

21. Intelligentes Heizen

◦Im letzten Kapitel hatten wir gezeigt, dass die Elektrifizierung im Transport eine Reduktion des Energiebedarfs auf ein Fünftel des gegenwärtigen Levels ermöglicht; und dass öffentliche Verkehrsmittel und Radfahren 40 mal energieeffizienter sein können als Autofahren. Wie ist es nun mit dem Heizen? Welche Arten von Energieeinsparungen können hier die Technologie oder eine Änderung der Lebensgewohnheiten eröffnen?

Die zum Heizen eines Gebäudes erforderliche Leistung ist gegeben durch Multiplikation dreier Größen:

$$\text{Benötigte Leistung} = \frac{\text{mittlere Temperaturdifferenz} \times \text{Leckrate des Gebäudes}}{\text{Effizienz des Heizsystems}} .$$

Lassen Sie mich diese Formel (die im Anhang E detailliert beschrieben ist) mit einem Beispiel erklären. Mein Haus ist eine Doppelhaushälfte mit drei Schlafzimmern, erbaut etwa 1940 (Fig.21.1). Die **mittlere Temperaturdifferenz** zwischen drinnen und draußen hängt ab von der Stellung meines Thermostats und vom Wetter. Steht der Thermostat permanent auf 20°C, sei die mittlere Temperaturdifferenz **9°C**. Die **Leckrate des Gebäudes** beschreibt, wie schnell Wärme durch die Wände, Fenster und Risse nach draußen fließt, als Folge des Temperaturunterschiedes. Die Leckrate wird häufig auch als Wärmeverlustrkoeffizient des Gebäudes bezeichnet. Sie wird gemessen in kWh pro Tag pro Grad Celsius Temperaturdifferenz. In Anhang E berechne ich, dass 2006 die Leckrate meines Hauses **7,7 kWh/d/°C** betrug. Das Produkt



Fig.21.1: Das Haus des Autors

mittlere Temperaturdifferenz x **Leckrate des Gebäudes**

ist die Rate, mit der die Wärme auf Grund von Wärmeleitung und Luftaustausch aus dem Haus fließt. Liegt beispielsweise die Temperaturdifferenz bei 9°C, dann ist der Wärmeverlust gerade

$$9^{\circ}\text{C} \times 7,7 \text{ kWh/d/}^{\circ}\text{C} \approx 70 \text{ kWh/d.}$$

Um schließlich die benötigte Leistung zu berechnen, teilen wir diesen Wärmeverlust durch die Effizienz unseres Heizsystems. In meinem Haus hat der Gas-Brennwertkessel eine Effizienz von 90%, also gilt

$$\text{Benötigte Leistung} = \frac{9^{\circ}\text{C} \times 7,7 \text{ kWh/d/}^{\circ}\text{C}}{0,9} = 77 \text{ kWh/d} .$$

Dieser Wert ist höher als unsere Raumheizungs-Abschätzung aus Kapitel 7. Er ist höher aus zwei Gründen. Erstens: Diese Formel geht davon aus, dass all die benötigte Wärme vom Kessel geliefert wird, wogegen in der Praxis einiges an Abwärme aus anderen Quellen dazukommt, etwa von Bewohnern, von Elektrogeräten oder durch Sonneneinstrahlung; zweitens: In Kapitel 7 gingen wir davon aus, dass eine Person nur zwei Zimmer gleichzeitig auf 20°C hält, ein ganzes Haus warm zu halten benötigt natürlich mehr Energie.

OK, wie können wir den Heizenergieverbrauch reduzieren? Offensichtlich gibt es drei Angriffslinien:

1. Reduzieren Sie die **mittlere Temperaturdifferenz**. Das kann man durch Herunterdrehen des Thermostats erreichen (oder, wenn Sie Freunde ganz oben haben, durch Änderung des Wetters).
2. Reduzieren Sie die **Leckrate des Gebäudes**. Das macht man durch Verbesserung der Gebäudeisolierung – denken Sie an Dreifachverglasung, Winddichtigkeitsprüfung, Dachgeschossdämmung – oder noch radikaler, Abriss und Neubau mit optimaler Wärmedämmung; oder vielleicht durch Wohnen in einem Haus mit weniger Fläche pro Person (Die Leckrate ist allgemein um so größer, je größer die Wohnfläche ist, da mit der Wohnfläche auch die Fenster- und Wandflächen größer werden.)
3. Erhöhen Sie die **Effizienz der Heizung**. Sie glauben vielleicht, dass **90%** schwer zu übertreffen sein werden, doch in Wirklichkeit ist da noch einiges mehr drin.

Cooler Technologie: der Thermostat

Der Thermostat (zusammen mit einem warmen Wollpullover) ist kaum zu schlagen, wenn es um Technologien geht, die viel Gewinn für wenig Geld bringen. Sie drehen den Thermostat zurück, und Ihr Haus verbraucht weniger Energie. Magie! In Deutschland reduzieren Sie mit jedem Grad, das Sie ihren Thermostat zurückdrehen, den Energieverlust um 10%. Drehen Sie den Thermostat von 20° auf 15° zurück und sie haben Ihren Wärmeverlust nahezu halbiert. Dank der zusätzlichen Gewinne aus Abwärme ist die gesparte Heizenergie sogar noch höher als diese Verlustreduktion.

Doch leider hat diese bemerkenswerte Energiespar-Technologie Nebenwirkungen. Manche Menschen nennen dieses Zurückdrehen des Thermostats Einschränkung der Lebensqualität und sind gar nicht glücklich damit. Ich werde später noch einige Anmerkungen machen, wie man dieses Problem mit der Lebensqualität umgehen kann. Sehen wir in der Zwischenzeit, als ein Beweis dafür, dass „die wichtigste intelligente Komponente in einem Haus mit intelligenter Heizung der Bewohner“ ist, auf Fig.21.2. Sie zeigt eine Studie der Carbon Trust zum Wärmeverbrauch in 12 identischen modernen Häusern. Die Studie läßt uns die Familie in Haus 1 bestaunen, deren Wärmeverbrauch doppelt so hoch ist wie der von Mr. und Mrs. Woolly in Hausnummer 12. Doch sollten wir auch auf die Zahlen achten: Die Familie in Nr. 1 braucht 43 kWh pro Tag. Wenn Ihnen das viel erscheint, erinnern Sie sich – schätzte ich nicht gerade vor einem Moment noch den Verbrauch *meines* eigenen Hauses viel höher ab? In der Tat war mein Gasverbrauch von 1993 bis 2003 etwas höher als 43 kWh pro Tag (Fig.7.10, Seite 60), und ich dachte, ich wäre ein sparsamer Mensch! Das Problem ist das *Haus*. All die modernen Häuser der Carbon Trust Studie hatten Leckraten von **2,7 kWh/d/°C**, mein Haus hatte dagegen **7,7 kWh/d/°C**! Leute die in undichten Häusern leben...

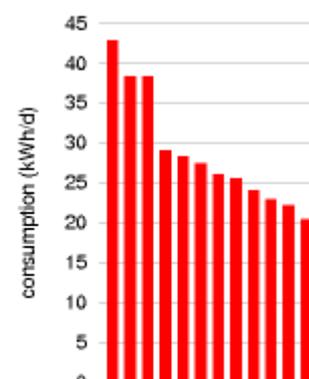


Fig.21.2: Tatsächlicher Wärmeverbrauch in 12 identischen Häusern mit identischen Heizsystemen. Alle Häuser haben eine Wohnfläche von 86 m² und nach Plan eine Leckrate von **2,7 kWh/d/°C**. Quelle: Carbo Trust (2007)

Der Kampf gegen die Leckrate

Was kann man mit alten, undichten Häusern anstellen, außer die Bulldozer zu bestellen? Fig.21.3 zeigt Abschätzungen der benötigten Energie für die Raumheizung in alten Einzel-, Doppel- und Reihenhäusern, wenn mehr und mehr Aufwand für Dämmung betrieben wird. Zusätzliche Dachstuhldämmung und Hohlwanddämmung verringert den

Wärmeverlust eines typischen alten Hauses um etwa 25%. Dank der Gewinne aus Abwärme führt das zu einer Heizenergie-Ersparnis von circa 40%.

