

**Exzerpt:**

**Teil I: Nutzung von elektrischer Energie**

.....

**2. Thermodynamisch optimiertes Heizen (Seite 27 ff)**

- 2.1 Die zum Heizen benötigte Exergie
- 2.2 Quellen für Heizenergie und ihr Exergiegehalt
- 2.3 Optimierung von Gebäudeisolierung und Wärmebereitstellung
- 2.4 Zusammenfassung und Ausblick

**Link zur Originalstudie:**

<http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/broschueren/studien.html>

## **Elektrizität: Schlüssel zu einem nachhaltigen und klimaverträglichen Energiesystem**

Eine Studie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft e. V.

Juni 2010

## I.2 Thermodynamisch optimiertes Heizen

### 2.1 Die zum Heizen benötigte Exergie

#### 2.1-a Der Exergiebegriff

Es gibt unterschiedliche Energieformen. Elektrischer Strom und Wärme sind jedoch keineswegs äquivalent: Elektrizität kann man zwar vollständig in Wärme umwandeln – aber umgekehrt gilt das leider nicht. Auch mit einer idealen Wärmekraftmaschine kann man nämlich von einer Wärmemenge nur den Teil, den man ihre Exergie nennt, in Elektrizität umwandeln. „Exergie“ ist hierbei zunächst nur ein neues und handliches Wort für „technische Arbeitsfähigkeit“ oder „verfügbare Arbeit“. Die Restwärme muss selbst die ideale Wärmekraftmaschine bei der Umgebungstemperatur  $T_U$  wieder als „Anergie“ an die Umgebung abgeben.

Die Menge der aus einer Wärmemenge  $\Delta Q$  gewinnbaren Exergie  $\Delta E$  (z.B. als elektrischer Strom) hängt auf einfache Weise nur von der Arbeitstemperatur  $T$  der Wärmeentnahme und von der Umgebungstemperatur  $T_U$  für die Aufnahme der Restwärme (also der Anergie) ab. Dies wird durch eine fundamentale Gleichung beschrieben [1], wobei der Vorfaktor als Carnotfaktor bezeichnet wird (die Temperaturen beziehen sich dabei auf den absoluten Nullpunkt  $-273\text{ °C}$ , d.h. sie sind in Kelvin einzusetzen):

$$(1) \quad \Delta E = (T - T_U) / T * \Delta Q$$

Ein Zahlenbeispiel: Aus einem Wärmereservoir von  $T = 90\text{ °C}$  kann eine ideale Wärmekraftmaschine, die ihre Abwärme bei einer Kühlwassertemperatur  $T_U = 30\text{ °C}$  abgibt, theoretisch den Anteil als Strom (also als reine Exergie) gewinnen, der dem Carnotfaktor 0,17 entspricht. Die restlichen 83% der eingesetzten Wärme fallen als völlig nutzlose Anergie an. In der Praxis kann man jedoch aus technischen Gründen nur vielleicht 60% des Potenzials einer idealen Maschine realisieren, also statt mit 17% muss man sich dann etwa mit 10% Wirkungsgrad zufrieden geben.

Bei einer idealen (reversiblen) Maschine kann man Gleichung (1) auch umgekehrt lesen

$$(2) \quad \Delta Q = T / (T - T_U) * \Delta E$$

und aus der idealen Wärmekraftmaschine wird dann eine ideale Wärmepumpe: durch Aufwand von (z.B.) elektrischem Strom  $\Delta E$  kann man soviel Umgebungswärme auf eine höhere Temperatur  $T$  pumpen, dass sich auf diesem Temperaturniveau insgesamt eine Wärmemenge  $\Delta Q$  ergibt, die um den reziproken Carnotfaktor  $T / (T - T_U)$  größer ist als die dafür eingesetzte Exergie  $\Delta E$ . Der reziproke Carnotfaktor stellt also bei einem vorgegebenem Temperaturniveau der Heizung,  $T$ , und der Umgebung,  $T_U$ , einen maximalen „Hebelfaktor“ für die thermodynamische Erzeugung von Wärme aus Strom dar (in unserem obigen Zahlenbeispiel würde dieser Hebelfaktor  $1/0,17 = 6$  betragen).

