergenzen zwischen Angebot und Nachfrage unverzüglich ausgleichen – nicht zuletzt im Hinblick auf den zunehmenden Anteil an stochastisch anfallender erneuerbarer Energie im europäischen Stromnetzverbund, an den auch unser Land angeschlossen ist.

AVES Regionalgruppe Pfannenstil  
Hans R. Moning

## Inhalt

Pumpspeicherwerke – ideal im Zusammenspiel mit Wind- und Sonnenenergie	Seite 2
Wärmepumpen	Seite 6

## **Pumpspeicherwerke – ideal im Zusammenspiel mit Wind- und Sonnenenergie**

Hans R. Moning, Dr. sc. techn. ETH

**Im europäischen Stromnetzverbund, an dem auch die Schweiz angeschlossen ist, gewinnt die Windenergie zunehmend an Bedeutung. Besonders in den Küstenländern der europäischen Union wird die Windenergienutzung intensiv ausgebaut. Dies hat eine Zunahme an stochastischer Energie zur Folge, deren Verfügbarkeit nicht zuverlässig planbar ist. Windenergie fällt je nach Windverhältnissen an. Auch Sonnenenergie ist nur am Tag bei günstigen atmosphärischen Bedingungen für die Stromerzeugung nutzbar. Stromkonsumenten – Privathaushalte, Unternehmen und öffentliche Einrichtungen – sind jedoch darauf angewiesen, dass Strom unverzüglich geliefert wird, wenn sie diesen brauchen.**

### **Angebot und Nachfrage müssen jederzeit im Gleichschritt laufen**

Idealerweise müsste überschüssige stochastische Energie, die in Zeiten mit geringer Nachfrage anfällt, gespeichert und bei hohem Bedarf wieder in das Netz eingespeist werden können. Leider lässt sich elektrische Energie in grösseren Mengen nicht direkt speichern. Eine einleuchtende Lösung, die in der Schweiz dank hierfür idealen topografischen Verhältnissen bereits seit vielen Jahren praktiziert wird, sind Pumpspeicherwerke. Mit Speicherkraftwerken kann dank der in Form von Wasser in einem Stausee gespeicherten Energie die Stromproduktion sehr schnell an Stromverbrauchsspitzen angepasst werden. Pumpspeicherwerke ermöglichen überdies, den Vorgang umzukehren. In Phasen, in denen überschüssige elektrische Energie verfügbar ist, nutzen sie diese, um Wasser mit leistungsstarken Pumpen in höher gelegene Stauseen zurück zu pumpen. Die Pumpspeicherung ist eine bewährte Methode, um Angebot und Nachfrage in einem Stromnetz umweltfreundlich und wirtschaftlich auszugleichen. Sie erfüllt damit eine für eine zuverlässige, gesicherte Stromversorgung wichtige komplementäre Funktion zur zunehmenden Nutzung stochastischer erneuerbarer Energien.

### **Vorausschauend in eine sichere Stromversorgung investieren**

Bei Linthal am Fuss des Klausenpasses wird zurzeit das grösste Wasserkraftwerk der Schweiz gebaut, das Pumpspeicherwerk Limmern. Dieses ist das Herzstück des Projekts Linthal 2015, in das der Axpo Konzern 2,1 Milliarden Franken investiert. Seine Turbinen werden dereinst eine Leistung von 1000 MW erzeugen - praktisch gleich viel wie das Kernkraftwerk Gösgen.

Die heute bereits bestehenden Anlagen der Kraftwerke Linth-Limmern AG (KLL), eines Partnerwerks von Axpo (85%) und des Kantons Glarus (15%), umfassen die Kraftwerke Muttsee, Tierfeld und Linthal. Sie nutzen die Wasserkräfte im Quellgebiet der Linth und des Sernf mit einem Einzugsgebiet von rund 140 km<sup>2</sup>. Die Maschinen sind für eine Leistung von 450 MW ausgelegt. Mit dem vorstehend erwähnten Ausbauprojekt Linthal 2015 wird die Leistung auf 1450 MW erhöht. Damit werden die KLL ab 2015/16 unter den leistungsstärksten Wasserkraftanlagen der Schweiz rangieren.

Ein weiteres wesentliches Element des Ausbauprojekts ist die Vergrösserung des Speichervolumens des Muttsees durch den Bau einer zusätzlichen Staumauer von 9 Mio. Kubikmeter auf rund 25 Mio. Kubikmeter, was fast einer Verdreifachung entspricht. Die neue Mauer wird mit einer Kronenlänge von über 1000 Metern die längste Staumauer der Schweiz sein.