Lassen Sie uns diese Ideen einem Test unterziehen.

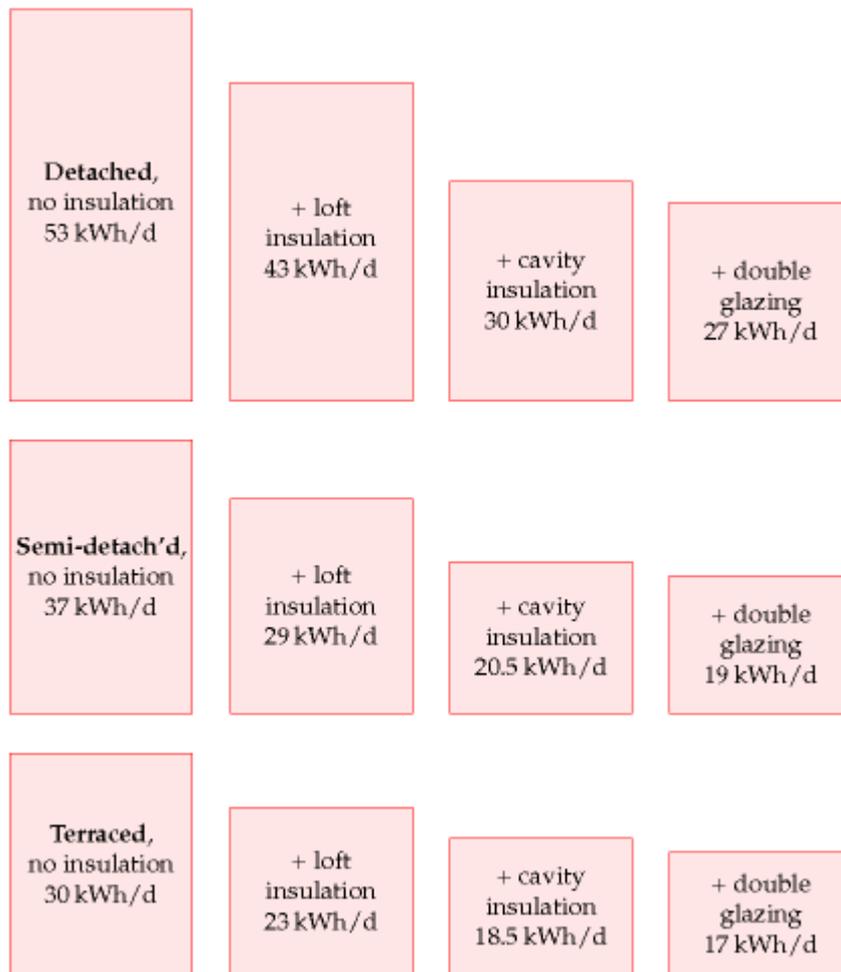


Fig.21.3: Abschätzungen für die Raumheizung in verschiedenen britischen Häusern. (oben: Einzelhaus, Mitte Doppelhaushälfte, unten Reihenhäuser; v.l.n.r.: ohne Isolierung, mit Dachstuhl­dämmung, zusätzlich mit Hohlwand­dämmung, zusätzlich mit Isolierverglasung). Eden und Bending (1985).

Eine Fallstudie

Ich habe Sie bereits auf Seite 60 (Fig.7.10) mit meinem Haus bekannt gemacht. Lassen Sie uns die Geschichte wieder aufnehmen. Im Jahre 2004 ersetzte ich meinen alten Gaskessel durch einen Gas-Brennwertkessel. (Brennwertkessel benutzen einen Wärmetauscher, um Restwärme des Abgases auf die einströmende Luft zu übertragen.) Gleichzeitig demontierte ich meinen Warmwasserspeicher (warmes Wasser wird jetzt nur bei Bedarf geliefert), und ich installierte Thermostate an die Heizkörper in allen Schlafzimmern. Der neue Brennwertkessel hat auch eine neue Steuerung, die mich tageszeitabhängig verschiedene Solltemperaturen einstellen lässt. Mit diesen Veränderungen reduzierte ich meinen Durchschnittsverbrauch von 50 kWh/d auf 32 kWh/d.

Die Reduktion von 50 auf 32 kWh/d ist recht zufriedenstellend, doch ist sie nicht genug, um den persönlichen Fußabdruck auf unter eine Tonne CO₂ pro Jahr zu senken. 32 kWh/d Gas entsprechen über 2 Tonnen CO₂ pro Jahr. Im Jahr 2007 begann ich, mehr Augenmerk auf meine Energiemesser zu legen. Ich hatte die Hohlwanddämmung installiert (Fig.21.5) und meine Dachstuhl­isolierung verbessert. Ich ersetzte meine einfachverglaste Hintertür durch eine doppelverglaste, und setzte eine zusätzliche Doppel­glastür vor den Windfang im Eingangsbereich (Fig.21.6). Und das wichtigste: ich schenkte meinen Thermostateinstellungen mehr Aufmerksamkeit. Diese

Aufmerksamkeit führte zu einer weiteren Halbierung meines Gasverbrauchs. Im letzten Jahr lag der bei 13 kWh/d!

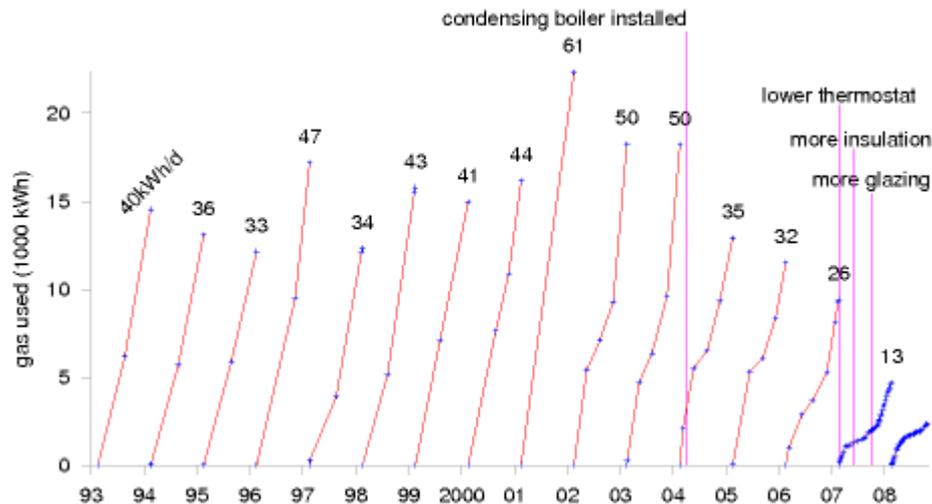


Fig.21.4: (oben) Mein häuslicher Gasverbrauch, jedes Jahr von 1993 bis 2007. Jede Linie zeigt die kumulative Verbrauchskurve übers Jahr in kWh. Die Zahl am Ende ist die mittlere Verbrauchsrate für dieses Jahr, in kWh pro Tag. Zählerablesungen sind durch die blauen Punkte gekennzeichnet. Offensichtlich verbrache ich um so weniger Gas, je öfter ich meinen Zähler ablese!



Fig.21.5: (links) Die Hohlwanddämmung geht voran

Fig.21.6: (rechts) Eine neue Eingangstür

Weil diese Fallstudie so ein Durcheinander von Gebäudesanierungen und Verhaltensänderungen ist, kann man schwer sagen, was davon das gewichtigste war. Nach meinen Berechnungen (in Anhang E) verbesserten meine Isolationsmaßnahmen die Leckrate um 25%, von 7,7 kWh/d/°C auf 5,8 kWh/d/°C. Das ist immer noch viel höher als irgendein Neubau. Es ist frustrierend, wie schwierig die nachträgliche Dämmung eines Altbaus ist!