#### 2.1-b Die drei Ansätze zum thermodynamisch optimierten Heizen

Bei der primitiven Wärmeerzeugung durch bloße Verbrennung wird heute immerhin meist darauf geachtet, dass keine Wärme ohne Einbindung in die Heizaufgabe bleibt. Mit Exergie (z.B. elektrischem Strom) kann man aber nutzlose Umgebungswärme mit einem beachtlichen Hebelfaktor (Gleichung (2)) zum Heizen auf ein höheres Temperaturniveau pumpen. Statt einen Brennstoff direkt zu verheizen, kann man aus ihm Strom gewinnen. Heizen, Strom erzeugen und Strom anwenden muss man also in einem ganzheitlichen Zusammenhang sehen. Die Exergie ist hierbei die maßgebliche thermodynamische Steuergröße. Ein Heizverfah-

ren, bei dem angestrebt wird, dass keine Exergie ohne Nutzen verloren geht, bezeichnen wir als „thermodynamisch optimiertes Heizen“. Hierfür gibt es drei Ansätze:

- (1) Mit Anergie kann man direkt nichts mehr anfangen – Umgebungswärme steht ja ohnehin immer zur Verfügung. Wenn man jedoch bei der Stromproduktion die Abwärme nicht als reine Anergie sondern schon oberhalb der Umgebungstemperatur  $T_U$  an ein Kühlmittel abgibt, so führt das zwar zu einer geringeren Stromausbeute, aber bei geeigneter Festlegung der Abgabetemperatur kann man mit dieser Wärme noch etwas anfangen, z.B. sie zu Heizzwecken nutzen. Dies ist der Grundgedanke der Strom-Wärme-Kopplung, für die sich in Deutschland der unzutreffende Begriff „Kraft-Wärme-Kopplung“ (KWK) durchgesetzt hat. Die KWK ist der erste Ansatz zum thermodynamischen Heizen.
- (2) Mit einer Wärmepumpe kann man Anergie, also eine Wärmemenge  $\Delta Q_U$  bei der Temperatur  $T_U$ , aus der Umgebung entnehmen, reine Exergie in Form mechanischer oder elektrische Energie  $\Delta E$  hinzugeben, und dann die Wärmemenge  $\Delta Q$  auf einem höheren Temperaturniveau  $T$  beispielsweise zu Heizzwecken nutzen. Der Wärmepumpen-Prozess ist der zweite Ansatz zum thermodynamischen Heizen.
- (3) Bei einer Wärmeübertragung geht immer Exergie verloren, weil die Wärmequelle grundsätzlich wärmer als die Wärmesenke sein muss. Aber diese Temperaturdifferenz kann man mit entsprechendem technischem Aufwand klein machen. Das Arbeiten mit kleinen Temperaturdifferenzen ist also der dritte Ansatz zum thermodynamischen Heizen. Er wird vor allem durch Flächenheizungen (Fußboden- und Wandheizungen) verwirklicht.

### 2.1–c Die zum Heizen notwendige Exergie

Der Betrieb eines Wohngebäudes erfordert drei thermische Grundaufgaben:

- (1) Heizwärme zum Ausgleich der Transmissionsverluste  $Q_T$  bereitstellen und zwar – je nach Dämmstandard und Ansprüchen der Bewohner – etwa von Anfang Oktober bis April zur Aufrechterhaltung eines Temperaturniveaus von ca. 18 °C bis 20 °C während der Nutzungszeiten. Nachts kann eine Temperaturabsenkung hingenommen werden, was energetisch am günstigsten durch eine Nachtausschaltung des Wärmeerzeugers erreicht wird.
- (2) Lüftungswärme  $Q_L$  aufbringen, zur Aufwärmung von Frischluft von der Außentemperatur ( $T_{außen}$ , im Mittel etwa 1-2 °C) auf Zimmertemperatur ( $T_{innen} = 20$  °C).
- (3) Warmwasser-Wärme  $Q_W$  liefern, um Trinkwasser aufzuwärmen von der Kaltwassertemperatur  $T_{KW}$  (ca. 15 °C) auf die Warmwassertemperatur  $T_{WW}$  (ca. 50-60 °C), ganzjährig, entweder über Durchlauf-erhitzer oder über einen Warmwasserspeicher.