Blick auf Limmernsee und Alpen: Die neuen Kraftwerksanlagen kommen grösstenteils unterirdisch zu liegen.  
(Quelle Axpo AG)

Die Hauptarbeiten des Vorhabens wurden im Sommer dieses Jahres in Angriff genommen. In Spitzenzeiten stehen bis zu 500 Arbeitskräfte im Einsatz. Gearbeitet wird im Dreischicht-Betrieb rund um die Uhr an sieben Tagen pro Woche. Die Inbetriebnahme der ersten Turbine ist gegen Ende 2015 geplant, die drei weiteren sollen im Lauf des Jahres 2016 ans Netz gehen.

Auch die Umweltaspekte wurden frühzeitig in die Planung einbezogen. Im Rahmen einer Umweltverträglichkeitsprüfung und einer Schutz- und Nutzungsplanung wurden in enger Zusammenarbeit mit Behörden und Umweltverbänden entsprechende Massnahmen erarbeitet.

### **Regelung der Stromnetze – eine grosse technische Herausforderung**

Mit Linthal 2015 rüstet sich der Axpo Konzern für den steigenden Bedarf an Spitzen- und Regelenergie. Damit lassen sich kurzfristig auftretende Divergenzen zwischen Angebot und Nachfrage unverzüglich ausgleichen – nicht zuletzt im Hinblick auf den zunehmenden Anteil an stochastischer Energie, vorwiegend aus Windkraftwerken, im europäischen Netzverbund. Ein weiteres Argument für die Investition in Pumpspeichieranlagen ist die Öffnung des Strommarktes. Da der Strom im freien Markt von den Verbrauchern irgendwo eingekauft werden kann, drängen sich für die Regelung der Stromnetze vermehrt Systemdienstleistungen wie beispielsweise das Bereitstellen von Reserven auf. Die für einen flexiblen Betrieb konzipierten, leistungsfähigen Anlagen im Kanton Glarus werden in Zukunft massgeblich zur Sicherheit und Zuverlässigkeit der Stromversorgung der Schweiz beitragen.

# Wärmepumpen

Dr. Arthur Ruh, dipl. Physiker ETH

**Die Heizleistung einer elektrisch angetriebenen Wärmepumpe ist zwei- bis fünfmal grösser als die ihr zugeführte elektrische Leistung. Das ist kein Widerspruch zum Energiegesetz, sondern die zusätzliche Wärme wird der Umgebung entnommen.**

## Prinzip der Wärmepumpe

Wärme fliesst niemals von selbst von tieferer Temperatur zu höherer Temperatur<sup>1</sup>, aber durch Einsatz von Arbeit kann Wärme von tieferer Temperatur zu höherer Temperatur „hochgepumpt“ werden. Eine Wärmepumpe kann also z.B. der kalten Umgebungsluft Wärme entziehen (wodurch diese noch ein wenig kälter wird) und dem warmen Heizkreislauf Wärme zuführen. Dazu muss Arbeit geleistet werden, indem z.B. ein Elektromotor einen Kompressor antreibt. Wenn von den unvermeidlichen aber geringen Verlusten abgesehen wird, gilt dabei folgende Bilanz:

Der Umgebung entnommene Wärme + dem Motor zugeführte Energie = an den Heizkreislauf abgegebene Wärme.

Es gibt verschiedene Bauarten von Wärmepumpen. Neben den Kompressions-Wärme-pumpen, die mit einem Elektromotor oder einem Verbrennungsmotor angetrieben werden, gibt es noch die Sorptions-Wärmepumpen. Hier wird nur die am weitesten verbreitete Bauart, die elektrisch angetriebene Kompressions-Wärmepumpe, betrachtet.

Die aus der Umgebung entnommene und durch einen Wärmeaustauscher (Verdampfer) der Wärmepumpe zugeführte Wärme lässt das Arbeitsmedium der Wärmepumpe verdampfen. Der Dampf wird durch einen Kompressor auf einen hohen Druck gebracht und einem zweiten Wärmeaustauscher (Verflüssiger) zugeführt. Dort kondensiert der Dampf und gibt dabei die freiwerdende Kondensationswärme an den Heizkreislauf ab. Vom Verflüssiger fliesst das nun wieder flüssige Arbeitsmedium über ein Expansionsventil, in dem der Druck abgebaut wird, zurück in den Verdampfer.

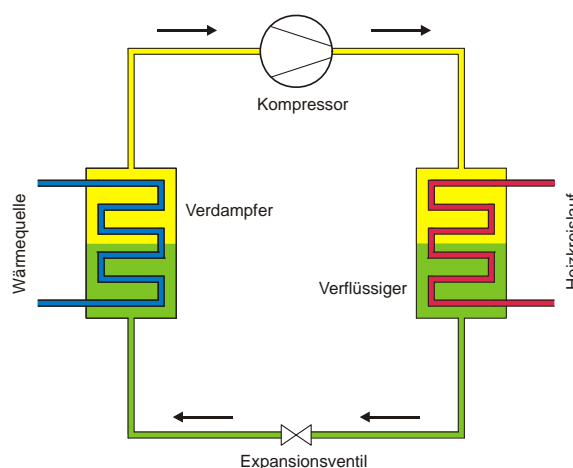


Abbildung 1: Schema einer Wärmepumpe

<sup>1</sup> Das ist eine der möglichen Formulierungen des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik. Siehe Anhang.