Daher ist mein Tipp geschicktes Thermostat-Management. Was ist eine vernünftige Thermostateinstellung, die man anstreben sollte? Heutzutage denken viele Menschen, 17°C ist unerträglich kalt. Dennoch lag die mittlere Winter-Temperatur in englischen Häusern 1970 bei 13°C! Die menschliche Empfindung von Warm hängt davon ab, was man gerade tut und was man in der letzten Stunde oder so getan hat. Mein Rat ist, *nicht in Thermostateinstellungen zu denken*. Statt den Thermostat auf eine bestimmte Temperatur festzumachen, versuchen Sie ihn besser die meiste Zeit auf niedriger Temperatur (etwa 13 oder 15 °C) zu lassen und nur dann zeitweise hochzudrehen, wenn Ihnen kalt ist. Das ist wie mit der Beleuchtung in einer Bücherei. Wenn Sie sich erlauben, die Frage zu stellen: „Was ist die richtige Beleuchtung in den Regalen?“ dann wird die Antwort zweifellos sein „Hell genug um die Buchtitel lesen zu können,“ und Sie werden helle Lichter die ganze Zeit angeschaltet haben. Doch die eingangs gestellte Frage impliziert, dass wir die Helligkeit konstant machen müssen; aber das muss gar nicht sein. Wir können Lichtschalter installieren, die der Leser betätigen kann, und die sich

selbst wieder ausschalten nach einer angemessenen Zeit. In gleicher Weise müssen auch Thermostate nicht zwingend die ganze Zeit bei 20°C stehen.

Bevor wir das Thema Thermostateinstellungen verlassen, sollte ich noch die Klimaanlage erwähnen. Macht es Sie nicht verrückt, im Sommer in ein Gebäude zu gehen, dessen Klimaanlage auf 18°C gestellt ist? Diese verrückten Gebäudeverwalter konfrontieren jeden mit Temperaturen, die sie im Winter als viel zu kalt bejammern würden! Die „Cool-Biz“ Richtlinien der japanischen Regierung schlagen vor, Klimatisierung auf 28°C anzusetzen.

Bessere Häuser

Wenn Sie die Chance haben, ein neues Haus zu bauen, stehen Ihnen eine Menge Möglichkeiten offen, wie Sie sicherstellen können, dass sein Heizbedarf viel geringer ist als der eines alten Hauses. Fig.21.2 gab uns schon den Hinweis, dass moderne Häuser zu erheblich besseren Wärmedämm-Standards gebaut sind als die aus den 1940ern. Doch die Baustandards könnten sogar noch besser sein, wie in Anhang E diskutiert. Die drei Grundideen für optimale Ergebnisse sind: (1) Planen Sie wirklich dicke Isolierschichten in Fußböden, Wänden und Dächern; (2) Stellen Sie sicher, dass das Gebäude komplett luftdicht ist und eine aktive Belüftung bekommt, die Frischluft hinein und verbrauchte, feuchte Luft hinausbläst, mit passiven Wärmetauschern, die dabei einen Großteil der Abluftwärme zurückgewinnen. (3) Planen Sie das Gebäude so, dass es so gut wie möglich den Sonnenschein ausnutzt.



Fig.21.7: Eggborough. Not a power station participating in smart heating.

Die Energiekosten des Heizens

Bisher haben wir uns auf Temperaturkontrolle und die Leckrate konzentriert. Jetzt wenden wir uns dem dritten Faktor in der Gleichung zu:

$$\text{Benötigte Leistung} = \frac{\text{mittlere Temperaturdifferenz} \times \text{Leckrate des Gebäudes}}{\text{Effizienz des Heizsystems}}$$

Wie effizient kann Wärme produziert werden? Können wir Wärme auf die billige Tour bekommen? Heutzutage ist Gebäudeheizung in Deutschland vorrangig über einen fossilen Brennstoff, Erdöl oder Erdgas, in Kesseln mit Wirkungsgraden von 78%-90%, realisiert. Können wir aus der fossilen Brennstoffabhängigkeit aussteigen und gleichzeitig die Gebäudeheizung effizienter machen?

Eine Technologie, die als Antwort auf das Heizungsproblem bereitsteht, ist die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), oder ihr Ableger, die dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung. Ich werde KWK hier vorstellen, doch bin ich zu der Überzeugung gelangt, dass sie nicht immer eine gute Idee ist, weil wir eine bessere Technologie für das Heizen haben, nämlich die Wärmepumpe, die ich weiter unten beschreiben werde.

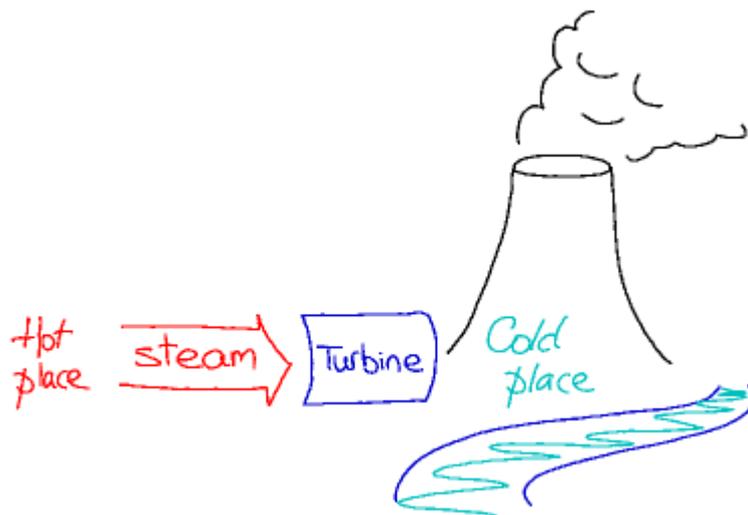


Fig.21.8: Wie ein Kraftwerk funktioniert. Es muss einen kalten Platz geben, an dem der Dampf kondensiert, damit die Turbine läuft. Der kalte Platz ist üblicherweise ein Kühlturm oder ein Fluss.

Kraft-Wärme-Kopplung

Die allgemeine Meinung zu konventionellen, großen zentralen Kraftwerken ist wohl, dass sie schrecklich ineffizient sind und Wärme wohl oder übel durch die Kamine und Kühltürme verblasen. Ein etwas differenzierterer Standpunkt erkennt, dass wir, um thermische Energie in Elektrizität verwandeln zu können, unausweichlich Wärme in einen kalten Platz abgeben müssen (Fig.21.8). So funktionieren Wärmekraftmaschinen. Es muss einen kalten Platz geben. Doch sicherlich, so wird argumentiert, könnten wir Gebäude als Abnehmer für die „verlorene“ Wärme benutzen anstatt Kühltürme oder Meerwasser? Dieses Prinzip nennt man „Kraft-Wärme-Kopplung“ (KWK), die dazu erforderlichen Anlagen Blockheizkraftwerke (BHKW), und es wurde in Europa seit Jahrzehnten angewandt - in vielen Städten ist ein großes Kraftwerk in ein Fernwärmesystem integriert. Befürworter der modernen Inkarnation dieses Prinzips schlagen vor, dass jeweils ein kleines Kraftwerk mit KWK in einem Gebäude (oder für eine kleine Gruppe benachbarter Häuser) errichtet wird, Wärme und Elektrizität für diese(s) Gebäude liefert und überschüssige Elektrizität ins Netz einspeist.

