

Kai Schiefelbein  
Norbert Markus

# Die Abluftwärmepumpe – der „unbekannte“ Wärmeerzeuger

**Im Beitrag werden die Möglichkeiten der Abluftwärmepumpe dargestellt. Die Abluft/Wasser-Wärmepumpe nutzt anstelle von Umgebungswärme die Wärme, die in der Abluft des zu beheizenden Gebäudes enthalten ist. Notwendige Voraussetzung für den Einsatz einer Abluft/Wasser-Wärmepumpe zur Beheizung eines Gebäudes ist daher, dass das Gebäude mit einer mechanischen Abluftanlage ausgestattet ist. Die durch die EnEV angestoßene Entwicklung hin zu hochwärmegedämmten, luftdichten Neubauten schafft sehr gute Rahmenbedingungen für den Einsatz der in Schweden bereits heute sehr verbreiteten Abluft-Wärmepumpen.**

## The Prediction of hygienic and energetic air change rates by natural ventilation

By means of a combined simulation method, consisting of thermal building simulation including CFD the air exchange in naturally ventilated rooms is investigated. The usual basic set of equations of momentum, mass and energy balance is extended by an equation of the age of the air and additional calculation procedures for air exchange and energy efficiency. Several types of windows and geometries are modelled and simulated concerning the global, the hygienic and the energetic air change rate in a room. The results are presented for short time ventilation and continuous ventilation.

*Keywords:* natural ventilation, air change rate, short time ventilation, continuous ventilation, energetic air change rate, hygienic air change rate, air change efficiency

Dr.-Ing. K.Schiefelbein, Dipl.-Ing. (FH)  
N. Markus, Stiebel Eltron GmbH & Co. KG,  
FEW, Holzminden

## 1. Einleitung

Die Energieeinsparverordnung (EnEV) [1], die seit dem Februar 2002 gültig ist, fasst die Wärmeschutzverordnung und die Heizungsanlagenverordnung zusammen (Bilder 1 und 2). Die Energieeinsparverordnung begrenzt den zulässigen Primärenergieeinsatz für die Beheizung, das Lüften und die Brauchwasserbereitung in einem Gebäude.

Wie man in Bild 3 erkennen kann, ergibt sich der Primärenergiebedarf eines Gebäudes als Produkt aus dem Wärmebedarf für die Heizung und die Trinkwassererwärmung und einer Anlagenaufwandzahl. Diese beschreibt die Effizienz der zur Trinkwassererwärmung, Lüftung und Heizung eingesetzten Anlagentechnik. Die eingesetzte Anlagentechnik hat somit nunmehr Einfluss auf die Erteilung oder Nicht-Erteilung einer Baugenehmigung. Sicherlich wird dies zur weiteren Verbreitung effizienter und ökologisch sinnvoller Systeme zur Wärmezeugung führen, da anders als in der Vergangenheit, als der Einsatz solcher Systeme einzig eine „Gewissensentscheidung“ des Bauherren darstellte, jetzt auch das Interesse des Staates an solchen Systemen eindeutig zum Ausdruck gebracht wird.

In besonderem Maße wird die Wärmepumpe von der EnEV profitieren, da sie den größten Teil der benötigten Heizwärme der Umwelt entzieht und diese Wärme mittels des Einsatzes eines nur kleinen Teils hochwertiger Energie (im allgemeinen elektrischer Strom) auf das von der Heizungsanlage benötigte Temperaturniveau „transformiert“. Damit leistet Sie einen wesentlichen Beitrag zur Einsparung von Primärenergie einerseits und CO<sub>2</sub>-Emissionen andererseits. Während sich in Deutschland die am weitesten verbreitete Sole/Wasser-Wärmepumpe, die die Umgebungswärme dem Erdreich entzieht, und die Luft/Wasser-Wärmepumpe, die die Außenluft als Wärmequelle nutzt, einer bescheidenen

Bekanntheit erfreuen, ist die Abluft/Wasser-Wärmepumpe hierzulande beinahe unbekannt. Dies ist insofern etwas erstaunlich, als beispielsweise in Schweden, einem Land mit nur etwa zehn Prozent der Bevölkerung Deutschlands jährlich rund 10 000 Abluftwärmepumpen installiert werden. Im Folgenden sollen daher die Möglichkeiten und Grenzen der Abluft/Wasser-Wärmepumpe näher beleuchtet werden.

## 2. Lüftung von Wohngebäuden

Die Abluft/Wasser-Wärmepumpe nutzt anstelle von Umgebungswärme die Wärme, die in der Abluft des zu beheizenden Gebäudes enthalten ist. Notwendige Voraussetzung für den Einsatz einer Abluft/Wasser-Wärmepumpe zur Beheizung eines Gebäudes ist daher, dass das Gebäude mit einer mechanischen Abluftanlage ausgestattet ist. Diese Forderung stellt bei genauerer Betrachtung jedoch keinen Nachteil dar. Häuser, die der EnEV entsprechen, müssen zur Aufrechterhaltung einer ausreichenden Raumluftqualität, dem Erhalt der Bausubstanz und dem vernünftigen Umgang mit Energie ohnehin mit einer mechanischen Lüftungsanlage ausgestattet werden. In der EnEV wird vor dem Hintergrund der in der Verordnung geforderten Gebäudedichtigkeit von einem 0,2-fachen freien Luftwechsel über Fugen und sonstige Undichtigkeiten ausgegangen. Das heißt, dass in dem Gebäude enthaltene Luftvolumen wird „von selbst“ lediglich 0,2-mal in der Stunde ausgetauscht. Unstrittig ist jedoch, dass für eine ausreichende Raumluftqualität und für die notwendige Abfuhr von Feuchte aus den Räumen ein etwa 0,5-facher Luftwechsel benötigt wird, wie ihn auch die DIN 1946 [2] für Wohnungen fordert. Um diesen Luftwechsel zu erreichen, ist die Fensterlüftung ein ungeeignetes Mittel [3,4]. Ihre wesentlichen Nachteile bestehen darin, dass