Abbildung 1 zeigt schematisch den Kreislauf einer Wärmepumpe. Das Medium der Umgebung (Luft oder Wasser), dem die Wärme entnommen wird, ist blau eingezeichnet, und das Wasser des Heizkreislaufs ist rot dargestellt. Das Arbeitsmedium im flüssigen Zustand ist grün und im gasförmigen Zustand gelb.

### Arbeitsmedien

Als Arbeitsmedium für Wärmepumpen dienten früher Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), hauptsächlich R22 (Chlordifluormethan,  $\text{CHClF}_2$ ). Da FCKW für den Abbau der Ozonschicht verantwortlich gemacht worden sind, wurde ihre Verwendung verboten. Heute werden weniger reaktive Arbeitsmedien verwendet, wie Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Butan ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ), Tetrafluorethan ( $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$ ) und Gemische von Fluorkohlenwasserstoffen (z.B.  $\text{CH}_2\text{F}_2 + \text{CHF}_2\text{CF}_3$  oder  $\text{CH}_2\text{F}_2 + \text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4 + \text{C}_2\text{HF}_5$ ). Diese sind allerdings weniger effizient als R22.

### Wärmequellen

Als Wärmequelle können die Umgebungsluft (Abbildung 2), das Grundwasser (Abbildung 3), Erdkollektoren (Abbildung 4) oder Erdsonden (Abbildung 5) dienen.

### Kennzahlen

Für Wärmepumpen wird als Maß für den „Wirkungsgrad“ die *Leistungszahl* angegeben. Der Begriff „Wirkungsgrad“ wird möglichst vermieden, weil dieser für Wärmekraftmaschinen definiert ist. Die Leistungszahl ist definiert als das Verhältnis von abgegebener Wärme  $Q$  zu zugeführter Arbeit  $W$ :

$$\varepsilon = \frac{Q}{W} .$$

Die theoretisch maximal erreichbare Leistungszahl  $\varepsilon_m$  ist durch den zweiten Hauptsatz begrenzt und wird bestimmt durch die Temperaturen der warmen ( $T_1$ ) und der kalten ( $T_2$ ) Seite der Wärmepumpe:

$$\varepsilon_m = \frac{T_1}{T_1 - T_2} .$$

Die Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$  sind in Kelvin (K) einzusetzen<sup>2</sup>.

Die technisch erreichbare Leistungszahl  $\varepsilon$  beträgt etwa 50 % der maximalen Zahl  $\varepsilon_m$ :

$$\varepsilon = 0.5 \cdot \varepsilon_m .$$

Beispiel einer Luft-Wasser-Wärmepumpe:

Die Temperatur der Umgebungsluft sei 2°C, die Temperatur im Heizkreislauf 35°C. Die Temperaturdifferenz zwischen der dem Verdampfer zugeführten Umgebungsluft und dem Arbeitsmedium im Verdampfer betrage 12°C. Dann ist  $T_1 = 308 \text{ K}$  ( $35 + 273$ ) und  $T_2 = 263 \text{ K}$  ( $2 - 12 + 273$ ). Für die Leistungszahl ergibt sich:

$$\varepsilon = 0.5 \cdot \frac{308}{308 - 263} = 3.4 .$$

<sup>2</sup> Temperatur in Kelvin = Temperatur in Grad Celsius + 273,15.