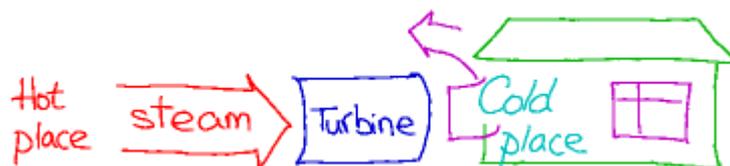


Fig.21.9: Kraft-Wärme-Kopplung. Fernwärme nimmt die Wärme auf, die andernfalls im Kühlturm verblasen würde.

Es ist sicherlich etwas Wahres dran, dass Deutschland noch entwicklungsfähig ist, was Fernwärme und KWK betrifft, doch die Diskussion darüber ist erschwert durch einen Mangel an Zahlen und durch zwei grundlegende Irrtümer. Erstens: Wenn verschiedene Arten des Brennstoffeinsatzes verglichen werden, wird der Begriff „Effizienz“ oft falsch verwendet, nämlich so als ob elektrische Energie gleichwertig mit Wärmeenergie sei. In Wahrheit ist aber Elektrizität wertvoller als Wärme. Zweitens: Es wird weithin angenommen, dass die „verlorene“ Wärme (Abwärme) in einem herkömmlichen Kraftwerk für einen nützlichen Zweck gesammelt werden könnte ohne dass die Elektrizitätsproduktion des Kraftwerks dadurch verschlechtert würde. Leider ist das nicht wahr, wie die Zahlen zeigen werden. Nutzbare Wärme an den Kunden zu liefern reduziert immer die Elektrizitätsproduktion zu einem gewissen Grad. Die wahren

Nettogewinne der Kraft-Wärme-Kopplung sind oft viel geringer als es der Medienrummel glauben machen will.

Eine weitere Behinderung rationaler Diskussion über KWK ist der unlängst aufgekommene Mythos, dass die Dezentralisierung einer Technologie diese irgendwie grüner mache. Herden kleiner Blockheizkraftwerke sind also etwas „Gutes“, wo hingegen große zentralisierte Heizkraftwerke „schlecht“ sind. Doch wenn Dezentralisierung eine wirklich gute Idee ist, sollte das auch in den Zahlen evident werden. Dezentralisierung sollte auf ihren eigenen beiden Beinen stehen können. Doch momentan zeigen die Zahlen eher, dass *zentralisierte* Stromerzeugung viele Vorzüge sowohl in ökonomischer als auch in energetischer Hinsicht hat. Nur in sehr großen Gebäuden oder in Gebäudeverbänden hat die lokale Erzeugung Vorteile, und die liegen dann im Bereich von 10% oder 20%.

Wärmepumpen

Wie die Fernwärme und die Kraft-Wärme-Kopplung, so sind auch Wärmepumpen schon weit in Europa verbreitet, doch noch relativ selten in Deutschland. Wärmepumpen sind umgedrehte Kühlschränke. Fühlen Sie Ihren Kühlschrank hinten an, er ist *warm*. Ein Kühlschrank bewegt die Wärme von einem Platz (seinem Inneren) zu einem anderen (seiner Rückenfläche). Zum Erwärmen eines Gebäudes wird der Kühlschrank daher umgedreht – sein *Inneres* kommt in den Garten, kühlt also den Garten herunter; seine Rückenfläche bleibt in der Küche, wärmt also das Haus auf. Was nicht offensichtlich ist in diesem Gedankenspiel: Es ist eine wirklich effiziente Methode, sein Haus aufzuwärmen. Für jedes Kilowatt, das dieser umgedrehte Kühlschrank aus dem Stromnetz zieht, kann er drei Kilowatt Wärme aus dem Garten pumpen, also gehen insgesamt vier Kilowatt Wärme in Ihr Haus. Wärmepumpen sind etwa viermal so effizient wie Elektroöfen. Wo die Effizienz eines Elektroofens 100% ist, ist die der Wärmepumpe 400%. Die Effizienz einer Wärmepumpe wird üblicherweise als *Leistungszahl* (Coefficient of Performance, CoP) bezeichnet. Ist die Effizienz 400%, dann ist die Leistungszahl 4.

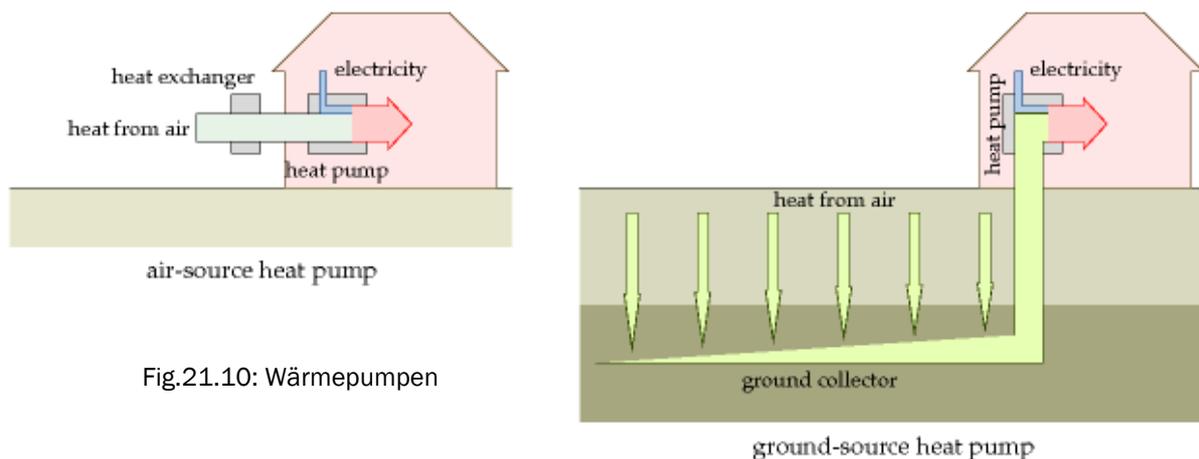


Fig.21.10: Wärmepumpen

Wärmepumpen können auf verschiedene Arten ausgestaltet werden (Fig.21.10). Eine Wärmepumpe kann die *Luft* in Ihrem Garten mit einem Wärmetauscher (typisch ein 1m hoher weißer Kasten, Fig.21.11) kühlen. In diesem Fall nennt man sie eine Luftwärmepumpe. Alternativ kann die Pumpe den *Erdboden* über große Schleifen unterirdischer Verrohrung (mehrere Dutzend Meter lang) kühlen; man nennt sie dann Erdwärmepumpe. Überdies kann Wärme aus Flüssen oder Seen gepumpt werden.

Manche Wärmepumpen können in beide Richtungen pumpen. Wenn eine Luftwärmepumpe umgekehrt läuft, benutzt sie Elektrizität, um die Luft *draußen* zu erwärmen und die Luft *drinnen* zu kühlen. Das nennt man dann Klimaanlage. Viele Klimaanlage sind in der Tat Wärmepumpen, die genau so arbeiten. Auch Erdwärmepumpen können als Klimaanlage betrieben werden. Derselbe Apparat kann also Heizung im Winter und Kühlung im Sommer erzeugen.

Leute sagen manchmal, Erdwärmepumpen würden „geothermische Energie“ benutzen, doch das ist nicht die richtige Bezeichnung. Wie wir in Kapitel 16 gesehen haben, liefert geothermische Energie in den meisten Gegenden der Erde nur ein kleines Stückchen Energie pro Flächeneinheit (etwa 50 mW/m^2), Wärmepumpen haben nichts zu tun mit diesem kleinen Stückchen, und sie können zur Heizung und zur Kühlung verwendet werden. Wärmepumpen benutzen den Erdboden nur als einen Platz, aus dem sie Wärme heraussaugen, oder in den sie Wärme hineinpumpen. Wenn sie laufend Wärme absaugen, wird diese tatsächlich von der wärmenden Kraft der Sonne wieder aufgefüllt.