Die Energie-Dienstleistung umfasst also einen Temperaturhaltevorgang (Temperierung des Innenraumes) und zwei Aufwärmvorgänge (Warmwasser und Frischluft). Für diese Aufgaben lässt sich jeweils ein minimaler Exergieinsatz errechnen.

Bisher wird jedoch in den seltensten Fällen die Frischluft im Gegenstromverfahren auf Zimmertemperatur aufgewärmt; meistens erfolgt die Aufwärmung der Frischluft dadurch, dass kalte Außenluft in der Nähe der Heizkörper in den Raum eindringt und sich durch Vermischung mit der Zimmerluft und an den warmen Innenwänden aufwärmt. Auch bei der Warmwasserversorgung werden bisher nur in seltenen Fällen die energetischen Vorteile eines Aufwärmvorganges (mit gleitender Temperatur der Wärmeübertragung) genutzt; meist wird das Warmwasser durch die Heizungsanlage bereitgestellt.

In Tabelle 1 sind die idealen Exergieverhältnisse für die Beheizung eines Gebäudes mit zwei verschiedenen Heizungsarten aufgezeigt. Bei der „idealen Heizung“ werden die oben erwähnten thermischen Grundaufgaben mit dem theoretisch minimalem Aufwand erfüllt, was in der Praxis natürlich nur angenähert möglich ist. Bei der „üblichen Heizung“ wird der gesamte Wärmebedarf in einer zentralen Anlage erzeugt und über Heizungswasser mit einer Radiator Temperatur von 50 °C in die Räume zur gekoppelten Abdeckung von Transmissions- und Lüftungswärme gebracht; auch die Bereitung des Warmwassers erfolgt direkt bei 50 °C, also ohne Ausnutzung einer gleitenden Aufwärmung.

Temperatur der Heizfläche			Ideale Heizung 20 °C		Übliche Heizung 50 °C	
Aufheizung ausgenutzt			ja		nein	
	Anteile	Energie [MWh] thermisch	Exergiefaktor, ideal	Exergie [MWh] elektrisch	Exergiefaktor, ideal	Exergie [MWh] elektrisch
Heizung	0,4	40	0,068	2,7	0,155	6,2
Lüftung	0,4	40	0,034	1,4	0,155	6,2
Warmwasser	0,2	20	0,062	1,2	0,124	2,5
<b>Gesamt</b>		<b>100</b>		<b>5,3</b>		<b>14,9</b>
<b>Exergiehebel ("Arbeitszahl")</b>			<b>18,7</b>		<b>6,7</b>	

Tab. 1:

Ideale Umrechnungsfaktoren Exergie/ Energie („Exergiefaktor“) für die drei thermischen Grundaufgaben bei thermodynamisch optimaler Wärmeversorgung eines Gebäudes mit einem gesamten jährlichen Wärmebedarf von 100 [MWh]<sub>th</sub>. Als „Exergiehebel“ oder „Arbeitszahl“ wird das Verhältnis Wärmeenergie zu Exergie bezeichnet (gerechnet mit  $T_{WW} = 50^\circ \text{C}$ ,  $T_{au\beta en} = 0^\circ \text{C}$ ; Details zur Berechnung der Werte siehe /Materialienband I.2/).

Aus einem Vergleich des notwendigen Exergie-Aufwandes für die „ideale Heizung“ und die „übliche Heizung“, der in dem jeweiligen Exergiehebel zusammengefasst ist, erkennt man die Wichtigkeit einer heizungstechnischen Optimierung durch eine gesonderte Aufwärmung von Frischluft und Warmwasser und durch Flächenheizsysteme mit niedriger Vorlauftemperatur. Die ideale heizungstechnische Optimierung verdreifacht fast den Exergiehebel (Tabelle 1) gegenüber der „üblichen Heizung“, käme also mit einem Drittel der Exergie (z.B. Strom) aus. Das exergetische Potenzial zur Wärmeerzeugung, beispielsweise durch Wärmepumpen, lässt sich also nur dann ausschöpfen, wenn mit (oder vor) der Erneuerung des Wärmeerzeugers eine thermische Sanierung und gegebenenfalls auch eine Anpassung des Heizwärmeerzeugers erfolgt. Dann kann die Vorlauftemperatur im Auslegungsfall unter 30 °C bleiben.