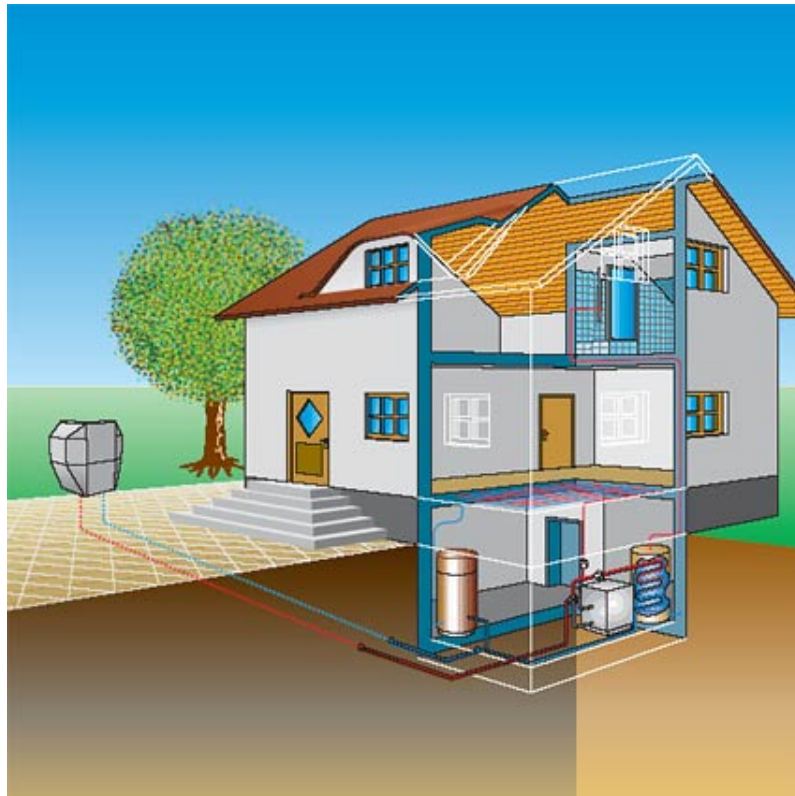


Abbildung 2: Luft-Wasser-Wärmepumpe<sup>3</sup>

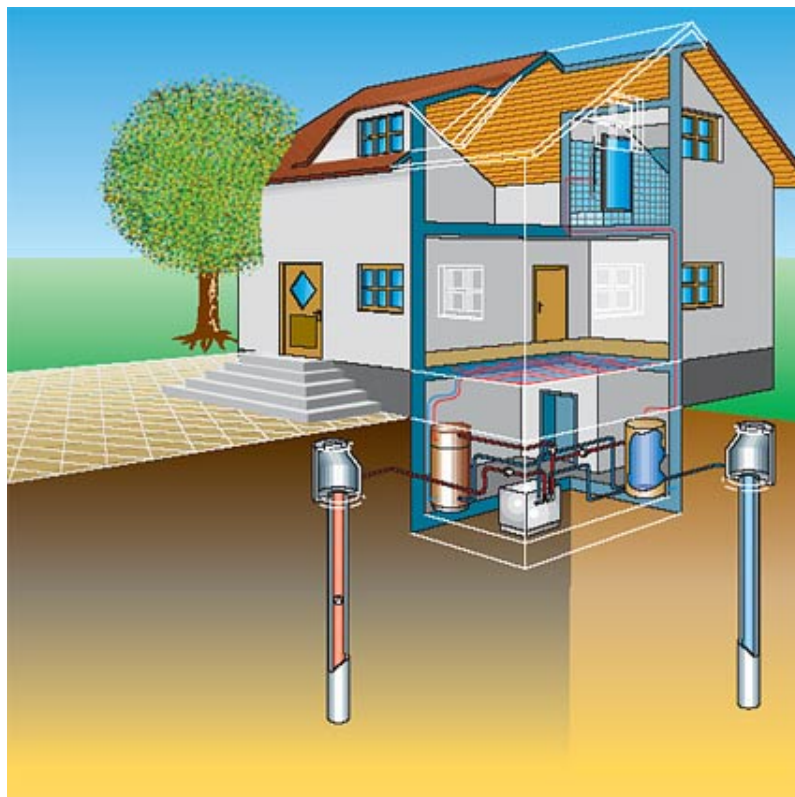


Abbildung 3: Wasser-Wasser-Wärmepumpe<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Bildquelle: reber+nenniger ag, Haustechnik, Heizung Sanitär, 3427 Utzenstorf <http://www.reber-nenniger.ch>