Fig.21.11: Das innere und das äußere Bauteil Luftwärmepumpe mit einer Leistungszahl von 4. Am inneren ist ein Kugelschreiber als Größenvergleich angebracht. Eine dieser Fujitsu-Maschinen kann $3,6 \text{ kW}$ Heizleistung mit $0,845 \text{ kW}$ elektrischer Leistung liefern. Sie kann auch umgekehrt laufen und liefert dann $2,6 \text{ kW}$ Kühlleistung mit $0,655 \text{ kW}$ Elektrizität.

Zwei Dinge stehen noch aus für dieses Kapitel. Wir müssen die Wärmepumpe mit der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) vergleichen und wir müssen die Beschränkungen der Erdwärmepumpen diskutieren.

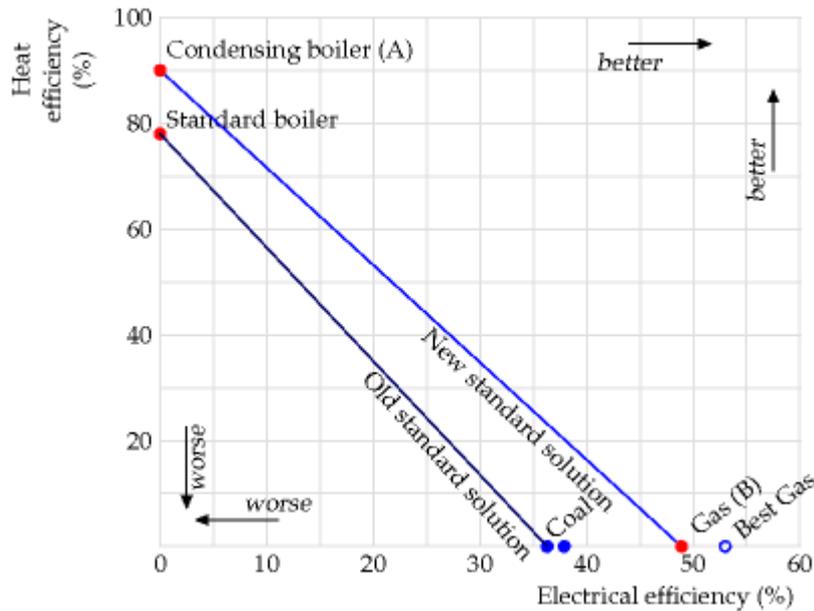
Wärmepumpen im Vergleich mit Kraft-Wärme-Kopplung

Ich hielt ursprünglich das Prinzip der KWK für ein Totschlagargument. „Offensichtlich sollten wir die Abwärme der Kraftwerke zur Gebäudeheizung nutzen anstatt sie durch die Kühltürme zu verblasen!“ Doch schaut man sorgfältig auf die Zahlen, die die Performance einer KWK-Anlage beschreiben, kommt man zu dem Schluss, dass es bessere Möglichkeiten gibt, Elektrizität und Gebäudeheizung zur Verfügung zu stellen.

Ich werde in drei Stufen ein Diagramm erstellen. Das Diagramm zeigt, wie viel elektrische Energie oder Wärmeenergie aus chemischer Energie gewonnen werden kann. Die waagrechte Achse steht für den elektrischen Wirkungsgrad, die senkrechte für den Heiz-Wirkungsgrad.

Die Standardlösung ohne KWK

Im ersten Schritt zeichnen wir Standard-Kraftwerke und Heizungen ein, die reine Elektrizität oder reine Wärme liefern.



Brennwertkessel (der Punkt A oben links) sind 90-95% effizient, weil der Rest der Wärme durch den Kamin entweicht. Gas-Kraftwerke (der Punkt B rechts unten) sind derzeit im Mittel ca. 50% effizient bei der Umwandlung von Gas in Elektrizität. Wenn wir irgendein vorgegebenes Mischungsverhältnis von Strom und Wärme aus Erdgas benötigen, können wir das durch Verbrennen entsprechender Mengen von Gas in Gaskraftwerken oder in Heizkesseln liefern. Diese neue Standardlösung erzeugt dann elektrische Energie und Heizenergie zu den Wirkungsgraden, die durch die Strecke A-B gegeben sind, indem sie dafür Strom und Wärme in zwei verschiedenartigen Anlagen produziert.

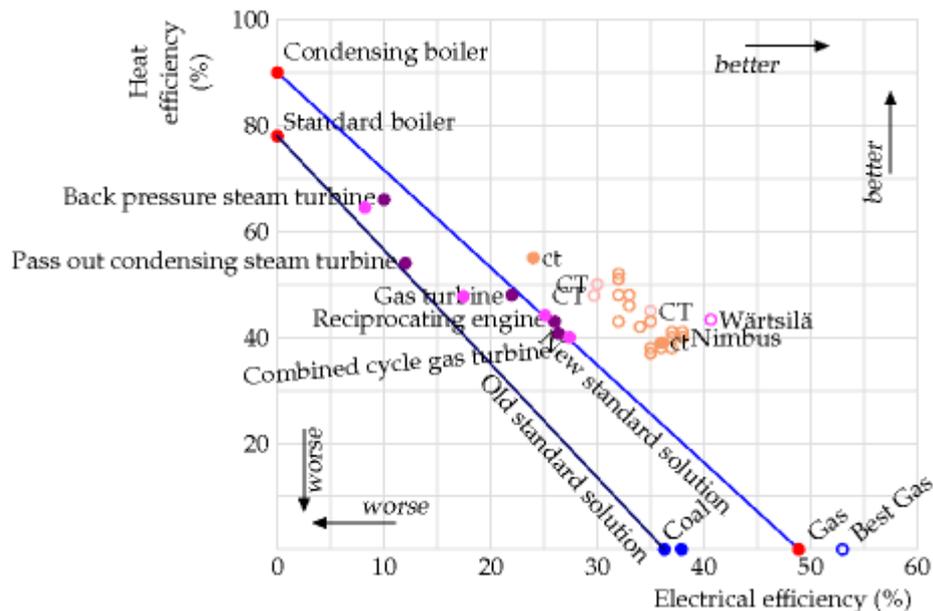
Zum historischen Vergleich zeichne ich in das Diagramm zudem die alte Standard-Heizung (Gas-Heizkessel ohne Wärmerückgewinnung, Wirkungsgrad 79%) und die vor einigen Jahrzehnten noch übliche und in Deutschland seit dem Atomausstieg wieder neu zu Ehren gekommene Kohleverstromung (elektrischer Wirkungsgrad 37% oder so, max. 42% [5x4m6]) ein.

Kraft-Wärme-Kopplung

Als nächstes zeichnen wir KWK-Anlagen in das Diagramm ein. Sie erzeugen aus chemischer Energie gleichzeitig Strom und Wärme.

Jeder ausgefüllte Punkt steht für die tatsächliche Performance eines aktuell betriebenen KWK-Anlagentyps (Daten aus England). Die Kreise mit „CT“ stehen für die Performance idealisierter Systeme, zitiert aus „Carbon Trust“. Die Kreise bei „Nimbus“ stehen für Herstellerangaben. Die Punkte mit „ct“ bezeichnen zwei reale Systeme aus dem „Carbon Trust“ Papier (Freeman Hospital und Elizabeth House).

In diesem Diagramm sieht man insbesondere, dass die elektrische Effizienz der KWK-Anlagen signifikant unter den 50% des einfachen Nur-Strom-Kraftwerks liegt. Die Wärme ist also kein Gratis-Nebenprodukt. Erhöhen der Wärmeproduktion verschlechtert die Stromproduktion.