Bild 1: Elemente der Energieeinsparverordnung

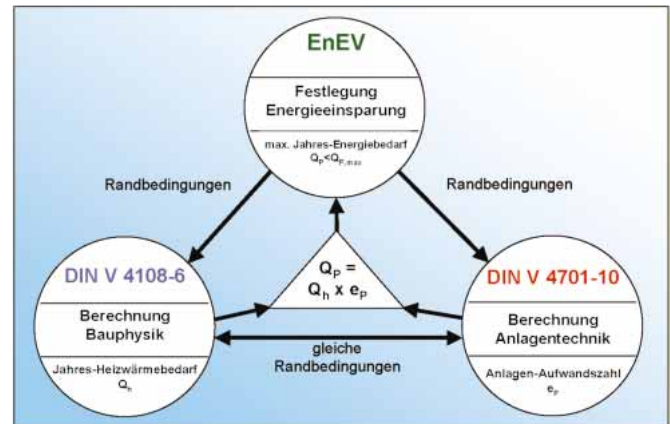


Bild 2: Wirkung der EnEV

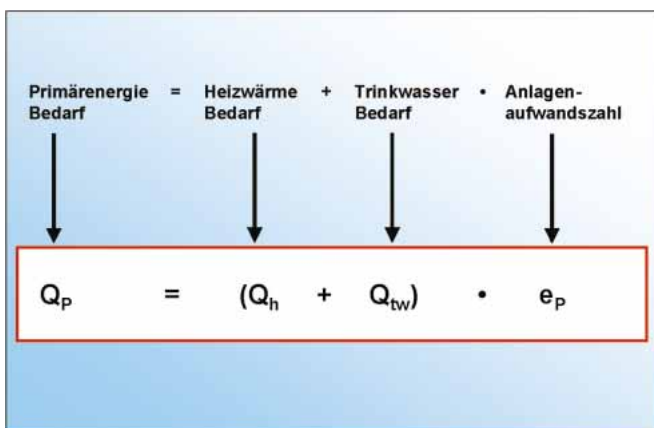


Bild 3: Ermittlung des Primärenergiebedarfs

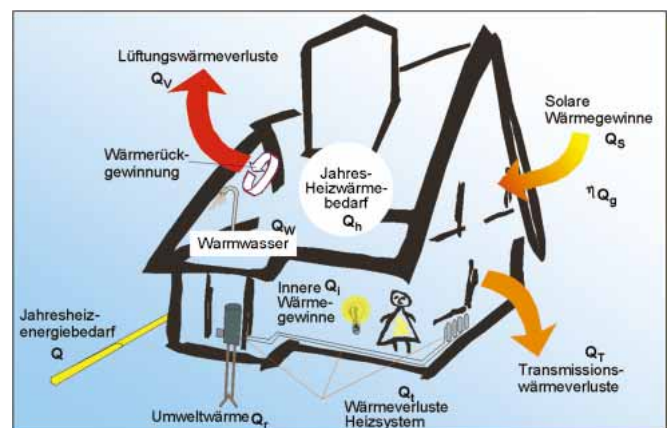


Bild 4: Anteile der Wärmeverluste

- der Luftwechsel in Abhängigkeit von der Windstärke stark variiert und in der Größe schwer einzuschätzen ist
- die Durchströmungsrichtung innerhalb der Wohnung häufig ungünstig ist (von Toilette und Bad über den Flur in Schlaf- und Wohnräume)
- die theoretisch sinnvolle Stoßlüftung mindestens nachts nicht praktikabel ist (alle zwei Stunden für 10 Minuten Fenster öffnen) und somit
- im Endeffekt entweder deutlich zu wenig oder viel zu viel gelüftet wird.

- Mechanische Lüftungsanlagen dagegen
- stellen den hygienisch erforderlichen Luftwechsel zuverlässig sicher
  - gewährleisten eine effiziente Querlüftung
  - verhindern durch die Filterung der Zuluft das Eindringen von Staub, Pollen und Insekten in die Wohnung und
  - verbessern die Schalldämmung der Wohnung gegenüber der Außenwelt erheblich

### 3. Möglichkeiten der Wärmerückgewinnung aus Abluft

Wird ein Gebäude aus den obigen Gründen mit einer mechanischen Lüftungsanlage ausgestattet, so ist die Rückgewinnung zumindest eines Teils der in der Abluft enthaltenen Wärme für die Energiebilanz des Gebäudes von höchster Bedeutung. Bild 4 zeigt, dass die Lüftungswärmeverluste bei einem Gebäude, das dem Niedrigenergiehausstandard (30 % besser als WSVO 1995) genügt, fast 50 % der gesamten Wärmeverluste betragen. Somit könnte der Heizenergiebedarf des Gebäudes halbiert werden, wenn ein vollständiger Rückgewinn der Wärme der Abluft möglich wäre.

Zur Rückgewinnung der Wärme der Abluft sind im Wesentlichen drei verschiedene Möglichkeiten bekannt:

1. Luft/Luft-Wärmeaustauscher (Rekuperator) z.B. Kreuz-Gegenstrom-Wärmeaustauscher
2. Abluft-Wärmepumpe zum Erwärmen von Trinkwasser und

3. Abluft-Wärmepumpe zum Heizen und Erwärmen von Trinkwasser  
Bild 5 zeigt, wieviel Energie sich mit den verschiedenen Verfahren aus der Abluft zurückgewinnen lässt.

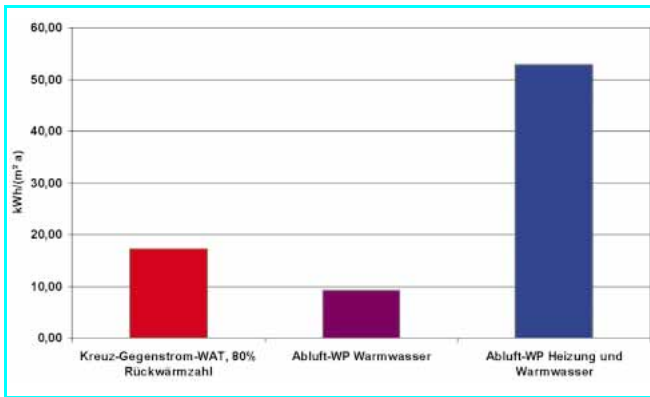
Die Abluft-Wärmepumpe zum Heizen und zur Warmwasserbereitung stellt also grundsätzlich eine sehr attraktive Möglichkeit der Wärmerückgewinnung aus Abluft dar.

### 4. Berechnung der Wärmerückgewinnung mittels Abluftwärmepumpe

Es sei eine Ablufttemperatur von 21°C und eine relative Feuchte der Abluft von 46 % (mittlerer Prüfpunkt bei der thermodynamischen Prüfung von Lüftungsgeräten für die bauaufsichtliche Zulassung [6]) unterstellt. Die spezifische Energie (Enthalpie)  $h$  dieser Abluft lässt sich berechnen als

$$h = c_{pL} \cdot t + x \cdot (r_0 \cdot c_{pW} \cdot t) \quad (1)$$

mit der spezifischen Wärmekapazität der Luft  $c_{pL}$  (1,004 kJ/kg), ihrer Tempera-



**Bild 5: Möglichkeiten der Wärmerückgewinnung und Potenziale (berechnet nach DIN V 4701-10 [5])**

tur  $t$ , ihrer absoluten Feuchte  $x$ , der Verdampfungsenthalpie des Wassers  $r_0$  (2500 kJ/kg) und der spezifischen Wärmekapazität des Wassers  $c_{pW}$  (1,86 kJ/kg). Um die gesuchte spezifische Enthalpie  $h$  der feuchten Luft bestimmen zu können, muss zunächst noch die absolute Feuchte der Luft  $x$  berechnet werden. Diese ergibt sich als

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_s}{p_{ges} - \varphi \cdot p_s} \quad (2)$$

mit der relativen Feuchte der Luft  $\varphi$ , dem Sättigungsdampfdruck des Wassers  $p_s$  und dem atmosphärischen Druck  $p_{ges}$ . Der Sättigungsdampfdruck des Wassers hängt nur von der Temperatur ab. Bei 21°C liegt er bei 0,0245 bar. Bei einem atmosphärischen Druck von 1 bar ergibt sich somit eine absolute Feuchte der Luft von 7,09 g Wasserdampf je kg trockener Luft.