## 2.2 Quellen für Heizenergie und ihr Exergiegehalt

Tabelle 1 zeigt, dass für die Wärmebereitstellung in einem Gebäude nur ein geringer Exergieanteil der Energie notwendig ist; diese geringen Anforderungen werden beim thermodynamischen Heizen ausgenutzt. Bei der bloßen Verbrennung von Öl und Gas oder gar bei der direkten Stromheizung wird hingegen Exergie verschwendet.

Die direkte Stromheizung kann eigentlich nur noch dann hingenommen werden, wenn

- sich infolge einer radikalen Senkung des Wärmebedarfes eine aufwändige Heizanlage als völlig unverhältnismäßig und daher auch unwirtschaftlich herausstellt, oder
- die Strom-Verheizung nur eine Regelungslücke oder einen Engpass ausgleicht.

### 2.2–a Bloße Verbrennung

Heute wird meistens noch direkt mit Erdgas oder Heizöl geheizt. Die Verbrennung erfolgt bei hoher Temperatur und die Wärmeenergie wird durch Wärmestrahlung und Abkühlung des zunächst sehr heißen Abgases auf das Heizmedium Wasser übertragen, welches die hohen Temperaturen jedoch eigentlich nicht benötigt. Die Exergieverschwendung erfolgt also auf der Hochtemperaturseite des Kessels.

Bei einem modernen Brennwertkessel, der eine Flächenheizung (Fußboden- oder Wandheizung) betreibt, erfolgt die Auskühlung des Abgases bis in den Kondensationsbereich und der Exergieverlust bei der Wärmeübertragung auf das Heizwasser wird immerhin dort, also am kalten (!) Ende der Feuerungsanlage, sehr gering und auch unter exergetischen Gesichtspunkten befriedigend.

### 2.2–b Strom-Wärme-Kopplung bei der Stromerzeugung: KWK

In einer Verbrennungs-Kraftmaschine wird bestenfalls die Exergie der eingesetzten Wärme in Strom umgewandelt. Die unvermeidliche Anergie und die technischen Verluste der Kraftmaschine werden als Wärme an die Umgebung abgegeben. Was liegt also näher, als diese „Abwärme“ schon auf einem höheren Temperaturniveau abzugeben, und zwar nicht als Verschwendung an die Umgebung sondern als Nutzwärme zum Heizen, zur Warmwasserbereitung oder als Prozesswärme im industriellen Bereich. Man ersetzt also das Kühlmedium mit der niedrigst verfügbaren Temperatur (z.B. Flusswasser, Außenluft) durch eine technische „Umgebung“, eine Wärmesenke auf ausreichend hohem Temperaturniveau, bei der die Kühlwärme noch für thermodynamisch weniger anspruchsvolle Prozesse als Wärmequelle genutzt werden kann. Diese Kühlwärme besitzt also noch einen Rest von Exergie, der dann natürlich zur Stromerzeugung nicht mehr zur Verfügung steht. Unter idealen Bedingungen wäre diese Restexergie übrigens gerade ausreichend, um eine ideale Wärmepumpe (siehe nächster Abschnitt) anzutreiben, die eine in Menge und Temperatur gleiche Nutzwärme erzeugt. Die KWK ist also grundsätzlich ein sehr eleganter Weg, um einen gegebenen Bedarf an Strom und Wärme gleichzeitig und theoretisch optimal abzudecken.

In der Praxis gibt es jedoch schwerwiegende technische und energiewirtschaftliche Einschränkungen. Die theoretischen Vorteile der KWK erlauben es derzeit keineswegs, von vorneherein die KWK als optimale Lösung für die Versorgung mit Strom und Wärme anzusehen: eine genauere Einzelfalluntersuchung ist unumgänglich (s. Kapitel II.3).

### 2.2–c Strom-Wärme-Kopplung bei der Stromanwendung: Wärmepumpe

In einer Verbrennungs-Kraftmaschine wird auch unter praktischen Bedingungen ein großer Teil des Exergiegehaltes des Brennstoffes an das Produkt „Elektrizität“ übertragen. Unter Einsatz von Elektrizität lassen sich umgekehrt Prozesse verwirklichen, bei denen Umgebungswärme, also reine Anergie, auf eine für Heizzwecke ausreichende Temperatur „gepumpt“ wird. Da elektrische Energie aus reiner Exergie besteht, ist die im Abschnitt 2.1-c für die einzelnen Heizaufgaben ausgerechnete Exergie als der Mindestaufwand der „üblichen Heizung“ an Elektrizität zum Betrieb dieser „Wärmepumpe“ aufzufassen.