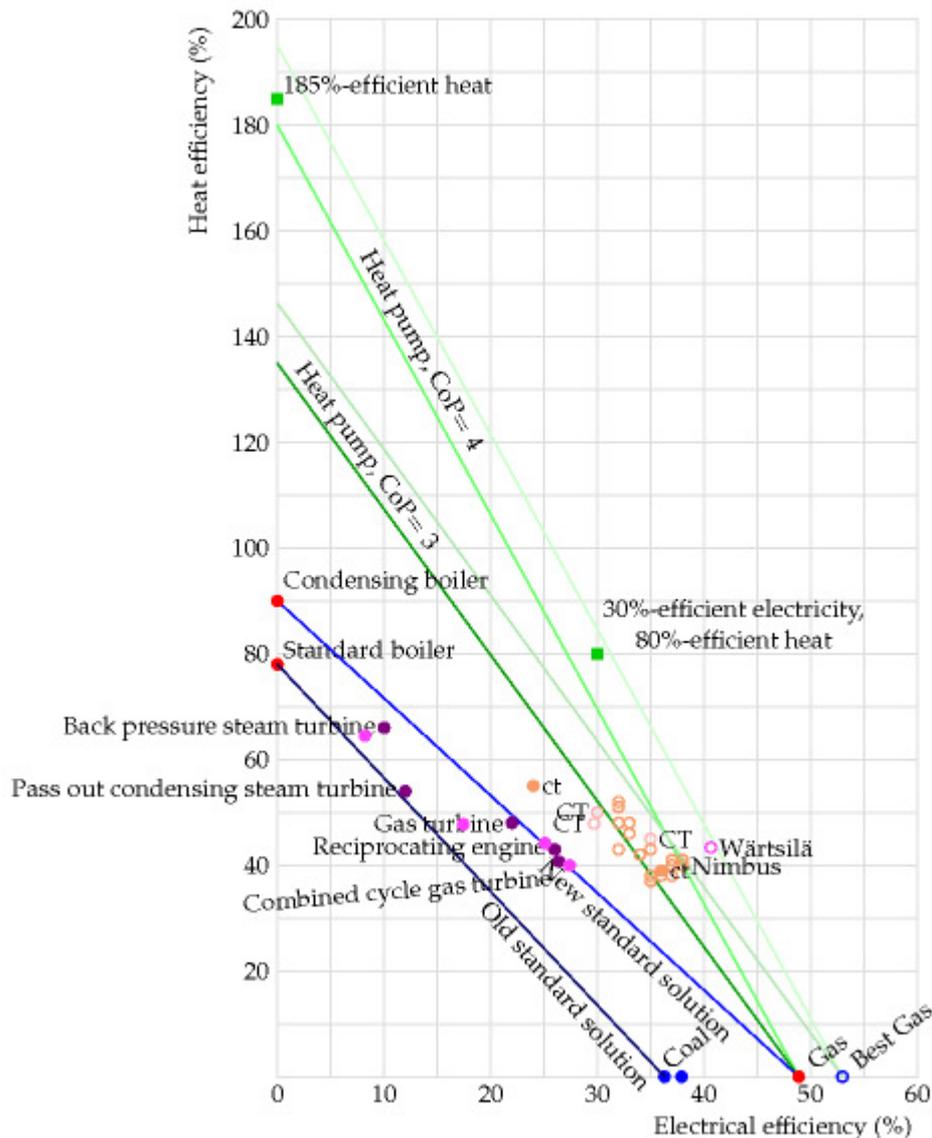
Es ist gängige Praxis, die beiden Zahlen (Effizienz der Stromproduktion und Effizienz der Wärmeproduktion) zusammenzuzählen in eine „Gesamteffizienz“ – beispielsweise Abgasgedruckt-Dampfturbinen mit 10% Elektrizität und 66% Wärme würden dann 76% effizient genannt, doch denke ich, das ist irreführend. Nach dieser Bemessungsgröße müsste der 90%-effiziente Brennwertkessel „besser und effizienter“ sein als jede KWK-Anlage! In der Tat ist aber elektrische Energie wertvoller als Wärme.

Die KWK-Punkte in unserem Diagramm liegen deutlich über dem „alten Standardweg“ (Kohleverstromung + Gasheizkessel) und viele, insbesondere die „CT“-Werte, liegen auch über dem „neuen Standardweg“ (Gaskraftwerk + Brennwertkessel). Doch müssen wir im Hinterkopf behalten, dass diese Effizienz mit einigen Einschränkungen erkauft wird – eine KWK-Anlage liefert Wärme nur in ihrer Umgebung, wohingegen Brennwertkessel überall aufgestellt werden können, wo eine Gasversorgung besteht; und im Vergleich mit dem Standardweg sind KWK-Systeme nicht so flexibel in dem Mischungsverhältnis von Strom und Wärme, das sie liefern; KWK-Systeme arbeiten optimal nur für ein fest vorgegebenes Strom-zu-Wärme-Verhältnis.

Zu guter Letzt fügen wir die Wärmepumpen hinzu, die Energie aus dem Stromnetz benutzen, um Umgebungswärme in die Gebäude zu pumpen.

Die steilen grünen Linien zeigen Kombinationen von Elektrizität und Wärme, die durch Wärmepumpen mit Leistungszahl 4 bzw. 3 möglich sind, unter der Annahme, dass die dafür zusätzlich erforderliche Elektrizität in durchschnittlichen oder in höchsteffizienten Gas-Kraftwerken erzeugt wird und dass 8% dieser zusätzlichen Leistung im Stromnetz auf dem Weg vom Kraftwerk zur Wärmepumpe verloren gehen. Die Effizienz des höchsteffizienten Gaskraftwerks ist unter angenommenen optimalen Bedingungen 53%. (Ich denke, dass auch Carbon Trust und Nimbus ähnliche Annahmen bei der Berechnung der hier benutzten Zahlen für KWK-Anlagen machten.) In Zukunft werden Wärmepumpen vielleicht noch besser arbeiten als hier angegeben. Dank massiver gesetzlicher Förderung von Effizienzverbesserungen sind in Japan bereits Wärmepumpen verfügbar, die Leistungszahlen von 4,9 aufweisen. ♦Doch sind das Labor-Leistungsmesswerte, die Leistungszahlen im Praxisbetrieb sind noch oft deutlich geringer (2,2 bis 4,4 nach einer lokalen Studie der Agenda Gruppe 21 Lahr an bestehenden Anlagen [6zvjo2r]). Auch die realen Effizienzwerte (Jahresarbeitszahlen) japanischer Pumpen lassen sich in Deutschland nur schwer realisieren, denn die Temperaturverhältnisse in Japan sind viel weniger extrem als hierzulande. Je geringer

aber der Temperaturunterschied zwischen Wärmereservoir (Außenluft, Bodenspeicher oder Grundwasser) und Heizungswasser, um so effizienter können Wärmepumpen arbeiten, vgl. Anhang E, Seite 327.



Wie wir sehen, können Wärmepumpen ein System eröffnen, das eine „Gesamteffizienz“ von über 100% aufweist. Wenn unser angenommenes hocheffizientes Gaskraftwerk Elektrizität für Wärmepumpen liefert (also ca. 40% seines Strom-Outputs zum Betrieb von Leistungszahl-4-Wärmepumpen verwendet werden), kann damit ein Mix mit 30% elektrischem und 80% thermischem Wirkungsgrad aufgebaut werden, also eine „Gesamteffizienz“ von 110%. Kein denkbare KWK-System ohne Wärmepumpe kann jemals diese Performance erreichen.

Lassen Sie mich das näher ausführen. Wärmepumpen sind in ihrer Effizienz den Brennwertkesseln überlegen, selbst wenn sie mit Strom aus Erdgas-Kraftwerken betrieben werden. Wenn Sie viele Häuser mit Erdgas heizen wollen, können Sie diese mit Brennwertkesseln ausstatten, die „95% effizient“ sind, oder Sie können das selbe Gas in ein modernes Gaskraftwerk leiten, Strom damit erzeugen und mit diesem Strom

modernste Wärmepumpen in allen Gebäuden betreiben; die Effizienz dieser zweiten Lösung liegt zwischen 140% und 185%.