Damit lässt sich nun die spezifische Enthalpie der feuchten Luft berechnen als

$$h = 1,004 \cdot 21 + 0,00709 \cdot (2500 + 1,86 \cdot 21) = 39,1 \text{ kJ/kg trockene Luft} \quad (3)$$

Kühlt man diese Luft im Verdampfer einer Wärmepumpe ab, so entzieht man ihr dabei Energie. Sinnvollerweise kühlt man die Luft gerade so weit ab, dass ein Bereifen des Verdampfers knapp vermieden wird, damit der Verdampfer nicht zyklisch abgetaut werden muss. Dies ist der Fall, wenn die abgekühlte Luft mit etwa 4°C aus dem Verdampfer austritt. Wie man bei einem Blick auf ein  $h$ - $x$ -Diagramm (Bild 6) erkennt, kommt es bei der Abkühlung der Luft zur Unterschreitung ihres Taupunktes. Vereinfachend könnte man nun annehmen, dass die Luft gesättigt ( $\varphi = 1$ ) aus dem Verdampfer austritt. In der Realität wird die Luft jedoch wegen der bei den geschilderten Verhältnissen bei etwa -3°C liegenden Ver-

dampfungstemperatur des Kältemittels den Verdampfer mit etwa 88 % relativer Luftfeuchtigkeit verlassen. Da sich beim Abkühlen der Luft die absolute Menge des Wassers nicht ändert, finden wir hinter dem Verdampfer der Wärmepumpe einerseits Luft mit 88 % relativer Feuchte (entspricht nach Gleichung 2 einem Wassergehalt von 4,45 g Wasser je kg trockener Luft) und andererseits den verbliebenen Rest von 2,64 g Wasser pro kg trockener Luft in flüssiger Form vor. Die spezifische Enthalpie dieses Stoffgemischs kann berechnet werden als

$$h = c_{pL} \cdot t + x_2 \cdot (r_0 + c_{pW} \cdot t) + (x_1 - x_2) \cdot c_{w} \cdot t \quad (4)$$

mit der absoluten Feuchte  $x_2$  der Luft nach der Abkühlung, der absoluten Feuchte  $x_1$  der Luft vor der Abkühlung und der spezifischen Wärmekapazität  $c_{w}$  des flüssigen Wassers (4,19 kJ/(kg K)).

Damit ergibt sich eine spezifische Enthalpie der abgekühlten Luft von

$$h = 15,2 \text{ kJ/kg trockene Luft} \quad (5)$$

Der Luft werden bei der Abkühlung also 23,9 kJ Energie je kg trockener Luft entzogen. Der Wärmestrom, der der Abluft entzogen wird, kann berechnet werden als

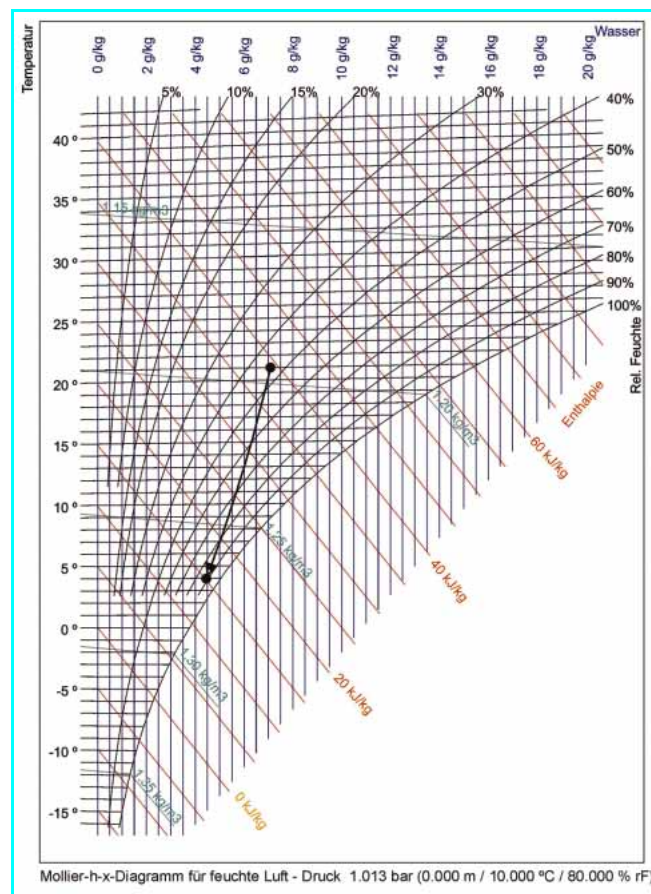
$$\dot{Q}_{Abluft} = \frac{\dot{V}_{feuchte\ Luft} \cdot \rho_{feuchte\ Luft} \cdot \Delta h}{1 + x} \quad (6)$$

mit der Dichte der feuchten Abluft

$$\rho_{feuchte\ Luft} = \frac{1 + x}{1 + 1,61 \cdot x}$$

$$\frac{\rho_{ges}}{R_{Luft} \cdot T_{Luft}} = 1,179 \text{ kg/m}^3 \quad (7)$$

Unterstellt man eine Raumhöhe von 2,5 m, so ergibt sich bei dem üblichen 0,4-fachen Anlagenluftwechsel ein Wärmestrom von 7,8 W/m² Nutzfläche, der der Abluft entzogen wird.



**Bild 6: Abkühlung feuchter Luft im  $h$ - $x$ -Diagramm**

### 5. Heizleistung der Abluftwärmepumpe

Wird eine Fußbodenheizung mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 35°C und einer zugehörigen Rücklauf-temperatur von 28°C eingesetzt, so hat beispielsweise die *Stiebel Eltron* Abluftwärmepumpe vom Typ LWA 303 im Heizbetrieb eine Jahresarbeitszahl von 4,3. Diese kann als über das Jahr gemittelte Leistungszahl der Wärmepumpe aufgefasst werden. Aus der Leistungszahl der Wärmepumpe einerseits und dem der Abluft entzogenen Wärmestrom andererseits kann die Heizleistung der Wärmepumpe berechnet werden als

$$\dot{Q}_{\text{Heiz, WP}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Abluft}}}{1 - 1/\epsilon} = 10,1 \text{ W/m}^2 \quad (8)$$

mit der mittleren Leistungszahl  $\epsilon = 4,3$  der Wärmepumpe.

