

## Anhang E: Heizung II

Ein perfekt versiegeltes und gedämmtes Haus würde Wärme für immer halten und keine Heizung erfordern. Die zwei Hauptursachen, weswegen Gebäude Wärme verlieren sind

1. Wärmeleitung – Wärme fließt direkt durch Wände, Fenster und Türen,
2. Lüftung – heiße Luft sickert nach draußen durch Ritzen und Spalten, oder absichtlich durch Ventilationskanäle.

Im Standardmodell für Wärmeverlust sind diese beiden Ströme proportional zur Temperaturdifferenz zwischen der Innen- und Außenluft. Für ein typisches englisches Haus ist die Lüftung der größere Energieverlust, wie wir sehen werden.

### **Wärmeleitungs-Verluste**

Die Wärmeleitungs-Verlustrate durch eine Wand, eine Decke, einen Boden oder ein Fenster ist das Produkt aus drei Faktoren: Die Fläche der Wand, einem Maß der Leitfähigkeit des Materials, aus Verkaufsprospekten bekannt als der „U-Wert“ oder Wärmedurchgangskoeffizient, und der Temperaturdifferenz:

$$\text{Leistungsverlust} = \text{Fläche} \times U \times \text{Temperaturdifferenz} .$$

Der U-Wert wird allgemein in  $\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$  angegeben. (Ein Kelvin (1 K) ist das selbe wie ein Grad Celsius ( $1\text{ }^\circ\text{C}$ .) Größere U-Werte stehen für größeren Leistungsverlust. Je dicker eine Wand ist, um so kleiner ist ihr U-Wert. Doppelverglasung ist fast so gut wie eine massive Steinwand. (Siehe Tabelle E.2.)

Die U-Werte von Objekten, die „in Reihe“ liegen, etwa eine Wand und der daraufliegende Innenputz, können in derselben Weise kombiniert werden wie elektrische Leitfähigkeiten

$$u_{\text{Reihenschaltung}} = 1 / \left( \frac{1}{u_1} + \frac{1}{u_2} \right) .$$

Ein praktisches Beispiel für die Anwendung dieser Regel ist auf Seite 315.

Küche	2	Tabelle E.1: Luftwechsel pro Stunde: typische Werte von $N$ für abgedichtete Räume. Die zugigsten Räume können $N=3$ Luftwechsel pro Stunde aufweisen. Die geforderte Minimum-Rate sind 0,5 bis 1 Luftwechsel pro Stunde, um ausreichend Frischluft für die Bewohner sicherzustellen und Gebäudeschäden wegen überhöhter Luftfeuchtigkeit zu vermeiden (EST 2003)
Bad	2	
Flur	1	
Schlafzimmer	0,5	

### **Lüftungsverluste**

Um die Wärme zu berechnen, die man zum Erwärmen kalter hereinfließender Luft benötigt, brauchen wir die Wärmekapazität von Luft:  $1,2\text{ kJ}/\text{m}^3/\text{K}$ .

In der Gebäudebeurteilung ist es üblich, die Leistungsverluste durch Lüftung zu beschreiben als Produkt der Anzahl  $N$  der Luftwechsel pro Stunde mit dem Volumen  $V$



	U-Werte (W/m <sup>2</sup> /K)		
	alte Gebäude	moderner Standard	beste Methode
Wände		0,45-0,6	0,12
Gemauerte Wand	2,4		
Außenwand: 24cm Ziegel	2,2		
Blockziegel-Hohlwand, unverfüllt	1,0		
Blockziegel-Hohlwand, gedämmt	0,6		
Böden		0,45	0,14
abgesetzter Dielenboden	0,7		
massiver Betonboden	0,8		
Dächer		0,25	0,12
Flachdach mit 25mm Dämmung	0,9		
Schrägdach mit 100mm Dämmung	0,3		
Fenster			1,5
Einfachverglasung	5,0		
Doppelverglasung	2,9		
Doppelverglasung, 20mm Abstand	1,7		
Dreifachverglasung	0,7-0,9		

Tabelle E.2: U-Werte für Wände, Böden, Dächer und Fenster



Fig.E.3: U-Wert-Anforderungen englischer und schwedischer Bauvorschriften

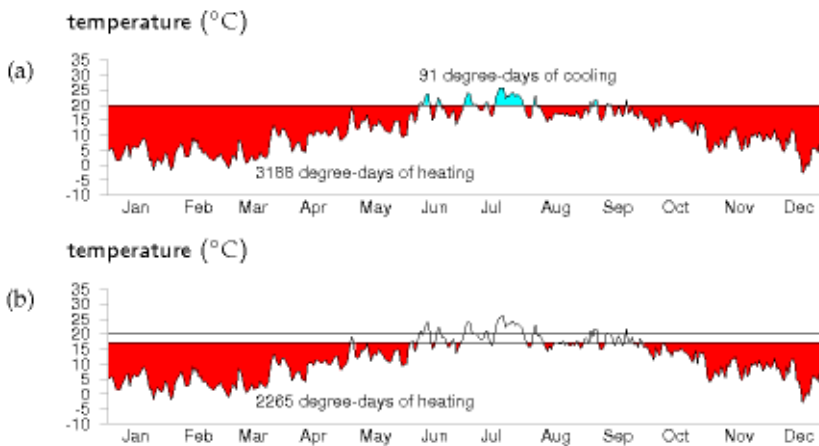


Fig.E.4: Temperaturerfordernis in Cambridge, 2006, visualisiert als Fläche in der grafischen Darstellung der Tagesmittelwerte im Temperaturverlauf. (a) Thermostat auf 20°C, einschließlich Kühlung im Sommer; (b) Thermostat im Winter auf 17°C.

des Raumes in Kubikmetern, der Wärmekapazität  $C$  und der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen innen und außen.