Eine sparsame Heizungsanlage mit Wärmepumpe sollte also zwei Zielen gerecht werden:

- (1) Die „Heizkörper“ müssen so konzipiert und ausgelegt werden, dass die Wärmeübertragung mit möglichst geringem Exergieverlust, sprich mit kleiner Temperaturdifferenz, erfolgen kann. Dies wird bei gut wärmegeprägten Häusern mit großzügig bemessenen Flächenheizungen erreicht.
- (2) Die Wärmepumpe selbst muss hocheffizient sein. Dies bedeutet:

- Der Kompressor sollte einen hohen elektrischen Wirkungsgrad besitzen, so dass die Exergie des Stromes sich möglichst ungeschmälert in einer Exergieerhöhung des Arbeitsmediums (= „Kältemittel“) der Wärmepumpe wieder findet.
- Die Temperaturdifferenzen von Umgebungswärme bzw. Heizungsvorlauf gegenüber dem Arbeitsmedium der Wärmepumpe sollen insbesondere bei einem kleinen Temperaturhub möglichst gering sein.
- Der Aufwand an Hilfsenergie, etwa für die Pumpen oder Gebläse zum Betrieb der Wärmetauscher, muss gering bleiben.
- Die Stoffeigenschaften des Arbeitsmediums sollen eine gute Annäherung an einen optimalen thermodynamischen Prozess ermöglichen (z.B.: „Carnotisierung“).
- Das Arbeitsmedium soll insbesondere Eigenschaften haben, die bei der Wärmeabgabe einen Temperaturgleit und dadurch eine möglichst niedrige Temperaturdifferenz über den gesamten Temperaturbereich ermöglichen, der bei der Erwärmung des Heizungswassers und insbesondere bei Aufheizvorgängen (Frischluft, Warmwasser) überstrichen wird.

Die ideale Wärmepumpe, die verlustfrei Wärme mit der Umgebungstemperatur  $T_U$  aufnimmt und unter Einsatz von Exergie (z.B. elektrischer Strom)  $E$  die Nutzwärme  $Q$  bei einer höheren Temperatur  $T$  wieder abgibt, besitzt gemäß Gleichung (2) eine Leistungszahl, die dem umgekehrten Carnotfaktor entspricht. In der Praxis muss man natürlich technische Abstriche machen; man kann diese den obigen Anforderungen für die „Hocheffizienz“ zuordnen und durch die Einführung von 3 Parametern zusammenfassend beschreiben:

- $f$  Gütefaktor, der den Kompressorwirkungsgrad der Wärmepumpe und die nicht perfekte Prozessführung berücksichtigt.
- $\Delta T_{ob}$  Temperaturdifferenz am Verflüssiger zwischen dem Arbeitsmedium der Wärmepumpe und der Vorlauftemperatur des Heizungswassers (also der Endtemperatur des aufgeheizten Wärmeträgers)
- $\Delta T_u$  Temperaturdifferenz zwischen der verfügbaren Umgebungstemperatur  $T_U$  und der Siedetemperatur des Arbeitsmediums der Wärmepumpe am Verdampfer.

Hinzu kommt noch der Energieaufwand  $E_H$  für Pumpen, Steuerung und gegebenenfalls für einen elektrischen Heizstab als Engpassheizung, den man jedoch meist in den Gütefaktor  $f$  hineinpackt. Mit diesen technischen Einschränkungen ergibt sich dann statt der Gleichung (2):

$$(3) \quad Q = f * (T + \Delta T_{ob}) / [(T - T_U) + (\Delta T_{ob} + \Delta T_u)] * E.$$