Kraft-Wärme-Kopplung, auch wenn es nach einer guten Idee klingt, muss nicht immer der beste Weg sein, mit Erdgas Strom und Heizwärme für Gebäude zu erzeugen, sofern auch Luft- oder Erdwärmepumpen in diesen Gebäuden installiert werden können.

Ich möchte betonen, dass dieser kritische Vergleich nicht bedeutet, dass KWK immer eine schlechte Idee sei. Was ich hier vergleiche sind Methoden zum Beheizen einfacher Häuser, die nur niederstufige Wärme benötigen. KWK kann auch höherstufige Wärme für industriellen Einsatz liefern (z.B. bei 200 °C). Unter solchen industriellen Bedingungen werden Wärmepumpen deutlich schlechter abschneiden, weil dann ihre Leistungszahlen niedriger sind.

♦Die optimale Lösung wird vielleicht, wie so oft, in einem intelligenten Mix beider Technologien – KWK und Wärmepumpe – liegen. Unsere Abschätzung beim Vergleichen der beiden Technologien ging von der Annahme aus, dass Strom aus Erdgas hergestellt wird, und damit beliebig zur gewünschten Zeit verfügbar ist. Doch wir wollten ja gerade die fossilen Brennstoffe aus unserem Energiemix verbannen.

Der Energiebedarf für Heizen liegt nahezu vollständig im Winterhalbjahr, es wird also im Winter mehr Energie benötigt. Diesen Winter-Mehrbedarf an Energie vollständig über elektrische Energie zu decken, ist schwierig, weil das Speichern von elektrischer Energie mit großen Verlusten verbunden ist (siehe Kapitel 26). Will man einen Winter-Strommehrbedarf durch regenerative Energien abdecken, ist das besonders schwierig: Photovoltaik erzeugt Energie vorrangig im Sommer während Wind, Wasser oder Geothermie nahezu gleichmäßig über die Jahreszeiten verteilt sind. Sollten wir für unsere Heizungs-Wärmepumpen Windräder bauen, die wir im Sommer ausschalten? Eine bessere Möglichkeit wäre vielleicht, den Winter-Strommehrbedarf durch Betrieb von KWK-Heizanlagen zu erzeugen. Das Heizkraftwerk läuft zur Wärmeerzeugung genau dann, wenn es kalt ist, und produziert auch genau dann Strom, den wir genau zu diesem Zeitpunkt – weil es eben gerade kalt ist – zum Betrieb unserer Wärmepumpen benötigen. So ergibt sich gar keine Konkurrenz zwischen Wärmepumpenheizung und Heizkraftwerk, sondern im Gegenteil ein Synergie-Effekt, den man maximieren kann, indem man das Mischungsverhältnis von KWK und Wärmepumpen einer (klimatisch einigermaßen einheitlichen) Region so wählt, dass der insgesamt temperaturabhängig zum Heizen erforderliche Strom im wesentlichen in den ebenfalls temperaturabhängig betriebenen Heizkraftwerken erzeugt wird.

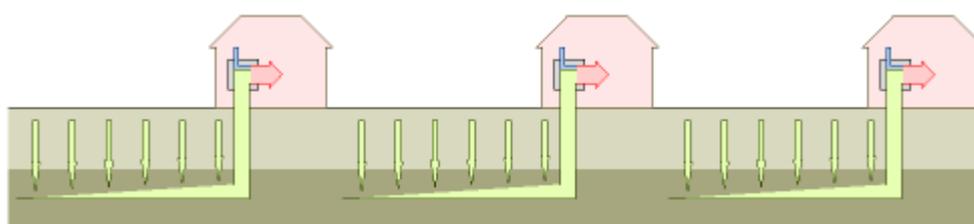


Fig.21.12: Wie eng zusammen kann man Erdwärmepumpen packen?

Schranken des Wachstums bei Wärmepumpen

°Weil die Bodentemperatur in wenigen Metern Tiefe den jahreszeitlichen Schwankungen nur sehr träge folgt und immer nahe 11 °C bleibt, eignet sich der Boden theoretisch besser für die Wärmeentnahme durch eine Wärmepumpe als die Luft, die mitten im Winter 10 oder 15 °C kälter ist als der Boden. Wärmepumpen-Berater empfehlen daher Erdwärmepumpen, wo diese möglich sind. (Wärmepumpen arbeiten

weniger effizient wenn große Temperaturunterschiede zwischen Innen und Außen bestehen.)

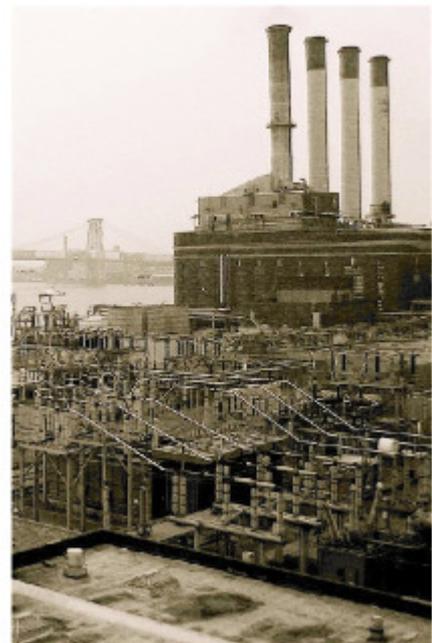
Doch ist der Erdboden keine unbegrenzte Quelle von Wärme. Die Wärme muss irgendwo herkommen, und Erdboden ist kein besonders guter Wärmeleiter. Wenn wir ihm zu viel Wärme entziehen, wird der Boden vereisen und der Vorteil der Erdwärmepumpe wird verringert.

Fläche pro Person (m ²)	
Bangalore	37
Manhattan	39
Paris	40
Chelsea	66
Tokio	72
Moskau	97
Taipei	104
The Hague	152
San Francisco	156
Singapur	156
Cambridge MA	164
Sydney	174
Portsmouth	213
München	220

Tabelle 21.13: Einige Stadtflächen pro Person

In ♦Deutschland◊ wird der Haupteinsatz von Wärmepumpen die Heizung von Gebäuden im Winter sein. Die letztendliche Quelle der dabei gepumpten Wärme ist die Sonne, die dem Boden entzogene Wärme durch direkte Einstrahlung und durch Wärmeleitung über die Luft wieder nachliefert. Die Rate, mit der Wärme dem Boden entzogen wird, muss zwei Randbedingungen erfüllen: Sie darf keinen zu großen Temperaturabfall des Bodens über den Winter verursachen und die gesamte im Winter entzogene Wärme muss über den Sommer irgendwie wieder nachgeliefert werden können. Wenn ein Risiko besteht, dass der *natürliche* Wärmenachfluss im Sommer nicht ausreicht um die im Winter entzogene Wärme zu ersetzen, dann muss das Wiederauffüllen *aktiv* betrieben werden – etwa indem man das System im Sommer umgekehrt betreibt und Wärme in den Boden pumpt (womit man zusätzlichen Energiebedarf und eine Klimaanlage hat).