$$\text{Leistung (Watt)} = C \frac{N}{1 \text{ h}} V(\text{m}^3) \Delta T(\text{K}) \quad (\text{E.1})$$

$$= (1,2 \text{ kJ/m}^3/\text{K}) \frac{N}{3600 \text{ s}} V(\text{m}^3) \Delta T(\text{K}) \quad (\text{E.2})$$

$$= \frac{1}{3} NV \Delta T. \quad (\text{E.3})$$

### ***Energieverlust und Temperaturerfordernis (Grad-Tage)***

Weil Energie ja Leistung x Zeit ist, kann man den Energieverlust durch eine Fläche in einer kurzen Zeitspanne schreiben als

$$\text{Energieverlust} = \text{Fläche} \times U \times (\Delta T \times \text{Zeitspanne}),$$

und den Energieverlust durch Lüftung als

$$\frac{1}{3} NV \times (\Delta T \times \text{Zeitspanne}).$$

Beide Energieverluste haben die Form

$$\text{Etwas} \times (\Delta T \times \text{Zeitspanne}),$$

wobei das „Etwas“ in Watt pro °C gemessen wird. Im Laufe des Tages und der Jahreszeiten ändert sich die Temperaturdifferenz; und wir können uns eine längere Zeitspanne gedanklich in viele kleine Stücke teilen, während derer die Temperatur immer nahezu konstant ist. Von einem Zeitspanne-Teilstück zum nächsten ändert sich die Temperatur, jedoch nicht das „Etwas“. Wenn wir also den Energieverlust eines Raumes (durch Wärmeleitung und Lüftung) über ein langes Zeitintervall vorhersagen wollen, müssen wir zwei Dinge multiplizieren:

1. Die Summe aller „Etwas“se (alle Terme  $\text{Fläche} \times U$  für Wände, Dächer, Böden und Fenster und alle Terme  $\frac{1}{3} NV$  für die Volumina); und
2. Die Summe aller (Temperaturdifferenz x Zeitspanne)-Faktoren (für alle Zeitspannen-Teilstücke).

Der erste Faktor ist eine Eigenschaft des Gebäudes, gemessen in Watt pro °C. Ich nenne sie die Leckrate des Gebäudes. (Die Leckrate heißt manchmal auch *Wärmeverlustkoeffizient*.) Der zweite Faktor ist eine Eigenschaft des Wetters, häufig ausgedrückt in „Grad-Tagen“, da die Temperaturdifferenz in Grad gemessen wird und Tage ein bequemes Maß für Zeitspannen darstellen. Wenn beispielsweise Ihr Haus innen 18 °C hat und die Außentemperatur für eine Woche 8 °C beträgt, dann sagen wir, dass diese Woche mit  $10 \times 7 = 70$  Grad-Tagen zur  $(\Delta T \times \text{Zeitspanne})$ -Summe beiträgt. Ich werde die Summe all dieser  $(\Delta T \times \text{Zeitspanne})$ -Faktoren die *Temperaturerfordernis* eines Zeitraums nennen.

$$\text{Energieverlust} = \text{Leckrate} \times \text{Temperaturerfordernis}$$

Wir können den Energieverlust unseres Gebäudes reduzieren, indem wir die Leckrate verringern oder die Temperaturerfordernis, oder beides. Die nächsten beiden Abschnitte beschäftigen sich näher mit diesen beiden Faktoren, an Hand einer Fallstudie eines Hauses in Cambridge.

Es gibt einen dritten Faktor, den wir zudem diskutieren müssen. Die verlorene Energie wird durch das Heizsystem des Gebäudes wieder ersetzt und durch andere

Wärmequellen wie Bewohner, ihre Elektro- und Kochgeräte und die Sonne. Betrachtet man das Heizsystem, ist die *gelieferte* Energie nicht identisch mit der durch das Gebäude *verbrauchten* Energie. Sie sind über den thermischen Wirkungsgrad der Heizung (die sog. Leistungszahl) miteinander verknüpft.

$$\text{Verbrauchte Energie} = \text{gelieferte Energie} / \text{Leistungszahl.}$$

Für einen Gas-Brennwertkessel ist beispielsweise die Leistungszahl 90 %, da 10% der Energie durch den Kamin verloren geht.

Zusammengefasst können wir also den Energieverbrauch eines Gebäudes auf drei Arten reduzieren:

1. durch Verringern der Temperaturerfordernis,
2. durch Verringern der Leckrate oder
3. durch Erhöhen der Leistungszahl.

Wir wollen nun die Einsparpotenziale dieser drei Optionen bestimmen. (Eine vierte Option – Erhöhen der zusätzlichen Energiegewinne des Gebäudes, insbesondere durch Sonneneinstrahlung – könnte ebenfalls nützlich sein, doch will ich sie hier nicht behandeln.)

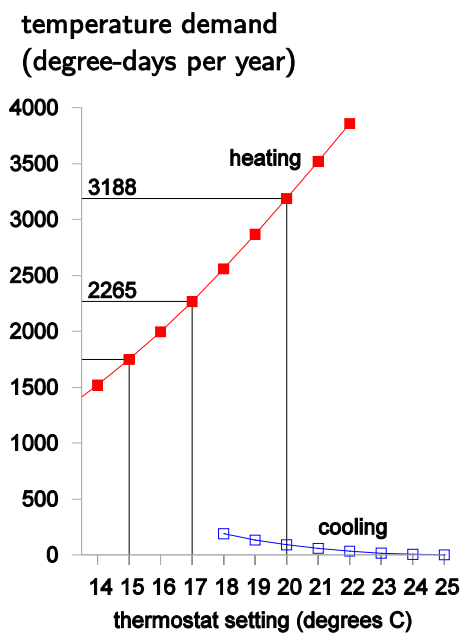


Fig.E.5: Temperaturerfordernis (Definition siehe Text Seite 311) in Cambridge, in Grad-Tagen pro Jahr, als Funktion der Thermostat-einstellung (°C). Dreht man im Winter den Thermostaten von 20°C auf 17°C zurück, reduziert das die Temperaturerfordernis für Heizen um 30%, von 3.188 auf 2.265 Grad-Tage. Stellt man im Sommer den Thermostaten von 20°C auf 23°C hoch, reduziert das die Temperaturerfordernis für Kühlen um 82%, von 91 auf 16 Grad-Tage.