Zwei wichtige Ergebnisse der obigen Rechnungen sollen an dieser Stelle festgehalten werden:

1. Die Heizleistung einer Abluftwärmepumpe hängt von der Nutzfläche des zu beheizenden Gebäudes ab, da diese bei konstantem Luftwechsel den als Wärmequelle zur Verfügung stehenden Abluftvolumenstrom festlegt. Es macht daher keinen Sinn, eine Abluftwärmepumpe mit hoher Heizleistung in einem kleinen Gebäude einzusetzen. Die Folge wäre lediglich, dass die Abluft stärker als gewünscht abgekühlt würde, so dass der Verdampfer der Wärmepumpe zyklisch abgetaut werden müsste. Damit würde die über einen längeren Zeitraum zur Verfügung gestellte Heizwärme sogar kleiner ausfallen als bei einer in der Heizleistung an das Gebäude angepasste Abluftwärmepumpe. Außerdem würde die Leistungszahl und damit die energetische Effizienz der Wärmepumpe sinken.
2. Die Heizleistung einer Abluftwärmepumpe fällt generell recht gering aus. So liegt die Heizleistung einer auf die Gebäudegröße angepasste Abluftwärmepumpe bei einer Nutzfläche von 130 m<sup>2</sup> bei etwa 1,3 kW und bei einer Nutzfläche von 185 m<sup>2</sup> bei etwa 1,9 kW.

### 6. Leistungszahl der Abluftwärmepumpe

Dem Nachteil der relativ kleinen Heizleistung einer Abluftwärmepumpe steht

der Vorteil sehr hoher Leistungszahlen gegenüber. Für die hohen Leistungszahlen gibt es zwei Gründe:

1. Anders als bei der Außenluft/Wasser-Wärmepumpe muss der Verdampfer einer Abluft/Wasser-Wärmepumpe nicht abgetaut werden. Bei richtiger Dimensionierung der Abluftwärmepumpe kann statt dessen das Bereifen des Verdampfers von vornherein vermieden werden, indem die Abluft nur bis etwa + 4°C abgekühlt wird.
2. Das Temperaturniveau der Wärme in der Abluft ist mit Temperaturen zwischen + 4°C und + 20°C sehr hoch. Damit muss die Wärmepumpe nur eine kleine Temperaturdifferenz zwischen der Temperatur der Wärmequelle und der Temperatur des Heizungswassers überbrücken. Bei solch kleinen Temperaturdifferenzen arbeiten Wärmepumpen prinzipbedingt besonders effizient.

Die theoretisch möglichen Leistungszahlen, die aufgrund der höheren Wärmequellentemperaturen noch über denen von Sole/Wasser-Wärmepumpen liegen, werden von den derzeit am Markt befindlichen Geräten nicht ganz erreicht. Die *Stiebel Eltron* Abluftwärmepumpen LWA 203 (ca. 1,4 kW Heizleistung) und LWA 303 (ca. 2,0 kW Heizleistung) erreichen Leistungszahlen von etwa 4,0 im Heizbetrieb bei 35°C Wasservorlauftemperatur, 20°C Ablufttemperatur und 40 % relativer Feuchte der Abluft bzw. etwa 3,7 bei der Erwärmung von Trinkwasser von 15°C auf 55°C. Die Jahresarbeitszahl für den Heizbetrieb errechnet sich damit nach DIN V 4701-10 [5] als

$$\beta_{\text{WP}} = 1,068 \cdot \epsilon = 1,068 \cdot 4,4 = 4,3 \quad (9)$$

Die Abluft/Wasser-Wärmepumpe liegt mit diesen Werten ziemlich genau auf dem Niveau der im Anhang der DIN V 4701-10 tabellierten Werte der Sole/Wasser-Wärmepumpe und klar über den Standard-Werten der Außenluft/Wasser-Wärmepumpe nach DIN V 4701-10 von lediglich etwa 3,3.

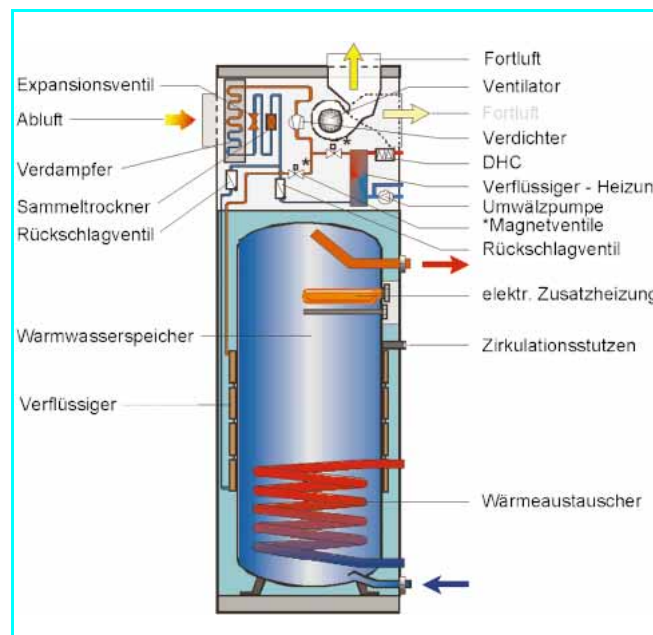
### 7. Aufbau einer Abluft/Wasser-Wärmepumpe

Den prinzipiellen Aufbau einer Abluft/Wasser-Wärmepumpe zeigt Bild 7.

Die Abluft wird von dem in der Wärmepumpe angeordneten Ventilator über den Verdampfer der Wärmepumpe angesaugt. Das im Verdampfer der Wärmepumpe verdampfende Kältemittel entzieht der Abluft Wärme. Anschließend wird die Luft als Fortluft über einen möglichst kurzen Kanal ins Freie geleitet. Das Kältemittel wird vom Verdichter der Wärmepumpe auf ein höheres Druck- und Temperaturniveau verdichtet und gibt dann im Verflüssiger seine Wärme an das Heizungswasser bzw. an das Trinkwasser ab, wobei es sich wieder verflüssigt. Nachdem das flüssige Kältemittel im Expansionsventil entspannt wurde, kann es dann auf einem niedrigen Druck- und Temperaturniveau wieder Wärme aus der Abluft aufnehmen.