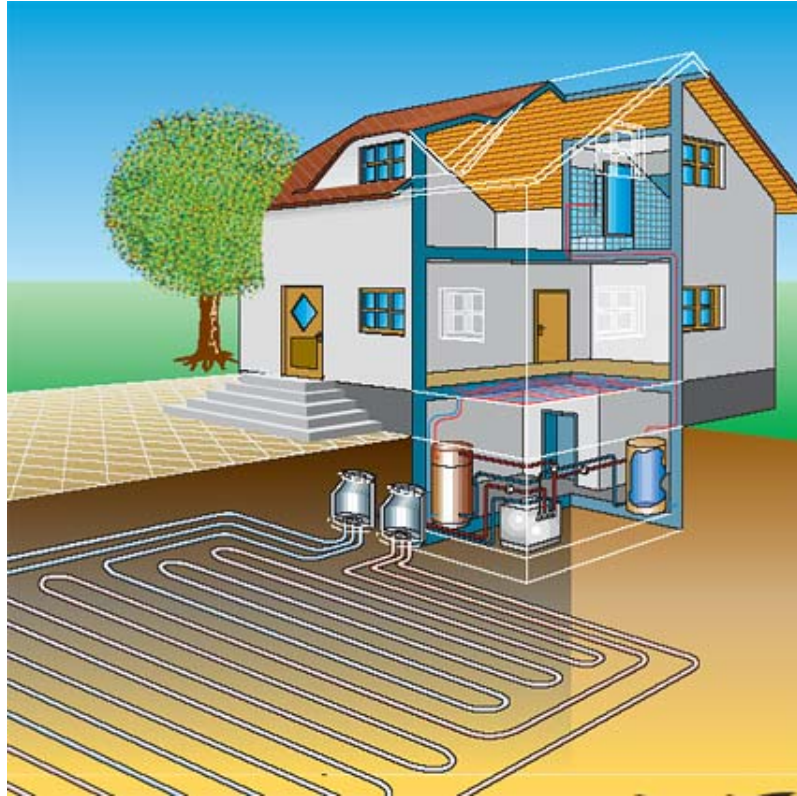


Abbildung 4: Wärmepumpe mit Erdkollector<sup>4</sup>

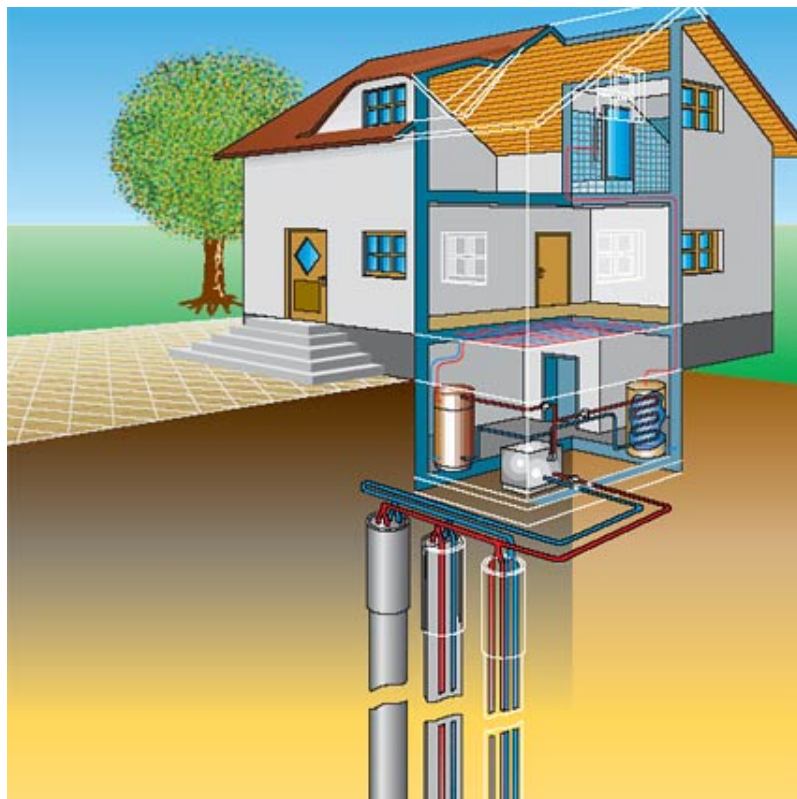


Abbildung 5: Wärmepumpe mit Erdsonden<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Bildquelle: reber+nenniger ag, Haustechnik, Heizung Sanitär, 3427 Utzenstorf <http://www.reber-nenniger.ch>

Aus der Beziehung für die Leistungszahl ist ersichtlich, dass eine Wärmepumpe umso wirksamer arbeitet, je niedriger die hohe Temperatur liegt und je höher die niedrige Temperatur ist. Daher sollten für Wärmepumpenheizungen wenn möglich Bodenheizungen statt Radiatorenheizungen verwendet werden, da diese mit tieferen Vorlauftemperaturen arbeiten können. Ferner haben Wasser-Wasser-Wärmepumpen aus zwei Gründen in der Regel höhere Leistungszahlen als Luft-Wasser-Wärmepumpen. Erstens kann die Temperatur des Grundwassers oder der Sole (Wasser-Frostschutzmittel-Gemisch) der Erdkollektoren oder der Erdsonde nicht so tief absinken wie die Temperatur der Umgebungsluft. Zweitens ist die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Arbeitsmedium bei flüssiger Wärmequelle (Wasser oder Sole) kleiner als bei gasförmiger Wärmequelle (Umgebungsluft).

Bei der Berechnung der Leistungszahl wird nur die dem Kompressor zugeführte Energie betrachtet und die für den Betrieb des Gebläses (einer Luft-Wasser-Wärmepumpe) und der verschiedenen Umwälzpumpen benötigte Energie ist nicht eingerechnet. Zudem bildet sich bei einer Luft-Wasser-Wärmepumpe unter bestimmten Umgebungsbedingungen auf der Luftseite des Verdampfers eine Eisschicht, die periodisch durch Energiezufuhr abgetaut werden muss. Zur Berücksichtigung dieser zusätzlich aufzuwendenden Energien wurde eine neue Kennzahl eingeführt, der COP-Wert (*Coefficient of Performance*). Dieser ist natürlich stets kleiner als die Leistungszahl. Leider wird gelegentlich nicht klar unterschieden zwischen Leistungszahl und COP-Wert.