### ***Temperaturerfordernis***

Wir können die Temperaturerfordernis (Definition siehe oben Seite 311) schön in einer Grafik des Außentemperaturverlaufs über der Zeit visualisieren (Fig.E.4). Für ein Gebäude, dessen Innentemperatur auf 20°C gehalten wird, ist die gesamte Temperaturerfordernis zwischen der horizontalen Linie bei 20°C und dem Temperaturverlauf. In Fig.E.4 (a) sehen wir für ein Jahr in Cambridge, dass die Temperaturerfordernis 3.188 Grad-Tage Heizen und 91 Grad-Tage Kühlen beträgt. Diese Zahlen lassen uns leicht erkennen, wie sich Zurückdrehen des Thermostaten oder Leben ohne Klimaanlage auswirken. Den Thermostaten im Winter auf 17°C zurückzudrehen verringert die Temperaturerfordernis für Heizen von 3.188 Grad-Tagen auf 2.265 Grad-Tage (Fig.E.4 (b)), was eine 30%ige Reduktion der Heizkosten bedeutet. Den

Thermostaten auf 15 °C zurückzudrehen verringert die Erfordernis von 3.188 auf 1748 Grad-Tage, eine Einsparung von 45%.

Diese Berechnungen geben uns eine Größenordnung, welche Einsparungen durch Zurückdrehen des Thermostaten möglich sind, doch bringen sie nur dann exakte Vorhersagen hervor, wenn wir zwei Details mit berücksichtigen: Erstens: Gebäude absorbieren von Natur aus Energie der Sonne, sodass die Innentemperatur auch ohne Heizung höher als die Außentemperatur liegt; und zweitens: die Bewohner und ihre Geräte strahlen Wärme ab, was wiederum den Bedarf an Heizung gegenüber der Theorie verringert. Die Temperaturerfordernis aus gedrückt in Grad-Tagen ist zudem eine recht unhandliche Sache. Werte wie „3.500 Grad-Tage“ sind schwer zu merken. (Und Akademiker könnten die Einheit verwirrend finden, weil sie sie an die Zeit erinnert, als sie mit Doktorhüten verkleidet herumliefen und ihren akademischen Grad feierten.) Wir können dieser Größe noch mehr Anschaulichkeit verleihen, wenn wird sie durch 365 teilen, die Anzahl der Tage im Jahr, und so die Temperaturerfordernis in „Grad-Tagen pro Tag“ oder wenn Sie wollen einfach in „Grad“ erhalten. Fig.E.6. zeigt das umskalierte Diagramm. So ausgedrückt ist die Temperaturerfordernis einfach die *mittlere* Temperaturdifferenz zwischen innen und außen. Die hervorgehobenen Werte sind 8,7 °C für eine Thermostateinstellung von 20 °C, 6,2 °C für eine Einstellung von 17 °C und 4,8 °C für eine Einstellung von 15 °C.

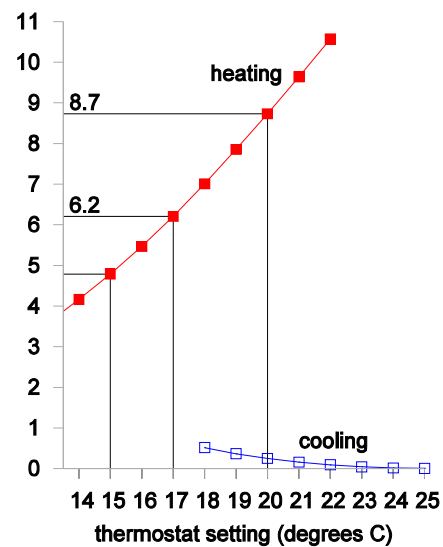


Fig.E.6: Die Temperaturerfordernis in Cambridge, umskaliert in Grad-Tagen pro Tag, auch bekannt als Grad. In diesen Einheiten ist die Erfordernis gerade der Temperaturunterschied zwischen innen und außen.

Fig.E.6. zeigt das umskalierte Diagramm. So ausgedrückt ist die Temperaturerfordernis einfach die *mittlere* Temperaturdifferenz zwischen innen und außen. Die hervorgehobenen Werte sind 8,7 °C für eine Thermostateinstellung von 20 °C, 6,2 °C für eine Einstellung von 17 °C und 4,8 °C für eine Einstellung von 15 °C.

### Leckrate – Beispiel: mein Haus

Mein Haus ist eine Doppelhaushälfte mit drei Schlafzimmern aus dem Jahr 1940 (Fig.E.7). 2006 wurde die Küche etwas erweitert und die meisten Fenster sind doppelverglast. Vorder- und Hintertür waren beide noch einfach verglast. Meine Abschätzung der Leckrate aus 2006 ist in Tabelle E.8 dargestellt. Die gesamte Leckrate damals war 322 W/°C (oder 7,7 kWh/d/°C), wobei Wärmeleitungs-Lecks mit 72% und Lüftungs-Lecks mit 28% beitrugen. Die Wärmeleitungsverluste verteilten sich nahezu gleichmäßig auf die drei Bereiche Fenster, Wände und Boden/Decke.

Um die Leckrate zweier unterschiedlich großer Gebäude vergleichen zu können, könne wir die Leckrate durch die Wohnfläche teilen, das gibt den Wärmeverlustkoeffizienten des Gebäudes, in W/°C/m<sup>2</sup>. Für dieses Haus (gesamte Wohnfläche 88 m<sup>2</sup>) ist er

$$3,7 \text{ W/°C/m}^2 .$$

Nehmen wir diese Werte und schätzen den täglichen Energiebedarf des Hauses ab, an einem kalten Wintertag und im Jahresmittel.



Fig.E.7: Mein Haus

Wärmeleitungsverluste	Fläche (m <sup>2</sup> )	U-Wert (W/m <sup>2</sup> /°C)	Leckrate (W/°C)
<b>Horizontale Flächen</b>			
Schrägdach	48	0.6	28.8
Flachdach	1.6	3	4.8
Boden	50	0.8	40
<b>Vertikale Flächen</b>			
Wände im Anbau	24.1	0.6	14.5
Außenwände	50	1	50
einfache Wand (12cm)	2	3	6
Einfachvergeraste Fendter u. Türen	7.35	5	36.7
Doppelverglaste Fenster	17.8	2.9	51.6
<b>Wärmeleitungsverluste gesamt</b>			<b>232.4</b>

Tabelle E.8: Aufschlüsselung der Leckraten meines Hauses aus Wärmeleitung und Lüftung, vor 2006. Ich habe die Trennwand zwischen den Doppelhaushälften als perfekt isolierte Wand betrachtet, aber das könnte falsch sein, weil der Zwischenraum durchlüftet ist. Ich habe die Parameter hervorgehoben, die ich nach 2006 durch bauliche Modifikation (siehe Text) verändert habe.