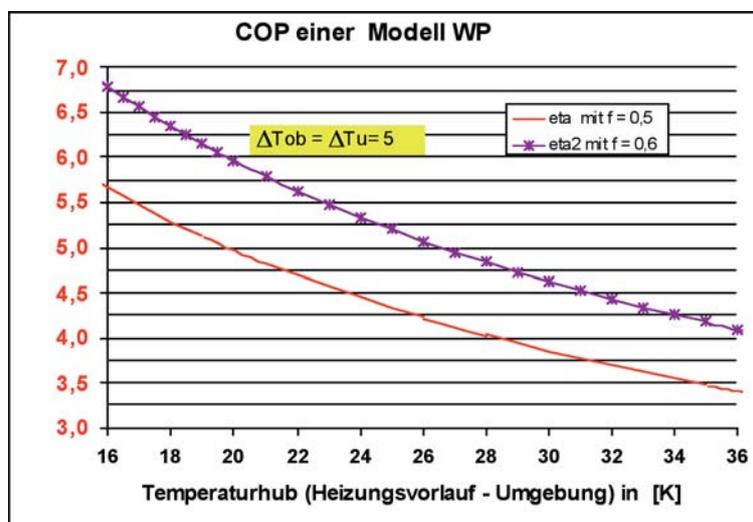


Abb. 1:

Leistungszahl (COP) einer Wärmepumpe gemäß Gleichung (3) mit einer oberen und unteren Temperaturdifferenz zum Arbeitsmedium von jeweils 5 [K] für zwei praxisnahe Gütefaktoren  $f$ .

In Abb. 1 ist die Leistungszahl einer durch Gleichung (3) beschriebenen Modellwärmepumpe als Funktion des Temperaturhubes zwischen der Umgebungswärme (als Wärmequelle für den Verdampfer) und dem Heizungsvorlauf dargestellt. An den Wärmeübertragern wurde eine (etwas ehrgeizige) Temperaturdifferenz von  $\Delta T_{ob} = \Delta T_u = 5$  [K] angenommen. Man erkennt, dass bei relativ niedrigen Vorlauftemperaturen, wie sie in gut wärmegeämmten Häusern mit Flächenheizungen möglich sind, und geeigneten Quellmedien (z.B. Erdreich oder Grundwasser, oder auch Außenluft mit Eisspeicher) hohe Leistungszahlen oberhalb von 4 oder gar 5 möglich sind.

Wärmepumpen-Anlagen gibt es in vielen Variationen, je nach:

- Umweltwärme-Reservoir:  
Erboden (bodennaher Sole-Erdkollektor, Sole-Erdsonden bis etwa 100m Tiefe),  
Wasser (Grundwasser, Uferfiltrat),  
Luft (Außenluft direkt, oder über eine durch Erdreich führende Ansaugleitung).
- Erforderliche Vorlauftemperatur:  
Bei 50-60 °C und mehr: Bloßer Ersatz einer alten Feuerungsanlage ohne thermische Gebäudesanierung;  
Bei 40-30 °C und weniger: Neubau mit Flächenheizung, Altbau nach thermischer Sanierung und Installation einer Flächenheizung.
- Wärmespeicher: Zu einer Optimierung des Einsatzes von Luft-Wärmepumpen würde z.B. beitragen, wenn die sehr kalten Tage durch einen Wärmespeicher für die Umgebungswärme (z.B. Eisspeicher) überbrückt würden.

In der Praxis interessiert nicht so sehr die momentane Leistungszahl einer Wärmepumpe auf dem Prüfstand, sondern die über einen festen Zeitraum, meistens ein Jahr, gemittelte Arbeitszahl AZ, die man als das Verhältnis der abgegebenen Wärme zum gesamten Stromaufwand definiert: Die erreichbaren Arbeitszahlen hängen natürlich von diesen Variationen und dem konkreten Fall ab. Russ et al. [2] haben eine umfangreiche Untersuchung zum Einsatz von Wärmepumpen im nicht thermisch sanierten Gebäudebestand vorgelegt. Im Feldtest waren unterschiedliche Wärmepumpen mit bis zu 20 kW Heizleistung von insgesamt 13 Herstellern vertreten.