Die in Bild 7 dargestellte Wärmepumpe weist einige Besonderheiten auf, die im Folgenden kurz dargestellt werden:

- Zur besseren Anpassung an das Ge-



**Bild 7: Funktionsprinzip einer Abluft-Wärmepumpe**

bäude gibt es das Gerät in zwei Leistungsgrößen mit ca. 1,4 kW und ca. 2 kW Heizleistung. Damit können die Geräte bei dem üblichen 0,4-fachen Anlagenluftwechsel in Gebäuden von etwa 125 m<sup>2</sup> Nutzfläche bis ca. 200 m<sup>2</sup> Nutzfläche eingesetzt werden, ohne dass es zum unerwünschten Bereifen des Verdampfers kommt.

- Es wird ein hocheffizienter Gleichstrom-Ventilator eingesetzt, der je nach Betriebspunkt zwischen 8 W und 70 W elektrischer Leistung aufnimmt. Ein effizienter Ventilator ist bei einer Abluft-Wärmepumpe besonders wichtig, da die Lüftungsanlage in den meisten Fällen an 365 Tagen im Jahr rund um die Uhr läuft.
- Die Umschaltung vom Heiz- in den Warmwasserbetrieb erfolgt über den Kältekreis, indem das Kältemittel zu einem anderen Verflüssiger geleitet wird. Der Verflüssiger zur Erwärmung des Trinkwassers ist um den Warmwasserspeicher herumgewickelt und zusammen mit diesem eingeschäumt. Somit wird die Wärme direkt von dem kondensierenden Kältemittel auf das Trinkwasser übertragen. Dadurch lassen sich auch bei der Trinkwassererwärmung sehr hohe Leistungszahlen erreichen. Gegenüber üblichen Lösungen, bei denen das Heizungswasser über einen weiteren Wärmeaustauscher die Wärme auf das Trinkwasser überträgt, wird bei der hier gewählten Anordnung ein Wärmeübertragungsvorgang sowie für die Zeit der Trinkwassererwärmung die Antriebsenergie für die Umwälzpumpe eingespart.
- Ein in das Gerät eingebauter Durchlauferhitzer mit maximal 6,6 kW Heizleistung unterstützt die Wärmepumpe im Heizbetrieb, sofern die Heizleistung der Wärmepumpe bei tiefen Außentemperaturen alleine nicht mehr ausreicht. Die Heizleistung des Durchlauferhitzers kann dabei in sieben einzelnen Stufen zugeschaltet werden. Dadurch ist eine sehr feine Anpassung der Heizleistung an den Heizwärmebedarf möglich, so dass die Heizungsanlage ohne Pufferspeicher ausgeführt werden kann.
- Die Warmwasserbereitung kann bei der optionalen Solarvariante durch Sonnenenergie unterstützt werden. Dazu ist wie in Bild 7 dargestellt, ein Solarwärmeaustauscher mit 1,3 m<sup>2</sup> Wärmeübertragungsfläche im unteren Teil des Trinkwasserspeichers an-

geordnet. Die solare Unterstützung der Warmwasserbereitung verbessert die Effizienz des Systems erheblich, da dann, wenn über die Solarenergie das Trinkwasser bereits ausreichend erwärmt wird, die Wärmepumpe ununterbrochen im Heizbetrieb arbeiten kann. Die Temperaturdifferenzregelung der Solaranlage wird bei der Solarvariante von dem in das Gerät eingebauten Regler für die Heizungs- und Lüftungsanlage mit übernommen.

- Der in das Gerät eingebaute Regler ermöglicht neben den üblichen Funktionen wie dem Anpassen der Heizkurve, dem Einstellen der Brauchwassertemperatur, dem Regeln von zwei Heizkreisen und dem Einstellen von Heizungsprogrammen auch das Einstellen eines Lüftungsprogramms. Damit ist auch ein Absenkbetrieb der Lüftungsanlage möglich, was sich insbesondere für Wohnungen kinderloser Doppelverdiener, die den größten Teil des Tages nicht Zuhause sind, als sinnvoll herausgestellt hat. In Verbindung mit einer optionalen Fernbedienung ist darüber hinaus auch eine „freie Nachtkühlung“ möglich, bei der die Lüftung bei hohen Innentemperaturen und niedrigen Außentemperaturen in der Nacht

mit maximalem Luftdurchsatz arbeitet, um die Wohnung etwas abzukühlen.

### 8. Die Abluftwärmepumpe im Vergleich zu anderen Wärmeerzeugern: Energiebilanz

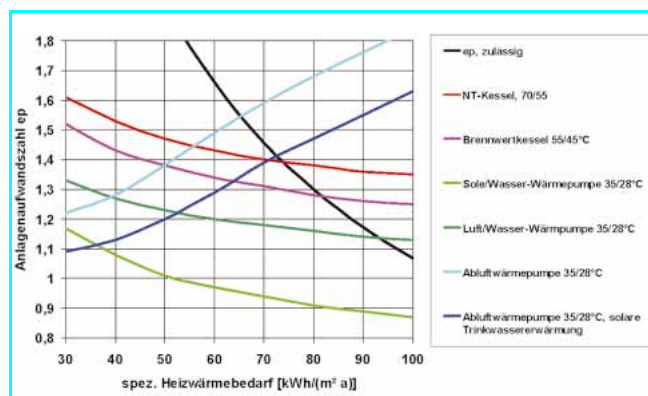
Soll die Abluftwärmepumpe im Hinblick auf ihre Energiebilanz mit anderen Wärmeerzeugern verglichen werden, so bietet es sich an, nach der Systematik der EnEV den erforderlichen Primärenergieeinsatz zur Beheizung eines Gebäudes zu betrachten. Hierzu wurden Vergleichsrechnungen für das in Bild 8 beschriebene Gebäude durchgeführt.

Alle Systeme außer der Abluftwärmepumpe wurden mit den Standardwerten nach der DIN V 4701-10 berechnet. Für die Abluftwärmepumpe wurden Herstellerdaten der Firma *Stiebel Eltron* zugrunde gelegt. In Bild 9 sind die Aufwandszahlen, die sich für die verschiedenen Heizungssysteme ergeben, dargestellt.

Die schwarze Linie stellt die maximal zulässige Anlagenaufwandszahl dar. Für alle Anlagenaufwandszahlen, die unterhalb dieser Linie verlaufen, kann eine Baugenehmigung erteilt werden.