Lüftungsverluste	Volumen (m <sup>3</sup> )	N (Luftaustausch pro St.d)	Leckrate (W/°C)
Schlafzimmer	80	0.5	13.3
Küche	36	2	24
Flur	27	3	27
Andere Räume	77	1	25.7
<b>Lüftungsverluste gesamt</b>			<b>90</b>

An einem kalten Tag bei einer Außentemperatur von  $-1^{\circ}\text{C}$  und einer Innentemperatur  $19^{\circ}\text{C}$  ist die Temperaturdifferenz  $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$ . Wird diese Temperaturdifferenz 6 Stunden am Tag aufrechterhalten, dann ist der Energieverlust

$$322 \text{ W/}^{\circ}\text{C} \times 120 \text{ Grad-Stunden} \approx 39 \text{ kWh} .$$

Wird die Temperatur 24 Stunden bei  $19^{\circ}\text{C}$  gehalten, ist der Energieverlust pro Tag

$$155 \text{ kWh/d.}$$

Um einen jährlichen Mittelwert für den Energieverlust zu erhalten, können wir die Temperaturerfordernis von Cambridge aus Fig.E.5 verwenden. Mit dem Thermostat auf  $19^{\circ}\text{C}$  lag diese bei 2.866 Grad-Tagen. Also ist die mittlere Verlustrate, wenn das Haus stetig auf  $19^{\circ}\text{C}$  gehalten wird:

$$7,7 \text{ kWh/d/}^{\circ}\text{C} \times 2866 \text{ Grad-Tage/y/(365 d/y)} = 61 \text{ kWh/d.}$$

Dreht man den Thermostaten runter auf  $17^{\circ}\text{C}$ , sinkt die Verlustrate auf 48 kWh/d. Dreht man hoch auf tropische  $21^{\circ}\text{C}$ , ist die Verlustrate 75 kWh/d.

### Die Wirkung zusätzlicher Wärmedämmung

Im Jahre 2007 machte ich die folgenden Veränderungen am Haus:

1. zusätzliche Zwischenwanddämmung (die fehlte in den Hauptwänden des Hauses) – Fig.21.5
2. Verstärkung der Dachisolation
3. Zusätzliche Vordertür außerhalb der vorhandenen – Fig.21.6
4. Ersatz der Hintertür durch eine doppelverglaste.
5. Ersatz des letzten einfachverglasten Fensters durch Isolierverglasung.

Welche Veränderung am Wärmeverlust ist zu erwarten?

Die gesamte Leckrate vorher war  $322 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$ .



Die Zwischenwanddämmung (neuer U-Wert 0,6) der Hauptwände verringerte die Leckrate um 20 W/°C. Die Dachdämmung (neuer U-Wert 0,3) sollte die Leckrate um 14 W/°C verringern. Die verbesserte Verglasung (neuer U-Wert 1,6 – 1,8) sollte die Wärmeleitung um 23 W/°C reduzieren und die Lüftungsverluste um etwa 24 W/°C. Das ist eine Gesamtverbesserung um etwa 25%; von etwa 320 auf 240 W/°C (7,7 auf 5 kWh/d/°C). Tabelle E.9 zeigt die vorhergesagten Einsparungen der einzelnen Maßnahmen.

Der Wärmeverlustkoeffizient des Hauses (Wohnfläche 88 m<sup>2</sup>) ist damit hoffentlich um 25 % reduziert, von 3,7 auf 2,7 W/°C/m<sup>2</sup>. (Es ist ein weiter Weg bis zu den 1,1 W/°C/m<sup>2</sup> die ein „nachhaltiges“ Haus nach den neue Bauvorschriften erreichen soll.)

Es ist frustrierend schwer, wirklich große Fortschritte in der Leckrate eines Altbaus zu machen! Wie wir oben sahen, ist es viel einfacher, große Fortschritte durch Zurückdrehen es Thermostaten zu erzielen. Reduktion von 20°C auf 17°C ergab eine Verringerung des Wärmeverlustes um 30%.

Nimmt man diese beiden Maßnahmen zusammen – nachträgliche Dämmung und Thermostat runterdrehen – sagt das Modell eine Einsparung von knapp 50% voraus. Da noch zusätzliche Wärme im Haus generiert wird, sollte die Reduktion der Gasrechnung über 50% ausfallen.

Ich führte alle diese Modifikationen durch und las meine Zähler wöchentlich ab. Ich kann bestätigen, dass meine Heizkostenrechnung tatsächlich um mehr als 50% zurückging. Wie in Fig.21.4 gezeigt, ging meine Gasrechnung von 40 kWh/d auf 13 kWh/d zurück – eine Reduktion von 67%.

-- Hohlwandisolierung (an 2/3 der Wandfläche)	4,8 kWh/d
-- Verbesserte Dachdämmung	3,5 kWh/d
-- Verringerte Wärmeleitung in zwei Türen und einem Fenster (durch Doppelverglasung)	1,9 kWh/d
-- Geringerer Luftzug in Flur und Küche durch verbesserte Dichtungen in Türen und Fenstern	2,9 kWh/d

Tabelle E.9: Aufschlüsselung der vorausgerechneten Einsparungen beim Wärmeverlust meines Hauses an einem kalten Wintertag

### Leckraten-Verbesserung durch Innen-Wandverkleidung

Können Sie die Leckrate einer Wand verringern, indem Sie *innen* die Wand mit Isolierung bedecken? Die Antwort ist ja, doch kann es zwei Komplikationen geben. Erstens: Die Dicke der Zusatzdämmung ist größer als Sie vielleicht erwarten. Um eine 24er Vollziegelwand (U-Wert 2,2 W/m<sup>2</sup>/K) in eine nette 0,30 W/m<sup>2</sup>/K Isolierwand zu verwandeln, braucht man etwa 6 cm stark isolierte Trockenbauplatten. Zweitens kann Kondensation an den Zwischenoberflächen auftreten, die eventuell zu Dampf- und Feuchtigkeitsproblemen führt.

Wenn Sie keine so große Reduktion der Leckrate anstreben, können Sie sich auch mit dünnerer Isolierung begnügen. Es werden beispielsweise 1,8 cm starke isolierte Wandplatten mit einem U-Wert von 1,7 W/m<sup>2</sup>/K angeboten. Mit einer solchen Platte vor der bestehenden Wand reduziert man den U-Wert von 2,2 W/m<sup>2</sup>/K auf

$$1 / \left( \frac{1}{2,2} + \frac{1}{1,7} \right) \approx 1 \text{ W/m}^2/\text{K} .$$

Definitiv eine lohnenswerte Reduktion.