Lassen Sie uns diese Diskussion mit Zahlen füttern. Wie viel Erdboden braucht eine Erdwärmepumpe? Nehmen wir eine ziemlich hohe Bevölkerungsdichte in der Nachbarschaft an – sagen wir 6200 Personen pro km² (160 m² pro Person), die Dichte einer typischen Innenstadt. Kann dann *jeder* eine Erdwärmepumpe betreiben, ohne aktives Wiederauffüllen im Sommer? Eine Berechnung in Anhang E gibt eine versuchsweise Antwort „Nein“: Wenn jeder in der Nachbarschaft 48 kWh/d pro Person (meine Abschätzung des winterlichen Heizbedarfs) aus dem Boden zieht, wird der Boden im Winter schließlich einfrieren. Um übermäßige Abkühlung des Bodens zu vermeiden, muss die Saugrate pro Person unter 12 kWh/d bleiben. Wenn wir auf Erdwärmepumpen umstellen, sollten wir nennenswertes Wärmenachfüllen im Sommer mit einplanen, um genug Wärme im Boden für den nächsten Winter zur



Verfügung zu haben. Dieses Nachfüllen könnte zum Beispiel die Abwärme von Klimaanlage nutzen oder die Wärme aus solarthermischen Dachmodulen. (Sommerliche Solarwärme wird z.B. in der Drake Landing Solar Community in Kanada [www.dlsc.ca] für den darauffolgenden Winter im Boden gespeichert.) ♦Das benötigt allerdings zusätzliche Energie. Vielleicht müssen wir teilweise auch Luftwärmepumpen einsetzen, deren Performance etwas schlechter sein wird. Um mit Wärmepumpen effizient zu heizen ist es auch sinnvoll, großflächige Niedertemperaturheizungen (Fußboden-, Wand- oder Deckenheizung) statt der früher üblichen Heizkörper zu verwenden, da diese mit niedrigerer Vorlauftemperatur arbeiten. Je niedriger die Vorlauftemperatur der Heizung, um so geringer ist die Temperaturdifferenz, die die Wärmepumpe überwinden muss.

◦Meine Schlussfolgerung: Können wir den Energieverbrauch fürs Heizen reduzieren? Ja. Können wir gleichzeitig fossile Brennstoffe abschaffen? Ja. Wir sollten einen Großteil unserer Öl- und Gasheizungen ersetzen durch elektrische Wärmepumpen und dabei die tief-hängenden Früchte – Gebäudedämmung und Thermostat-Tricksereien – nicht vergessen; dann können wir die benötigte Energie auf 25% unseres jetzigen Levels reduzieren. Sogar wenn die benötigte zusätzliche Elektrizität aus Gas-Heizkraftwerken kommt, sind Wärmepumpen und KWK-Anlagen immer noch eine viel effizientere Art zu heizen als wir das derzeit tun, indem wir Gas einfach verbrennen ♦(Vielleicht können wir das benötigte Gas sogar mit Erneuerbaren Energien erzeugen, wir kommen auf diese Idee in Kapitel 26 zurück).

◦Die Neinsager entgegnen, dass die Leistungszahlen von Luftwärmepumpen lausig seien, nur 2 oder 3. Doch deren Informationen sind veraltet. Wenn wir nur moderne Wärmepumpen kaufen, können wir viel besser sein. Die japanische Regierung legte zehnjährige gesetzliche Anreizprogramme für Effizienz auf, wodurch die Performance von Klimaanlage massiv verbessert wurde; dank dieses Anreizes gibt es nun Luftwärmepumpen mit Leistungszahlen von 4,9 ♦und darüber (vgl. etwa <http://www.hptcj.or.jp/e/publication>).

◦Ein anderes Argument gegen Wärmepumpen ist „Oh, wir können den Leuten nicht effiziente Luftwärmepumpen erlauben, weil sie diese sonst im Sommer zur Klimatisierung missbrauchen!“ Bitte – ich hasse übertriebene Klimatisierung wie jeder andere, doch diese Wärmepumpen sind viermal effizienter als jede andere Heizmethode im Winter! Zeigen Sie mir eine bessere Alternative. Holzpellets? Sicher, ein paar Holzsammler können Holz verbrennen. Doch es gibt nicht genug Holz, wenn jeder das macht. Für Waldbewohner, da gibt es Holz. ♦Für Stadtbewohner gibt es Fernwärme vom KWK-Heizkraftwerk. ◦Für die anderen, da gibt es Wärmepumpen.

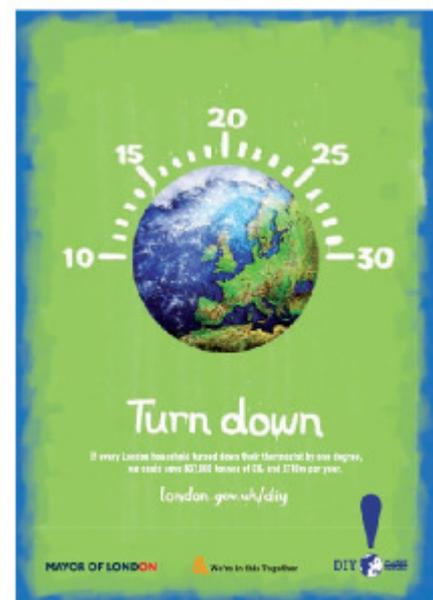


Fig.21.14: Anzeige der Kampagne „DIY Planet Repairs“ des Londoner Bürgermeisters von 2007. Der Text sagt: „Zurückdrehen! Wenn jeder Londoner Haushalt den Thermostat um ein Grad zurückdreht, könnten wir zusammen 837.000 Tonnen CO₂ und 110 Millionen Pfund jährlich sparen“ [london.gov.uk/diy] In Einsparungen pro Person sind das 0,12 t CO₂ pro Jahr pro Person. Das ist etwa 1% der Gesamtemission pro Kopf (11t), also ist das ein guter Rat. Weiter so, Ken!

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

- 160 Dachstuhldämmung und Hohlwanddämmung verringert den Wärmeverlust eines typischen alten Hauses um etwa 25% Eden und Bending (1985).
- 161 Dennoch lag die mittlere Winter-Temperatur in englischen Häusern 1970 bei 13 °C Quelle: Dept. of Trade and Industry (2002a, para 3.11)
- 163 dass Deutschland noch entwicklungsfähig ist, was Fernwärme und KWK betrifft In Westdeutschland erhielten 1985 vier Millionen Gebäude Heizenergie aus Fernwärme, bei 7 kW pro Gebäude im Mittel. In Dänemark lieferten Nah- und Fernwärmesysteme 1985 etwa 42% der Raumheizung, wobei die Wärme über 20 km oder mehr durch Druckdampfleitungen übertragen wurde. Zwei Drittel der gelieferten Wärme stammte aus Kraftwerken. In Vasteras, Schweden, wurden 1985 98% des Wärmebedarfs der Stadt aus Kraftwerken gespeist.
- 164 Wärmepumpen sind etwa viermal so effizient wie Elektroöfen Einige der verfügbaren Wärmepumpen haben bereits Leistungszahlen über 4,0 [yok2nw]. Es gibt staatliche Subventionen für Grundwasser-Wärmepumpen nur dann, wenn diese eine Leistungszahl über 4,4 aufweisen [2dtx8z]. Kommerzielle Erdwärmepumpen sind mit Leistungszahlen von 5,4 für Kühlung und 4,9 für Heizung verfügbar [2fd8ar].
- 166 Gas-Kraftwerke sind derzeit im Mittel ca. 50% effizient: Moderne GuD-Kraftwerke erreichen auch 60 %, Quelle: [3dtk6ny].
- 171 Luftwärmepumpen mit Leistungszahlen von 4,9 Nach Veröffentlichungen von HPTCJ (2007), gibt es seit 2006 in Japan Wärmepumpen mit Leistungszahlen von 6,6. Die Effizienz von Wärmepumpen hat sich in Japan dank entsprechender Subventionsprogramme der Regierung innerhalb eines Jahrzehnts von 3 auf 6 verbessert. HPTCJ (2007) beschreibt eine Luft-zu-Wasser-Wärmepumpe namens Eco Cute mit einer Leistungszahl von 4,9. Die Eco Cute kam 2001 auf den Markt. www.ecosystem-japan.com.

Weiterführende Literatur zu Wärmepumpen: European Heat Pump Network

ehpn.fiz-karlsruhe.de/en/,

www.kensaengineering.com,

www.heatking.co.uk,

www.iceenergy.co.uk.