Sowohl die Leistungszahl als auch der COP-Wert hängen von den Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$  ab und gelten nur für einen bestimmten Betriebszustand der Wärmepumpe. Da während einer Heizsaison die Aussentemperatur und damit  $T_2$  einen weiten Bereich durchläuft und auch  $T_1$  variieren kann, wurde eine weitere Kennzahl eingeführt, die *Jahresarbeitszahl*  $\beta$ . Sie ist das Verhältnis zwischen der während einer Heizsaison total abgegebenen Wärme zur total zugeführten elektrischen Energie.

## Entwicklung der COP-Werte

In den Jahren 1993 bis 2003 wurden im Wärmepumpen-Testzentrum Winterthur-Töss Norm- und Feldprüfungen an Wärmepumpen durchgeführt. Ab 2003 wurde der Testbetrieb in einem neuen Prüfzentrum am Neu-Technikum Buchs weitergeführt. Die Testresultate zeigen für die COP-Werte einen stetigen Anstieg.

### Luft-Wasser-Wärmepumpen

Die Prüfungen wurden für eine Lufttemperatur von 2°C und eine Heizungs-Vorlauftemperatur von 35°C durchgeführt.

Die durchschnittlichen COP-Werte der Luft-Wasser-Wärmepumpen stiegen zwischen 1993 und 2004 von etwa 2.3 auf etwa 3.5 an und hielten sich seither auf ungefähr diesem Wert, wobei die gemessenen Werte der einzelnen Wärmepumpen zwischen 3.0 und 3.9 streuen.

### Sole-Wasser-Wärmepumpen

Die Tests wurden für eine Soletemperatur von 0°C und eine Heizungs-Vorlauftemperatur von 35°C durchgeführt.

Die mittleren COP-Werte der Sole-Wasser-Wärmepumpen stiegen in den Jahren 1993 bis 2000 von etwa 3.9 auf etwa 4.4 und blieben seither etwa konstant. Die gemessenen Werte streuen zwischen 4.0 und 5.0.

## Betriebsarten

### Monovalent

Die Wärmepumpenanlage ist so ausgelegt, dass sie auch bei den tiefsten Aussentemperaturen noch eine ausreichende Heizleistung liefert.



## Monoenergetisch

Bei sehr tiefen Aussentemperaturen wird die (elektrisch betriebene) Wärmepumpe durch eine elektrische Zusatzheizung unterstützt. Dazu kann zum Beispiel ein Elektroheizstab im Heizwasser-Pufferspeicher dienen. Üblicherweise wird weniger als etwa 5 % der Heizenergie durch die Zusatzheizung gedeckt.

## Bivalent

Bei bivalentem Betrieb wird die Heizenergie von zwei unterschiedlichen Wärmeerzeugern geliefert. Wenn bei sehr tiefen Aussentemperaturen die tiefstmögliche Betriebstemperatur der Wärmepumpe unterschritten ist oder die Heizleistung der Wärmepumpe nicht ausreicht, wird eine Gas- oder Ölheizung in Betrieb genommen. Bei bivalent-parallelem Betrieb sind die Wärmepumpe und die zusätzliche Heizung gleichzeitig in Betrieb. Bei bivalent-alternativem Betrieb heizt entweder die Wärmepumpe oder der zusätzliche Wärmeerzeuger. Die bivalente Betriebsart wird heute kaum noch gewählt.

## Anhang

### Wärme

Bis in die Mitte des 18. Jahrhundert wurde zwischen den Begriffen „Wärme“ und „Temperatur“ oft nicht klar unterschieden, eine Verwirrung, die sich bis heute in manchen Redewendungen des alltäglichen Sprachgebrauchs widerspiegelt. Leider wird der Begriff „Wärme“ auch heute noch (und nicht nur im alltäglichen Sprachgebrauch) häufig in missverständlicher Weise verwendet. Zwar wird „Wärme“ nicht mehr mit „Temperatur“ verwechselt, aber gelegentlich im Sinn von *innerer Energie* gebraucht, was unbedingt vermieden werden sollte. Auch die irreführenden Begriffe „Wärmeinhalt“ und „innere Wärme“ sollten nicht verwendet werden.

Es ist möglich, den Begriff *Wärme* streng axiomatisch zu definieren, so dass Missverständnisse ausgeschlossen werden. Dieser Weg ist jedoch aufwendig und etwas anspruchsvoll. Eine etwas vereinfachte, aber widerspruchsfreie Definition der Wärme lautet folgendermassen:

Wärme ist Energie, die aufgrund einer Temperaturdifferenz übertragen wird.

Genauso wenig, wie gesagt werden kann, ein System in einem bestimmten Zustand *enthalte* Arbeit, kann von einem System gesagt werden, es *enthalte* in einem bestimmten Zustand Wärme. Ein System kann in einem Prozess Arbeit abgeben, oder es kann ihm in einem Prozess Arbeit zugeführt werden. Genauso kann ein System in einem Prozess Wärme abgeben, oder es kann ihm in einem Prozess Wärme zugeführt werden.