## Luft-Austausch

Ist ein Gebäude einmal richtig gut gedämmt, erfolgt der wesentliche Energieverlust durch Ventilation (Luftaustausch) statt durch Wärmeleitung. Den Wärmeverlust durch Lüftung kann man reduzieren, indem man die Wärme der ausströmenden Luft auf die einströmende Luft überträgt. Bemerkenswert: Der Großteil der Wärme kann tatsächlich ohne zusätzlichen Energieaufwand übertragen werden. Der Trick ist, eine Nase zu benutzen, genau wie die natürliche Selektion. Eine Nase wärmt einströmende Luft, indem sie ausströmende Luft abkühlt. Es entsteht ein Temperaturgradient in der Nase, die Nasenwände sind am kältesten nahe den Nasenlöchern. Je länger Ihre Nase, desto besser arbeitet sie als Gegenstrom-Wärmetauscher. In natürlichen Nasen wechselt gewöhnlich die Richtung des Luftstroms. Eine andere Art, so eine Nase zu organisieren ist zwei Luftdurchlässe zu haben, eine für die Einwärts- und einen für die Auswärts-Stromrichtung, aus Sicht des Luftstroms voneinander getrennt, doch eng miteinander gekoppelt, so dass ein Wärmefluss zwischen beiden einfach stattfinden kann. So funktionieren Nasen in Gebäuden. Es ist üblich, diese Nasen Wärmetauscher zu nennen.

## Ein energie-effizientes Haus

Im Jahr 1984 baute der Energieberater Alan Foster ein energie-effizientes Haus nahe Cambridge; er überließ mir freundlicherweise seine detaillierten Messergebnisse. Das Haus ist ein Bungalow in Holzrahmen-Bauweise basierend auf dem skandinavischen „Heatkeeper Serrekunda“ Design (Fig.E.10), mit 140 m<sup>2</sup> Wohnfläche, aufgeteilt in drei Schlafzimmer, ein Arbeitszimmer, zwei Bäder, ein Wohnzimmer, eine Küche und einen Flur. Die hölzernen Außenwände wurden in Fertigbauweise von einer schottischen Firma geliefert, der Rohbau wurde in wenigen Tagen erstellt. Die Wände sind 30 cm stark und haben einen U-Wert von 0,28 W/m<sup>2</sup>/°C. Von innen nach außen ist sie aufgebaut mit 13 mm Gipskartonplatten, 27 mm Luftspalt, eine Dampfsperre, 8 mm Sperrholz, 90 mm Steinwolle, 12 mm bitumen-imprägnierte Faserplatte, 50 mm Hohlraum, und 103 mm Ziegel. Die Deckenkonstruktion ist ähnlich mit 100-200 mm Steinwolle-Dämmung. Die Decke hat einen U-Wert von 0,27 W/m<sup>2</sup>/°C, der Fußboden 0,22 W/m<sup>2</sup>/°C. Die Fenster sind doppelverglast (U-Wert 2 W/m<sup>2</sup>/°C), wobei die Außenflächen der inneren Scheiben speziell beschichtet sind, um die Abstrahlung zu minimieren. Die Fenster sind so angeordnet, dass sie nennenswerte solare Einstrahlungsgewinne ermöglichen, die etwa 30% zur Raumheizung beitragen. Das Haus ist gut versiegelt, jede Tür und jedes Fenster mit Neoprendichtungen versehen. Das Haus wird beheizt durch Warmluft, die über Roste im Fußboden einströmt. Im Winter entfernen Pumpen verbrauchte Luft aus einigen Zimmern und führen sie nach draußen, und sie saugen über den Dachstuhlbereich Frischluft herein. Beide Luftströme passieren einen Wärmetauscher (Fig.E.11), der 60% der Wärme aus der Abluft rettet. Der Wärmetauscher ist ein passives Bauteil, das keine Energie benötigt: Es funktioniert wie eine große Metallnase, die die einströmende Luft an der ausströmenden wärmt. An



Fig.E.10: Das Heatkeeper Serrekunda



Fig.E.11: Der Wärmetauscher im „Heatkeeper“



einem kalten Wintertag war die Außenluft-Temperatur bei  $-8^{\circ}\text{C}$ , die Temperatur am Lufteinlass im Dachstuhl war  $0^{\circ}\text{C}$  und die Frischluft nach dem Wärmetauscher hatte  $+8^{\circ}\text{C}$ .

In den ersten 10 Jahren wurde die gesamte benötigte Wärme über Elektroheizgeräte bereitgestellt, die einen 650 l Wärmespeicher mit billigem Nachtstrom aufheizten. Erst kürzlich wurde das Haus an die Gasversorgung angeschlossen und seitdem erwärmt ein Gas-Brennwertkessel den Wärmespeicher.

Der Wärmeverlust durch Wärmeleitung und Lüftung liegt bei  $4,2 \text{ kWh/d/}^{\circ}\text{C}$ . Der Wärmeverlustkoeffizient (Leckrate pro  $\text{m}^2$  Wohnfläche) liegt bei  $1,25 \text{ W/m}^2$  (vgl. mein Haus mit  $2,7 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$ ).

Mit zwei Bewohnern und Thermostatstellung bei  $19$  oder  $20^{\circ}\text{C}$  tagsüber lag der mittlere Energieverbrauch des Hauses für Heizung bei  $8.100 \text{ kWh}$  pro Jahr oder  $22 \text{ kWh/d}$  oder  $6,6 \text{ W/m}^2$ ; der Gesamtenergieverbrauch für alle Verbraucher war  $15.000 \text{ kWh}$  pro Jahr oder  $40 \text{ kWh/d}$ . Ausgedrückt als mittlere Leistung pro Flächeneinheit sind das  $12,2 \text{ W/m}^2$ .

Fig.E.12 vergleicht die Leistungsaufnahme dieses Hauses pro Flächeneinheit mit meinem Haus (vor und nach der Effizienzsteigerung) und mit dem europäischen Durchschnitt. Der Verbrauch meines Hauses nach der Effizienzsteigerung liegt nahe an der des Heatkeepers, dank der verringerten Thermostat-Einstellungen.