- ◆ Nutzfläche:  $A_{Nl} = 185 \text{ m}^2$
- ◆ Verhältnis  $AV_e = 0,8$
- ◆ Dichtheit des Gebäudes durch Blower-Door-Messung nachgewiesen
- ◆ Alles in der beheizten Hülle
- ◆ Thermostatventile oder Flächenheizung 1 K
- ◆ Keine Zirkulation
- ◆ Max. zul. Jahres-Primärenergiebedarf  $q_p = 120,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$

**Bild 8: Beispielgebäude für Vergleichsrechnungen**



**Bild 9: Anlagenaufwandszahlen für ausgesuchte Heizungssysteme**

In rot ist die Anlagenaufwandszahl dargestellt, die sich nach den Standardwerten der DIN V 4701-10 für einen Niedertemperaturkessel bei 70°C Vorlauftemperatur und 55°C Rücklauftemperatur ergibt. Man erkennt, dass ein Haus, das mit einem solchen Kessel ausgerüstet ist, bis zu einem spezifischen Heizwärmebedarf von etwa 75 kWh/(m<sup>2</sup> a) die EnEV erfüllt. Man erkennt ferner, dass die Anlagenaufwandszahl mit steigendem spezifischem Heizwärmebedarf besser, das heißt kleiner, wird. Dies gilt für die meisten Wärmeerzeuger und es liegt daran, dass die Verluste bei der Übergabe der Heizwärme an den Raum, bei der Verteilung der Heizwärme im Haus und die einzusetzende Hilfsenergie nicht proportional zum spezifischen Heizwärmebedarf ansteigen.

Kommt anstelle eines Niedertemperaturkessels ein Gas-Brennwertkessel zum Einsatz, so verbessert sich die Anlagenaufwandszahl, wie die violette Linie im Diagramm zeigt. In grün ist als Referenz die Anlagenaufwandszahl einer Sole/Wasser-Wärmepumpen dargestellt. Wie bei den anderen Wärmepumpenanlagen auch wird hier ein Niedertemperaturheizsystem mit 35°C Vorlauf- und 28°C Rücklauftemperatur, also zum Beispiel eine Fußbodenheizung, eingesetzt. Mit Sole/Wasser-Wärmepumpen bzw. Wasser/Wasser-Wärmepumpen können Wohngebäude ganzjährig mit minimalem Primärenergieeinsatz beheizt werden. Im Beispiel ist die Sole/Wasser-Wärmepumpe ca. 30 % besser als der Brennwertkessel.

In hellblau ist die Anlagenaufwandszahl einer monoenergetischen Außenluft/Wasser-Wärmepumpe mit Niedertemperatur-Heizsystem dargestellt. Luft/Wasser-Wärmepumpen haben bei sehr tiefen Außentemperaturen nur eine relativ geringe Heizleistung. Daher ist es üblich, dass bei niedrigen Außentemperaturen ein elektrischer Heizstab die Wärmepumpe unterstützt, der etwa 5 % der Jahresheizarbeit übernimmt. Auch bei der Trinkwassererwärmung wurde mit einer Bereitstellung von 5 % der benötigten Wärme durch einen elektrischen Heizstab gerechnet.

Die Anlagenaufwandszahl der Abluft/Wasser-Wärmepumpe ist in türkis dargestellt. Bei ihrer Berechnung wurde eine Heizleistung von 10,1 W/m<sup>2</sup> Wohnfläche, eine Erzeugeraufwandszahl von 0,23 im Heizbetrieb und eine Erzeugeraufwandszahl von 0,27 bei der Trink-

wassererwärmung zugrunde gelegt. Der Weg zur Ermittlung dieser Daten ist im Abschnitt „Berechnung der Wärmerückgewinnung mittels Abluftwärmepumpe“ beschrieben. Die Anlagenaufwandszahl der Abluftwärmepumpe (blaue Linie im Diagramm) nimmt mit wachsendem spezifischen Heizwärmebedarf zu. Der Grund dafür ist, dass der Energieinhalt der Wärmequelle Abluft von der Größe der Wohnung und nicht von ihrem Wärmebedarf abhängt. Damit ist die für die Nutzung durch die Wärmepumpe zur Verfügung stehende Energie begrenzt und der Anteil der elektrischen Direktheizung nimmt mit zunehmendem spezifischen Wärmebedarf deutlich zu. Folglich steigt die Anlagenaufwandszahl.

Die mit einer Abluft-Wärmepumpe erreichbare Anlagenaufwandszahl ist bis zu einem spezifischen Heizwärmebedarf des Gebäudes von 55 kWh/(m<sup>2</sup> a) günstiger, als die eines NT-Kessels. Bis zu einem spezifischen Heizwärmebedarf von 50 kWh/(m<sup>2</sup> a) wird die Anlagenaufwandszahl eines Brennwertkessels unterboten. Liegt der spezifische Heizwärmebedarf des Gebäudes unter 40 kWh/(m<sup>2</sup> a), so schneidet die Abluftwärmepumpe sogar energetisch günstiger ab, als die Außenluft/Wasser-Wärmepumpe und unterbietet damit die Anlagenaufwandszahl eines Brennwertkessels um rund 10 %.

Im Abschnitt „Aufbau einer Abluft/Wasser-Wärmepumpe“ wurde bereits auf die Möglichkeit eingegangen, die Warmwasserbereitung solar zu unterstützen. Dies wirkt sich bei Abluftwärmepumpen doppelt positiv auf die Energiebilanz aus. Erstens erfolgt die Warmwasserbereitung, wie bei jeder solaren Trinkwassererwärmung, zum größten Teil mittels regenerativer Energie, zweitens wird die Wärmepumpe teilweise von der Aufgabe, das Trinkwasser zu erwärmen befreit, so dass sie längere Zeit heizen kann. Dadurch erhöht sich der Anteil der Wärmepumpe an der Jahresheizarbeit, wodurch wiederum die Anlagenaufwandszahl sinkt. Die Anlagenaufwandszahl einer Abluft-Wärmepumpe mit solarer Trinkwassererwärmung ist in Bild 9 in dunkelblau dargestellt. Bei der Berechnung wurde von einer 67 %-igen Abdeckung des Wärmebedarfs zur Trinkwasserbereitung durch die Solarenergie ausgegangen. Der Anteil der Wärmepumpe an der Jahresheizarbeit vergrößert sich allerdings nur durch den solaren Ertrag während der Heizperiode. Für die Heizperiode wurde

ein Anteil der Solarenergie an der Warmwasserbereitung von 22 % unterstellt. Damit erhöht sich für der Anteil der Wärmepumpe an der Jahresheizarbeit für einen spezifischen Wärmebedarf von 50 kWh/(m<sup>2</sup> a) von 84 % ohne solare Warmwasserbereitung auf 86 % mit solarer Warmwasserbereitung. Die Anlagenaufwandszahl einer Abluft/Wasser-Wärmepumpe mit solarer Brauchwasserbereitung liegt unterhalb eines spezifischen Heizwärmebedarfs von 50 kWh/(m<sup>2</sup> a) günstiger als die einer Außenluft/Wasser-Wärmepumpe. Ist der spezifische Heizwärmebedarf kleiner als 35 kWh/(m<sup>2</sup> a) so wird sogar die Anlagenaufwandszahl einer Sole/Wasser-Wärmepumpe unterboten. Bei einem spezifischen Heizwärmebedarf von 50 kWh/(m<sup>2</sup> a) liegt die Anlagenaufwandszahl der Abluft/Wasser-Wärmepumpe mit solarer Brauchwasserbereitung um 15 % unter der Anlagenaufwandszahl eines Brennwertkessels.