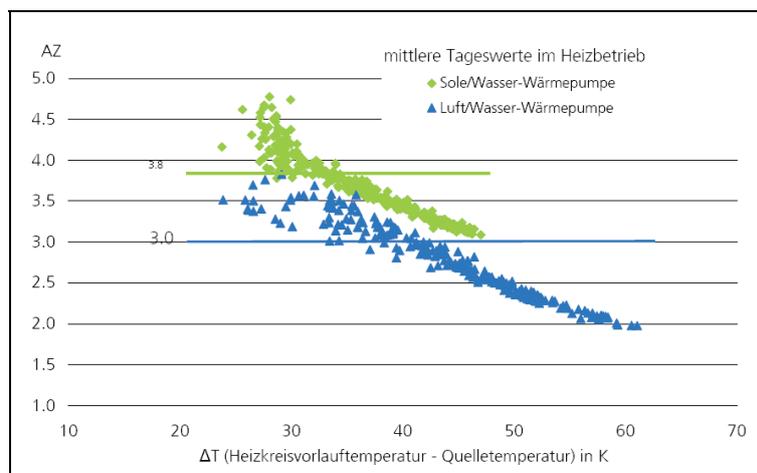


Abb. 2:

Luft-Wasser-Wärmepumpe und Sole-Wasser-Wärmepumpe-Arbeitszahl in der Heizzeit (nur Heizung) in Abhängigkeit vom Temperaturhub  $\Delta T$ , den die Wärmepumpe überwinden muss, auf der Basis von Tagesmittelwerten (Zeitraum 11/07 – 10/08) [2]

In Abb. 2 sind für einen reinen Heizbetrieb (also ohne Warmwasserbereitung) die mittleren Tageswerte der Arbeitszahl AZ als Funktion des Temperaturhubes  $\Delta T$  zwischen der Vorlauftemperatur des Heizkreises (in unserer Bezeichnung entspricht dies  $T$ ) und der Quelltemperatur  $T_U$  dargestellt. Man erkennt:

- Mit Flüssigkeit als Wärmeträger der Umgebung betriebene Wärmepumpen erreichen deutlich bessere Arbeitszahlen als solche mit Luft als Wärmequelle.
- Die über das Jahr gemittelten Arbeitszahlen waren mit 3.8 für die Sole Wärmepumpen und 3.0 für die Luft-Wärmepumpen selbst für den vorgegebenen äußerst ungünstigen Anwendungsfall „thermisch nicht sanierter Altbau mit Radiatorenheizung“ schon ganz gut.
- Die Arbeitszahlen für kleine Temperaturhübe um 25 bis 35 [K] liegen für die Sole/Wasser Wärmepumpen zwischen 4 und fast 5.

Für eine endgültige Lösung der Gebäudebeheizung genügt es nicht, sich mit einer Änderung der Energieversorgung zu begnügen. Die (möglichst) vorherige thermische Sanierung ist unabdingbar, in vielen Fällen wird auch die Umstellung auf eine Flächenheizung dazu gehören. Dann zeigen aber bereits Abb. 1 und Abb. 2, dass die Wärmepumpe für die dann noch auftretenden geringen Temperaturhübe  $\Delta T$  mit hohen Arbeitszahlen von fast 5 und in Zukunft vermutlich noch mehr aufwarten kann. Als Fazit kann man festhalten, dass es für strategische Überlegungen gerechtfertigt ist, von einer hohen Arbeitszahl beim Einsatz von Wärmepumpen auszugehen.

#### 2.2–d Motor-Wärmepumpe und Gasabsorptions-Wärmepumpe

Es gibt Wärmepumpen, bei denen der exergetische Antrieb ohne Umweg über das Stromnetz dezentral bereitgestellt wird und die daher bei einer gleichen primärenergetischen Arbeitszahl weniger Umweltwärme als eine elektrische Wärmepumpe benötigen würden:

- Bei einer Motor-Wärmepumpe treibt z.B. ein Gasmotor direkt eine Wärmepumpe an; die Motorabwärme wird zusätzlich zum Heizen genutzt.
- Bei einer Gasabsorptions-Wärmepumpe (GAWP) wird die Funktion des Kompressors im Wärmepumpenprozess durch einen thermisch angetriebenen Lösemittelkreislauf ersetzt. Ein Teil der Exergie der Wärmequelle wird also zur mechanischen Arbeit der Komprimierung des Kältemittels ausgenutzt.