## **Kenngrößen für Häuser und Büros**

Der deutsche Passivhaus-Standard zielt auf einen Energiebedarf für Heizung und Kühlung von  $15 \text{ kWh/m}^2/\text{y}$  ( $1,7 \text{ W/m}^2$ ) und einen Gesamtenergiebedarf von  $120 \text{ kWh/m}^2/\text{y}$  d.h.  $13,7 \text{ W/m}^2$  ab.

Der mittlere Energieverbrauch im englischen Dienstleistungssektor pro Einheit Geschäftsfläche ist  $30 \text{ W/m}^2$ .

### ***Ein energie-effizientes Büro***

Die National Energy Foundation baute sich ein preiswertes Niedrigenergie-Bürogebäude. Es hat solarthermische Brauchwassermodule sowie eine PV-Anlage mit max.  $6,5 \text{ kW}$  Leistung und wird mit einer  $14\text{-kW}$ -Erdwärmepumpe beheizt, gelegentlich auch mit einem Holzofen. Die Bürofläche ist  $400 \text{ m}^2$  für etwa 30 Personen. Es ist ein einstöckiges Gebäude. Die Wände beinhalten  $300 \text{ mm}$  Steinwolle-Dämmung. Die Leistungszahl (COP) der Wärmepumpe im Winter war  $2,5$ . Die benötigte Energie liegt bei  $65 \text{ kWh}$  pro Jahr und Quadratmeter Bürofläche ( $7,4 \text{ W/m}^2$ ). Die PV-Anlage liefert fast  $20\%$  dieser Energie.

### ***Moderne Bürogebäude***

Neue Bürogebäude werden häufig als besonders umweltverträglich angepriesen. Sehen wir uns ein paar Zahlen dazu an.

Das William Gates Building der Universität Cambridge beheimatet die Forscher der Computerwissenschaften, Verwaltung und ein kleines Cafe. Seine Fläche ist  $11.110 \text{ m}^2$  und sein Energiebedarf  $2.392 \text{ MWh/y}$ . Pro Flächeneinheit ist das eine Leistung von  $215 \text{ kWh/m}^2/\text{y}$  oder  $25 \text{ W/m}^2$ . Das Gebäude gewann den RIBA Award 2001 für seine angekündigten Energie-Einsparungen. „Die Architekten haben viele umweltfreundliche Aspekte in das Gebäude integriert.“ [5dhups]

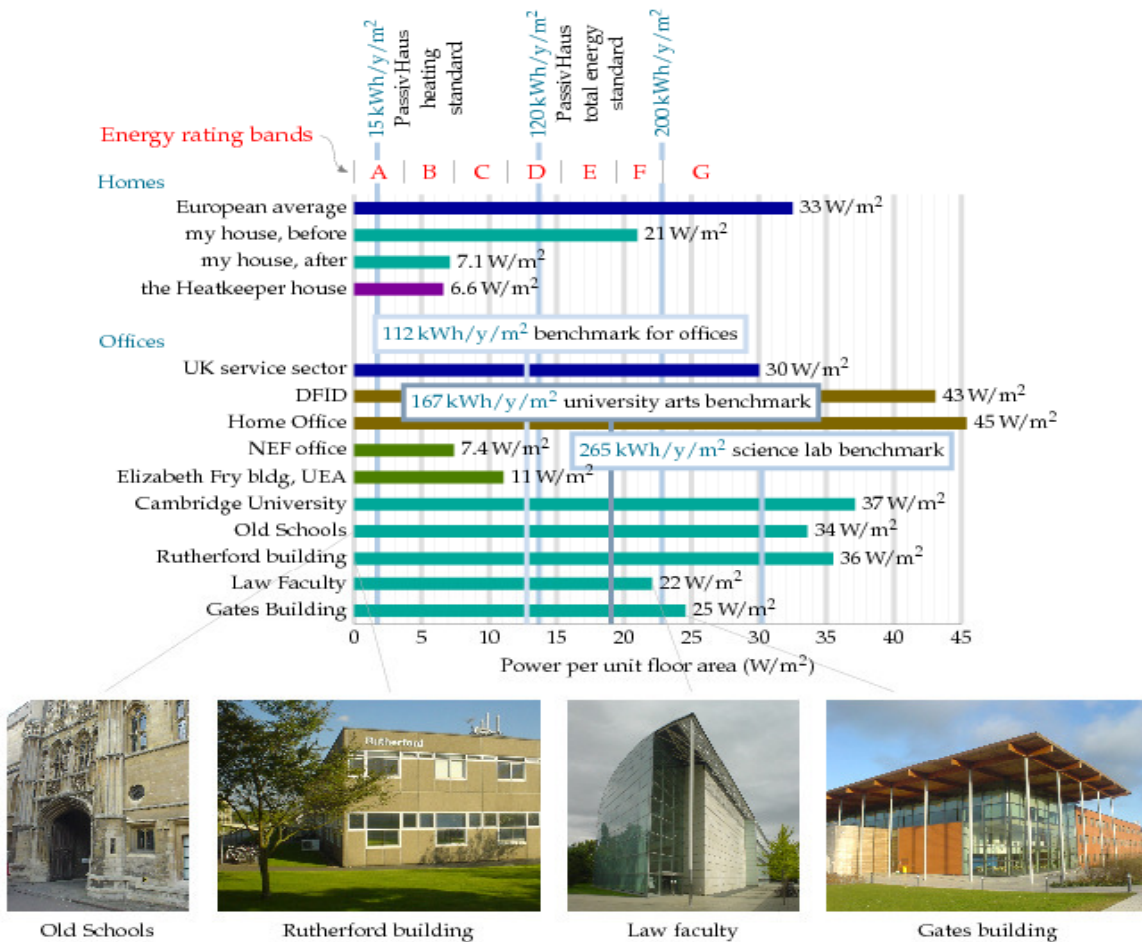


Fig.E.12. Gebäude-Kennzahlen. Energiebedarf pro Fläche in verschiedenen Wohn- und Bürogebäuden<sup>41</sup>