Die Einheit für die Energie im Internationalen Einheitensystem (SI, *Système International d'Unités*) ist das Joule (J). 1 Joule ist gleich 1 Wattsekunde.  $1 \text{ kWh} = 3.6 \cdot 10^6 \text{ J}$ .

Bereits bevor erkannt wurde, dass Wärme eine Form von Energie ist, wurden kalorimetrische Messungen durchgeführt, bei denen Wärmemengen miteinander verglichen wurden. Als Einheit wurde die Kalorie folgendermassen definiert:

Die Kalorie ist die Wärmemenge, die erforderlich ist, um 1 g Wasser bei normalem Atmosphärendruck von 14,5 auf 15,5 °C zu erwärmen.

Neben dieser Definition der sog. 15 °-Kalorie gibt es eine Reihe von weiteren Kalorie-Definitionen, die aber nur um etwa 1 Promille voneinander abweichen.

Für die vor der Einführung der SI-Einheiten meistens verwendete *Internationale Tafelkalorie*<sup>5</sup> gilt die Umrechnung:

$$1 \text{ kcal} = 4,1868 \text{ kJ} = 4186,8 \text{ J} .$$

Obschon heute auch der Nährwert von Nahrungsmitteln in Kilojoule ausgedrückt wird, wird in diesem Zusammenhang häufig noch der Begriff „Kalorie“ verwendet. Dabei ist mit „Kalorie“ aber

<sup>5</sup> von „Dampftafel“ (Tabellen der Wasserdampfzustände)

stets *Kilokalorie* (also  $1 \text{ kcal} = 1000 \text{ cal}$ ) gemeint! Das ist noch auf die Zeit zurückzuführen, als zwischen „kleinen“ (cal) und „grossen“ (Cal) Kalorien unterschieden wurde, eine Bezeichnungsweise und Notation, die natürlich besonders häufig zu Missverständnissen und Verwechslungen Anlass gab. Eine grosse Kalorie entsprach 1000 kleinen Kalorien ( $1 \text{ Cal} = 1000 \text{ cal}$ ). Bei Nährwerten waren dann immer die grossen „Kalorien“ gemeint. Auch heute noch machen sich linienbewusste Damen in der Regel Sorgen um „Kalorien“ und nicht um „Kilojoules“.

## Die Hauptsätze der Thermodynamik

Die Thermodynamik<sup>6</sup> baut auf drei<sup>7</sup> Hauptsätzen auf, von denen die ersten beiden besonders wichtig sind.

### Erster Hauptsatz der Thermodynamik

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik ist nichts anderes als der Energieerhaltungssatz in allgemeiner Form. Dieser besagt, dass in einem abgeschlossenen System die Gesamtenergie unverändert bleibt. Energie kann weder verschwinden noch aus dem Nichts entstehen.

Die Erkenntnis, dass ein Energieerhaltungssatz in allgemeiner Form gilt, ist nicht zuletzt der Tatsache zu verdanken, dass alle Versuche, ein *Perpetuum mobile* zu bauen, fehlschlagen. Ein *Perpetuum mobile* ist eine Maschine, die nicht, wie eigentlich der Name sagt, einfach immerfort sich nur bewegt, sondern eine Maschine, die beständig Arbeit leistet, ohne dass ihr Energie in irgendeiner Form zugeführt wird. Bereits seit 1775 weigerte sich die Pariser Akademie, weitere Vorschläge von *Perpetuum mobile*-Konstruktionen zur Begutachtung entgegenzunehmen.

Ein *Perpetuum mobile*, d.h. eine Maschine, die dauernd Arbeit abgibt, ohne dass ihr Energie zugeführt wird, verletzt den ersten Hauptsatz und wird deshalb *Perpetuum mobile erster Art* genannt. Ein *Perpetuum mobile zweiter Art* verletzt nicht den ersten, aber den zweiten Hauptsatz.

Die Aussage des ersten Hauptsatzes kann damit auch folgendermassen formuliert werden<sup>8</sup>:

Es gibt kein *Perpetuum mobile erster Art*.

### Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

Es gibt verschiedene Formulierungen des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik, die aber alle äquivalent sind. Die beiden wichtigsten stammen von R.J. Clausius (1822 – 1888) und William Thomson (1824 – 1907, seit 1892 Lord Kelvin).

Satz von Clausius (1850):

Wärme kann niemals von selbst von einem kälteren Körper auf einen wärmeren Körper übergehen.

Satz von Kelvin (1851):

Es gibt keine periodisch wirkende Maschine, die nichts anderes bewirkt als Erzeugung mechanischer Arbeit und Abkühlung eines Wärmereservoirs.

Es ist erstaunlich, dass die beiden auf den ersten Blick so völlig verschiedenen Sätze äquivalent sind, d.h. wenn der Satz von Clausius als richtig vorausgesetzt wird, kann der Satz von Kelvin bewiesen werden und umgekehrt.