Abluft-Wärmepumpen gehören damit zu den energetisch vorteilhaftesten Systemen zur Beheizung hochwärmegeämmter Neubauten.

### Die Abluftwärmepumpe im Vergleich zu anderen Wärmeerzeugern: Kosten

Die Kosten verschiedener Heizungsanlagen wurden in Anlehnung an die VDI 2067 [7] für das Beispielgebäude nach Bild 9 berechnet. Die Struktur der Berechnung geht aus Bild 10 hervor. Das Ergebnis der Berechnungen ist in Bild 11 in Diagrammform dargestellt.

Generell ist zu erkennen, dass für die angesetzte Lebensdauer der Heizungsanlage von 15 Jahren die Kosten von den Kapitalkosten dominiert werden. Dies liegt daran, dass hier zum Beispiel Kosten für das Wärmeverteilsystem, die Wärmeübergabe an den Raum, die Wärmequellenanlage bei der Sole/Wasser-Wärmepumpe und den Öltank beim Ölkessel enthalten sind. Da ein Teil der in der Investition enthaltenen Komponenten eine größere Lebensdauer hat als 15 Jahre, könnten die Gesamtkosten der Heizungsanlage bei einer Erneuerung deutlich niedriger ausfallen.

Die Energiekosten liegen im Vergleich zu den Kapital- und Wartungskosten auch deshalb niedrig, weil der Wärmebedarf gut wärmegeämmter Neubauten, wie sie für den Kostenvergleich betrachtet wurden, nur gering ist.

**Ermittlung der Gesamtkosten pro Jahr in Anlehnung an VDI 2067**

Vollbenutzungsstunden: 1744 nach VDI 2067 Wärmeschutzverordnung  
 Spezifischer Wärmebedarf: 47 W/m² (Fußbodenheizung 35/30°C)  
 Anzahl der Personen: 4 Anzahl  
 Energieverbrauch Warmwasser: 2,00 kWh/Person Tag  
 Kapitalkosten 7% bei 15 Jahre Standzeit: 0,1030 Annuitätstabelle VDI 2067 Blatt 1 Tabelle A8

Kostenart	Einheit	Heizungssysteme				
		Öl-Zentral-Heizung	Gas-Brennwert-Heizung	Wärmepumpe Abluft	Wärmepumpe Luft-Wasser	Wärmepumpe Sole-Wasser
<b>1. Anlagendaten</b>						
Energiepreis Heizung	Ct/kWh	3,50	4,00	9,00	9,00	9,00
Energiepreis Regelung/Pumpen	Ct/kWh	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
Energiepreis Lüfter	Ct/kWh	0,00	0,00	9,00	0,00	0,00
Grundpreis pro Jahr	Euro		170,00	60,00	60,00	60,00
Wirkungsgrad Verteilung		0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
Wirkungsgrad Wärmeerzeuger		0,90	0,99	1,00	1,00	1,00
Wirkungsgrad Warmwasserbereitung		0,80	0,80	1,00	1,00	1,00
Jahres-Arbeitszahl				4,00	3,40	4,20
Jahresanteil der Wärmepumpe				0,88	0,99	1,00
Jahresanteil der Wärmepumpe für die WWB				1,00	0,90	0,90
Anteil der Lüftung QL am Wärmebedarf QN		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Lüfterstunden pro Jahr	Stunden	0	0	7000	0	0
Energieaufnahme Lüfter	kW	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00
<b>2. Investitionskosten</b>						
Wärmeerzeuger Komplett	Euro	2.500,00	3.000,00	5.600,00	8.500,00	7.200,00
Heizsystem	Euro	3.500,00	3.500,00	3.500,00	3.500,00	3.500,00
Elektro-Installation	Euro	200,00	200,00	700,00	700,00	700,00
Gasanschluß	Euro		1.300,00			
Ölkank und Lagerraum	Euro	3.100,00				
Schornstein	Euro	2.000,00	2.000,00			
Wärmequellenanlage	Euro					2.000,00
<b>2.1 Lüftungsanlage</b>						
Lüftungsgerät	Euro	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rohrsystem	Euro	0,00	0,00	3.000,00	0,00	0,00
<b>2.2 Warmwasseranlage</b>						
Warmwasserspeicher	Euro	1.000,00	1.000,00	0,00	1.000,00	1.000,00
Rohrsystem	Euro	1.000,00	1.000,00	0,00	1.000,00	1.000,00
Summe	Euro	12.600,00	11.300,00	13.100,00	14.700,00	15.400,00
<b>3. Kapitalgebundene Kosten</b>						
Kapitalkosten	Euro	1.297,80	1.163,90	1.349,30	1.514,10	1.586,20
Instandhaltung	Euro	126,00	113,00	131,00	147,00	154,00
Summe	Euro	1.423,80	1.276,90	1.480,30	1.661,10	1.740,20
<b>4. Betriebsgebundene Kosten</b>						
Wartung	Euro	130,00	130,00	0,00	0,00	0,00
Schornsteinfeger	Euro	70,00	50,00	0,00	0,00	0,00
Summe	Euro	200,00	180,00	0,00	0,00	0,00
<b>5. Verbrauchsgebundene Kosten</b>						
<b>5.1 Heizung</b>						
Jahres-Energiebedarf	kWh	8.720	8.720	8.720	8.720	8.720
Energieverbrauch Heizung	kWh	9.887	8.988	1.913	2.591	2.119
Energieverbrauch Zusatzheizung	kWh	-	-	1.246	89	0
Jahreshilfsenergiebedarf	kWh	800	600	600	600	600
Energieverbrauch Heizungsanlage	kWh	10.687	9.588	3.759	3.280	2.719
Energiekosten Heizung	Euro	442,03	601,51	416,29	373,19	322,67
<b>5.2 Lüftung</b>						
Energieverbrauch des Lüfters	kWh	0	0	700	0	0
Energiekosten Lüftung	Euro	0,00	0,00	63,00	0,00	0,00
<b>5.3 Warmwasser</b>						
Jahres-Energiebedarf	kWh	2.920	2.920	2.920	2.920	2.920
Energieverbrauch Warmwasser	kWh	3.650	3.650	730	773	626
Energieverbrauch Zusatzheizung	kWh	-	-	0	292	292
Energieverbrauch Warmwasseranlage	kWh	3.650	3.650	730	1.065	918
Energiekosten Warmwasser	Euro	127,75	146,00	65,70	95,84	82,59
<b>Energieverbrauch gesamt</b>	kWh	<b>14.337</b>	<b>13.238</b>	<b>5.189</b>	<b>4.345</b>	<b>3.636</b>
<b>Energiekosten der Anlage</b>	Euro	<b>569,78</b>	<b>747,51</b>	<b>544,99</b>	<b>469,03</b>	<b>405,26</b>
<b>Gesamtkosten der Anlage</b>	Euro	<b>2.193,58</b>	<b>2.204,41</b>	<b>2.025,29</b>	<b>2.130,13</b>	<b>2.145,46</b>