Doch sind diese Gebäude beeindruckend? Eine Tür weiter steht das Rutherford Building, erbaut 1970 ohne Öko-Schnickschnack – sogar ohne Doppelverglasung – hat eine Fläche von 4.998 m<sup>2</sup> und verbraucht 1.557 MWh/y; das sind 0,85 kWh/d/m<sup>2</sup> oder 36 W/m<sup>2</sup>. Das RIBA-ausgezeichnete Haus ist also nur 30% besser, im Hinblick auf Energieverbrauch pro Fläche, als sein Nachbar aus den 1970ern. Fig.E.12 vergleicht diese beiden Gebäude und einen weiteren Neubau, die juristische Fakultät, mit den Old Schools, einem Altbau aus der Zeit vor 1890. Für all das Getöse ist der Unterschied zwischen neuen und alten Bauten wirklich recht enttäuschend! Beachten Sie bitte, dass der Energieverbrauch eines Gebäudes in denselben Einheiten (W/m<sup>2</sup>) dargestellt wird wie die Erneuerbaren Energiequellen, die wir auf Seite 48, 52 und 197 diskutierten. Der Vergleich zwischen diesen Erzeugungs- und Verbrauchszahlen hilft uns zu verstehen, wie schwierig es ist, moderne Gebäude aus direkt vor Ort produzierten Erneuerbaren zu versorgen. Die Leistung pro Flächeneinheit für Biotreibstoffe (Fig.6.11, Seite 48) ist 0,5 W/m<sup>2</sup>, von Windfarmen 2 W/m<sup>2</sup>, von PV 20 W/m<sup>2</sup> (Fig.6.18, Seite 52); nur solarthermische Warmwassermodule kommen in die richtige Größenordnung mit 53 W/m<sup>2</sup> (Fig.6.3, Seite 43).

<sup>41</sup> Der Wert für „the Heatkeeper House“ (Zeile vier der Tabelle, bei „Homes“) ist nach Angaben in den Errata des Autors nicht korrekt, sondern müsste bei 12,2 W/m<sup>2</sup> liegen. An derselben Stelle führt der Autor aus: Ein anderes Problem mit Fig.E.12 ist, dass der PassivHaus-Standard einer anderen Konvention der Leistungsverbrauchs-Bestimmung folgt: Leistung wird dort nach „Primärenergieverbrauch“ gemessen, wozu Kenntnis des Quellen für Strom und Brennstoff erforderlich ist und evtl. auch Umwandlungskoeffizienten. Das bedeutet, dass der PassivHaus-Standard noch strenger ist als hier angegeben, um wie viel strenger hängt allerdings vom Energiemix ab.

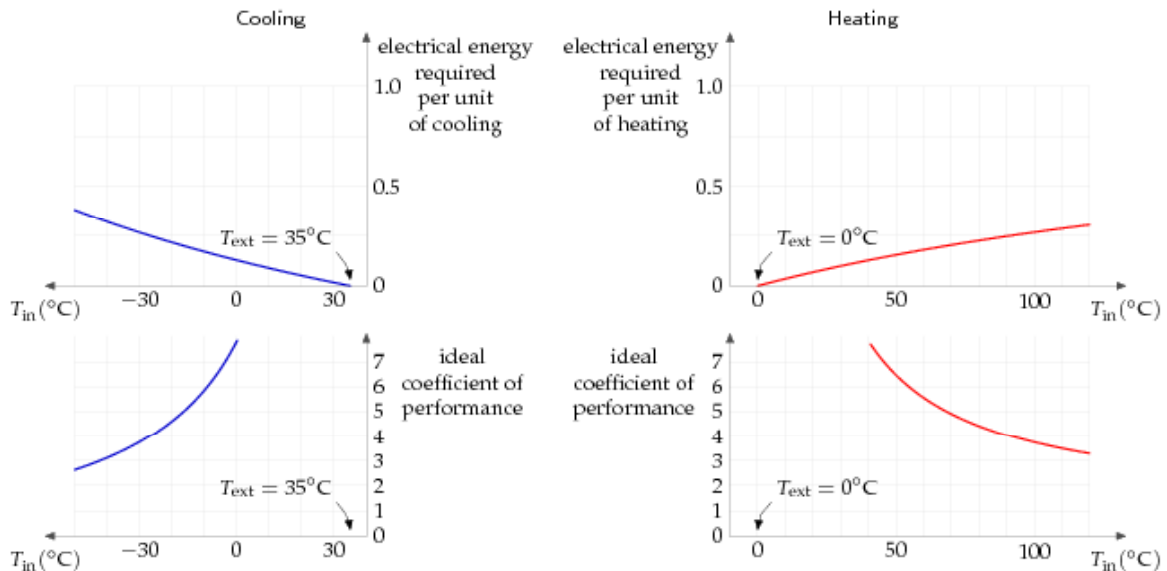


Fig.E.13: Effizienz idealer Wärmepumpen. Oben links: die idealerweise erforderliche Energie nach den Gesetzen der Thermodynamik, um Wärme aus einem Raum der Temperatur  $T_{in}$  zu pumpen, wenn die Temperatur des Außenraums, wo die Wärme hingepumpt wird,  $T_{out} = 35^{\circ}C$  beträgt. Rechts: die idealerweise erforderliche Energie, um Wärme in einen Raum der Temperatur  $T_{in}$  zu pumpen, wenn die Temperatur des Außenraums, wo die Wärme hergenommen wird,  $T_{out} = 0^{\circ}C$  beträgt. Untere Reihe: Die Effizienz ist üblicherweise als Leistungszahl (Coefficient of Performance, COP) angegeben, dem Verhältnis zwischen gepumpter Wärme und eingesetzter elektrischer Energie. In der Praxis erreichen fachgerecht installierte Erdwärmepumpen und die besten Luftwärmepumpen Leistungszahlen von 3 oder 4; doch gesetzliche Vorschriften haben in Japan die Leistungszahlen bis 6,6 hochgeschraubt.

## Verbesserung des Wirkungsgrades

Man könnte denken, dass der Wirkungsgrad eines Brennwertkessels, typisch bei 90%, schwer zu schlagen sein wird. Und doch kann man mit Wärmepumpen erheblich darüber kommen. Der Brennwertkessel benutzt chemische Energie und wandelt sie zu 90% in Nutzwärme, doch eine Wärmepumpe benutzt elektrische Energie und *schiebt* damit Wärme von einem Platz zu einem anderen (z.B. von außerhalb des Gebäudes nach innen). Gewöhnlich ist dabei die Menge nützlicher Wärme erheblich größer als die erforderliche elektrische Energie. Ein Wirkungsgrad, eine sog. Leistungszahl von 3 oder 4 (300 oder 400 %) ist normal.