<sup>6</sup> Die beiden Begriffe *Thermodynamik* und *Wärmelehre* werden häufig synonym verwendet, aber vielfach wird auch zwischen den beiden Begriffen unterschieden. Dabei beschreibt die *Wärmelehre* alles, was mit Temperatur und Wärme zusammenhängt, während die *Thermodynamik* von wenigen Axiomen, den Hauptsätzen der Thermodynamik, ausgeht und daraus eine streng mathematisch orientierte Theorie aufbaut, die aber z.B. über die Stoffeigenschaften nichts aussagen kann.

<sup>7</sup> Gelegentlich werden auch vier Hauptsätze gezählt, indem noch der „nullte Hauptsatz“ hinzugenommen wird.

<sup>8</sup> Es gibt noch andere, präzisere Formulierungen, auf die aber hier nicht eingegangen wird.

Der zweite Hauptsatz hat weitreichende Konsequenzen in der ganzen Physik. Da der zweite Hauptsatz in der Formulierung von Clausius ausgedrückt werden kann, ist es bemerkenswert, dass ein scheinbar so banaler Satz so bedeutungsvoll ist.

Ein *Perpetuum mobile zweiter Art* verletzt den zweiten Hauptsatz (in der Formulierung von Kelvin), aber nicht den ersten Hauptsatz. Daher lässt sich der zweite Hauptsatz auch in der folgenden Form ausdrücken:

Es gibt kein Perpetuum mobile zweiter Art.

Ein Perpetuum mobile zweiter Art könnte ein Schiff antreiben, indem es dem umgebenden Wasser Wärme entnimmt und vollständig in Arbeit umwandelt. Das Schiff würde nicht einmal eine Spur kälteren Wassers hinter sich zurücklassen, denn die Antriebsenergie wird für die Überwindung der Reibung und die Erzeugung der unvermeidlichen Wellen gebraucht. Reibungsarbeit und kinetische Energie der Wellen wärmen aber letzten Endes das Wasser wieder auf.

Einer Wärmekraftmaschine (z.B. Benzinmotor, Dieselmotor, Dampfmaschine, Dampfturbine oder Gasturbine) wird bei relativ hoher Temperatur Wärme zugeführt, die zum Teil in Arbeit umgewandelt wird. Wegen des zweiten Hauptsatzes muss aber unvermeidlicherweise ein Teil der Wärme bei tieferer Temperatur wieder abgegeben werden – eine Wärmekraftmaschine braucht zwingend einen Kühler. Der Wirkungsgrad ist umso besser, je grösser die Differenz zwischen hoher und tiefer Temperatur gemacht werden kann und je tiefer die niedrige Temperatur ist.

## Literatur

Enrico Fermi  
"Thermodynamics"  
Dover, New York 1956.

Walter Traupel  
"Die Grundlagen der Thermodynamik"  
Braun, Karlsruhe 1971.

Max Päsler  
"Phänomenologische Thermodynamik"  
De Gruyter, Berlin New York 1975.

Ingo Müller  
"Grundzüge der Thermodynamik  
mit historischen Anmerkungen"  
Springer, Berlin Heidelberg 2001.

Reinhard Hoffmann  
"Heizen mit der Wärmepumpe"  
Franzis, Poing 2009.

## Internet-Quellen

<http://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rmepumpe>  
[http://www.fws.ch/downloads\\_01.html#Fachpublikationen](http://www.fws.ch/downloads_01.html#Fachpublikationen)  
<http://effiziento.de/waermepumpe.html>  
[http://effiziento.de/waermepumpen-kennzahlen\\_leistungszahl\\_jahresarbeitszahl.html](http://effiziento.de/waermepumpen-kennzahlen_leistungszahl_jahresarbeitszahl.html)  
<http://institute.ntb.ch/ies/waermepumpen-testzentrum-wpz.html>  
<http://www.zogg-engineering.ch/publi/GeschichteWP.pdf>  
[http://www.waermepumpe.ch/ver/pdf/uaw\\_10\\_ref.pdf](http://www.waermepumpe.ch/ver/pdf/uaw_10_ref.pdf)  
[http://www.ur.ch/dateimanager/m\\_waermepumpen.pdf](http://www.ur.ch/dateimanager/m_waermepumpen.pdf)  
<http://www.ebl.ch/fileadmin/elektro.../Waermepumpen-Broschuere.pdf>  
[http://www.energiebuendel.li/.../Waermepumpen\\_-\\_häufig\\_gestellte\\_Fragen\\_final.pdf](http://www.energiebuendel.li/.../Waermepumpen_-_häufig_gestellte_Fragen_final.pdf)  
<http://www.eberhard-partner.ch/downloads/waermepumpen.pdf>



Eine Fülle von Informationen über energiepolitische und energietechnische Themen finden Sie im Archiv auf der Website der AVES Regionalgruppe Pfannenstil unter:

**[www.aves-zh.ch](http://www.aves-zh.ch)**