#### **2.3 Optimierung von Gebäudeisolierung und Wärmebereitstellung**

Überflüssiger Wärmebedarf und Wärmebereitstellung aus primitiver Verbrennung sind im Gebäudebereich nicht mehr zu verantworten. Die Energiedienstleistung „warmes Haus“ muss und kann erreicht werden durch ein energetisch und exergetisch optimiertes, also „thermodynamisches“, Heizen. Hierzu muss:

- der Transmissions-Wärmebedarf durch bauliche Maßnahmen drastisch vermindert und ein Großteil der Lüftungswärme durch Frischluft-Abluft-Wärmeübertrager zurück gewonnen werden,
- thermische Solarenergie zur Warmwasserbereitung (vor allem in Sommer) und zur Heizung in der Übergangszeit und teilweise auch im Winter eingesetzt werden,
- der Restbedarf an Heizwärme unter exergetischer Optimierung und im energiewirtschaftlichen Gesamtzusammenhang bereitgestellt werden, und
- auch die Übertragung der Heizwärme zur Temperierung des Gebäudes und zur Aufwärmung von Frischluft und Brauchwasser ohne vermeidbaren Exergieverlust erfolgen.

Die zu erwartende Preissteigerung im Energiebereich wird den Spielraum zur technischen Ausgestaltung und Verbesserung ausweiten. Bei Neubauten ist mit dem Konzept des „Passivhauses“ [3] bereits ein richtungweisender und praktikabler Weg aufgezeigt worden, der sich sinngemäß auch auf Altbauten übertragen lässt. Die thermische Sanierung des Gebäudebestandes ist mühsam und langwierig und wird aus Kostengründen am besten im Rahmen einer „sowieso“ anfallenden allgemeinen Sanierung oder Ersatzinvestition durchgeführt. Zur aktiven thermodynamischen Wärmebereitstellung gibt es zwei Konkurrenten: KWK und Wärmepumpe. Beide werden im Kapitel II.3 *Kraft-Wärme-Kopplung und Systemvergleich* bezüglich ihres Energiesparpotenzials miteinander verglichen.

## 2.4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Energiedienstleistung „warmes Haus“ lässt sich nur in einem ganzheitlichen Ansatz mit minimalem Primärenergieeinsatz bereitstellen. Nach der thermischen Gebäudesanierung (einschließlich der Auslegung der Heizflächen auf niedrige Temperaturen) und der Ausnutzung freier Energiequellen wie Solarenergie und Abwärme wird der übrig bleibende Heizenergiebedarf nach Quantität und Qualität (Temperaturanforderung, Exergie) sehr gering, und kann gut mit Wärmepumpen gedeckt werden. Der deutsche Gasabsatz von insgesamt 925 TWh wurde 2007 zu 11,5% zur Verstromung in Kraftwerken und zu 27% meist zu Heizzwecken in den Haushalten eingesetzt. Setzt sich die Wärmepumpe in vielen Gebieten durch, dann könnte dort die Gasversorgung aus der Fläche herausgenommen und zur Stromerzeugung herangezogen werden. So kann eine Ausweitung der umweltfreundlichen und effektiven Gasverstromung aus dem Übergang zum thermodynamisch optimierten Heizen gespeist werden.

## Anmerkungen und Literatur

Dem Kapitel liegen eine ausführlichere Darstellung als „Materialienband“ und ein Powerpoint Vortrag zugrunde, in denen weitere Einzelheiten angegeben sind.

Gerhard Luther: Materialienband, *Thermodynamisch optimiertes Heizen*.  
[http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE\\_Archiv/DPG2010\\_E-Studie/](http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/DPG2010_E-Studie/)

Gerhard Luther: *Thermodynamisch Optimiertes Heizen*,  
[http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE\\_Archiv/AKE2009F/Links\\_AKE2009F.htm](http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/AKE2009F/Links_AKE2009F.htm)

Weitere Literatur:

AIP Conference Proceedings Nr.25: *Efficient Use of Energy*, American Institute of Physics (AIP), New York (1975), ISBN 0-88318-124-X

J. Fricke und W.L. Borst: *Energie – Ein Lehrbuch der physikalischen Grundlagen*,  
 R.Oldenbourg Verlag, München (1981), ISBN 3-486-24971-1

- [1] Eine einfache Herleitung aus den beiden Hauptsätzen der Thermodynamik im Materialienband a.a.O.
- [2] Christel Russ, Marek Miara, Michael Platt: *Untersuchungen zum Einsatz von Wärmepumpen im Gebäudebestand*, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme Freiburg (2009), Bild 10, S.10
- [3] Wolfgang Feist: <http://www.passiv.de/>