Bild 10: Heizkostenberechnung

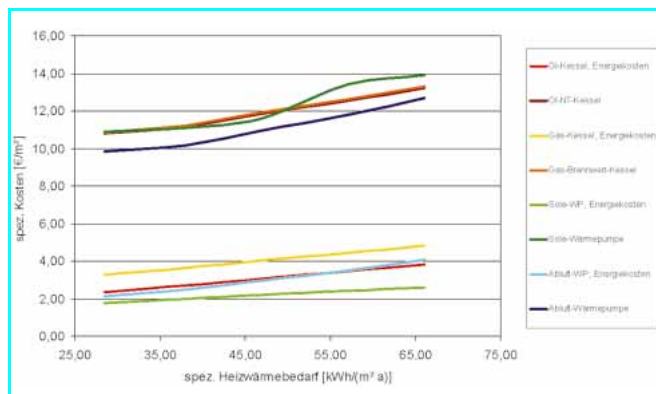


Bild 11: Vergleich der Kosten ausgesuchter Heizungs-systeme

Als Energiepreise wurden 3,5 Cent/kWh Öl, 4,0 Cent/kWh Gas, 9 Cent/kWh Wärmepumpenstrom und 12 Cent/kWh Normaltarif-Strom angenommen. Der Anteil der Abluftwärmepumpe an der Jahresheizarbeit wurde wie auch beim Vergleich der Anlagenaufwandszahlen (Bild 9) nach DIN V 4701, Teil 10 [6] berechnet. Zu den Investitionen gehören neben dem Wärmeerzeuger auch die Heizflächen, die Rohrleitungen, beim Öl-Kessel der Lagerraum und der Öltank, bei Öl- und Gaskessel der Schornstein, beim Gaskessel der Gasanschluß, bei der Sole-Wärmepumpe die Wärmequellenanlage, bei der Abluftwärmepumpe die Luftkanäle und ihre Installation sowie bei allen Wärmeerzeugern die erforderliche Elektroinstallation, bei der für alle Wärmepumpensysteme 500 € Mehrpreis für den erforderlichen Doppeltarifzähler und die zusätzlichen Sicherungen angesetzt wurden. Für die Warmwasserversorgung ist bei allen betrachteten Systemen außer der Abluftwärmepumpe ein Warmwasserspeicher erforderlich, für den pauschal 1000 € als Investition angesetzt wurden. Bei Abluftwärmepumpen ist der Warmwasserspeicher mit einem Inhalt zwischen etwa 200 und 300 Litern üblicherweise Bestandteil des Gerätes. Die jährlichen Instandhaltungsaufwendungen wurden mit 1 % der Gesamtinvestition für die Heizungs- und Warmwasseranlage angesetzt.

Für den Öl- und den Gaskessel wurden für die Wartung pauschal 130 €/Jahr und für den Schornsteinfeger 70 €/Jahr bzw. 50 €/Jahr angesetzt. Wärmepumpen müssen im Allgemeinen nicht gewartet werden.

Die mit Abstand niedrigsten Energiekosten weist die Sole/Wasser-Wärmepumpe auf. Die Abluft/Wasser-Wärmepumpe und der Ölkessel liegen trotz des deutlich höheren Energiebedarfs der Ölheizung wegen des günstigen Ölpreises auf etwa dem gleichen Niveau. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass in den Energiekosten der Abluft-Wärmepumpe der Stromverbrauch des Ventilators für die Wohnungslüftung bereits enthalten ist. Der Gas-Brennwertkessel weist wegen des über dem Ölpreis liegenden Gaspreises im Vergleich die höchsten Energiekosten auf.

Betrachtet man die Gesamtkosten der Heizungsanlage, so ist die Abluft-Wärmepumpe in diesem Vergleich eindeutig das günstigste System. Das liegt daran,

dass sie nicht gewartet werden muss, das keine Kosten für den Schornsteinfeger anfallen und dass auch die erforderliche Investition für die Anlage im Rahmen liegt. Die Sole-Wärmepumpe liegt wegen der hohen Aufwendung für die Investition bei den Gesamtkosten auf oder über den Kosten von Öl- und Gaskessel. Der Sprung in den Gesamtkosten der Sole-Wärmepumpe bei einem spezifischen Heizwärmebedarf von etwa  $50 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$  ist darauf zurückzuführen, dass die nächst größere Wärmepumpe eingesetzt werden muss. Hierdurch verteuert sich nicht nur die Wärmepumpe selbst sondern auch die Wärmequellenanlage.

### Zusammenfassung

Die durch die EnEV angestoßene Entwicklung hin zu hochwärmedämmten, luftdichten Neubauten schafft sehr gute Rahmenbedingungen für den Einsatz der in Schweden bereits heute sehr verbreiteten Abluft-Wärmepumpen. Werden sie in Wohngebäuden mit einem spezifischen Heizwärmebedarf um  $50 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$  eingesetzt, so liegen sie in Bezug auf den erforderlichen Primärenergieeinsatz mit der Gas-Brennwerttechnik auf einem Niveau. Die jährlichen Gesamtkosten der Abluft-Wärmepumpe fallen dabei geringer aus als die der betrachteten Vergleichssysteme. Quasi als „Zugabe“ erhält man kostenlos eine mechanische Lüftungsanlage, die den Wohnkomfort deutlich verbessert.

### Literatur

- [1] Energieeinsparverordnung
- [2] DIN 1946-6
- [3] Feist: Welche Chancen bietet das Passivhaus, Dokumentation der Stiebel Eltron Lüftungstagung „Die Zukunft der Lüftung“ vom 07.11.01, München
- [4] Schwarz, B.: „Lüftung – Luftströmung – Zugluft“, Vortrag anlässlich des DGH-Seminars „KWL“ am 27.09.01
- [5] DIN V 4701-10
- [6] TZWL Prüfglement
- [7] VDI 2067

### Schlüsselwörter

Wärmepumpe  
Lüftung  
Wärmerückgewinnung  
Wirtschaftlichkeit