### Theorie der Wärmepumpen

Das sind die Formeln der Effizienz für eine ideale Wärmepumpe, also für die elektrische Energie, die für eine Einheit gepumpter Wärme-Energie erforderlich ist. Wenn wir Wärme von draußen (Außentemperatur  $T_1$ ) an einen wärmeren Ort (Innentemperatur  $T_2$ ) pumpen wollen, ist die Effizienz im Idealfall

$$\text{Effizienz} = \frac{T_1}{T_2 - T_1},$$

wobei  $T_1$  und  $T_2$  relativ zum absoluten Nullpunkt anzugeben sind (d.h.  $T_2$  in Kelvin berechnet man aus der Celsius-Temperatur  $T_{in}$  durch  $273,15 + T_{in}$ ). Wollen wir Wärme von einem Ort der Temperatur  $T_2$  in das wärmere Äußere bei Temperatur  $T_1$  pumpen, ist die Effizienz im Idealfall

$$\text{Effizienz} = \frac{T_1}{T_1 - T_2},$$

Diese theoretischen Limits erreichen Systeme nur dann, wenn sie unendlich langsam pumpen. Man sieht, dass die Effizienz um so größer ist, je näher die Außen- an der Innentemperatur ist. In der Theorie sollten Erdwärmepumpen die größere Effizienz haben, weil die Bodentemperatur gewöhnlich näher an der Innentemperatur ist als die Außenlufttemperatur, doch in der Praxis sollten Luftwärmepumpen die beste und einfachste Wahl sein. In Städten gibt es Unsicherheit über die zukünftige Effizienz einer Grundwärmepumpe, weil der Boden um so kälter wird, je mehr Leute eine Grundwärmepumpe betreiben; dasselbe Problem andersherum kann im Sommer auftreten, wenn die Wärmepumpen zum Klimatisieren verwendet werden.

---

Wärmekapazität:	$C = 820 \text{ J/kg/K}$
Leitfähigkeit:	$\kappa = 2.1 \text{ W/m/K}$
Dichte:	$\rho = 2750 \text{ kg/m}^3$
Wärmekapazität pro Volumeneinheit:	$C_v = 2.3 \text{ MJ/m}^3/\text{K}$

---

Tabelle E.14: Statistik für Granit (Ich benutze Granit als Beispiel eines typischen Gesteins)

---

	(W/m/K)
Wasser	0.6
Quarz	8
Granit	2.1
Edkruste	1.7
Trockener Boden	0.14

---

Tabelle E.15: Wärmeleitfähigkeiten. Für mehr Daten vergleiche Tabelle E.18 auf Seite 324.

## Heizen und der Boden

Hierzu kann man eine interessante Berechnung anstellen. Stellen Sie sich vor, sie hätten solarthermische Wassererwärmung auf dem Dach und würden immer dann, wenn das Wasser über 50°C erhitzt wird, dieses durch einen großen Felsen unter Ihrem Haus pumpen. Kommt nun ein nasskalter grauer Monat, könnte Sie die Wärme im Felsen verwenden, um Ihr Haus zu heizen. Wie groß müsste der 50°C-Felsen sein, damit er genug Energie hätte, um Ihr Haus einen Monat lang zu heizen? Nehmen wir an, wir benötigten 24 kWh pro Tag für 30 Tage und das Haus wäre bei 16°C. Die Wärmekapazität von Granit ist  $0,195 \cdot 4.200 \text{ J/kg/K} = 820 \text{ J/kg/K}$ . Die erforderliche Masse Granit ist

$$\begin{aligned} \text{Masse} &= \frac{\text{Energie}}{\text{Wärmekapazität} \times \text{Temperaturdifferenz}} \\ &= \frac{24 \times 30 \times 3,6 \text{ MJ}}{(820 \text{ J/kg/}^\circ\text{C})(50^\circ\text{C} - 16^\circ\text{C})} \\ &= 100.000 \text{ kg,} \end{aligned}$$

100 Tonnen, was einem Quader der Größe 6m x 6m x 1m entspricht.

### *Erdspeicherung ohne Wände*

OK, wir haben die Größe eines nutzbaren Erdspeichers herausgefunden. Aber ist es schwierig, die Wärme darin zu halten? Müssen wir den Felsquader mit einer besonderen Isolierung umgeben? Es zeigt sich, dass der Erdboden selbst ein relativ guter Isolator ist. Eine kleine Spitze Wärme, die in ein Loch eingebracht wird, breitet sich aus gemäß

$$\frac{1}{\sqrt{4\pi\kappa t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4(\kappa/(C\rho))t}\right)$$

wobei  $\kappa$  die Leitfähigkeit des Bodens,  $C$  seine Wärmekapazität und  $\rho$  seine Dichte bezeichnet. Dies beschreibt eine Glockenkurve mit der Breite

$$\sqrt{2 \frac{\kappa}{C\rho} t};$$

nach sechs Monaten beispielsweise ( $t = 1,6 \times 10^7$  s) ist mit den Daten für Granit ( $C = 0,82$  kJ/kg/K,  $\rho = 2500$  kg/m<sup>3</sup>,  $\kappa = 2,1$  W/m/K) die Breite **6 m**. Mit den Daten für Wasser ( $C = 4.2$  kJ/kg/K,  $\rho = 1000$  kg/m<sup>3</sup>,  $\kappa = 0,6$  W/m/K) ist die Breite 2 m. Ist die Speicherregion größer als 20m x 20m x 20m ist also die meiste gespeicherte Wärme nach sechs Monaten noch da (weil 20 m signifikant größer als 6 m bzw. 2 m sind).

### ***Grenzen der Erdwärmepumpen***

Die geringe Wärmeleitfähigkeit des Erdbodens ist ein zweiseitiges Schwert. Dank dieser geringen Leitfähigkeit hält der Boden die Wärme gut für eine längere Zeit. Andererseits bedeutet geringe Leitfähigkeit, dass es nicht einfach ist, Wärme schnell in den und aus dem Erdboden zu pumpen. Sehen wir uns an, wie die Leitfähigkeit den Einsatz von Erdwärmepumpen limitiert.

temperature (°C)

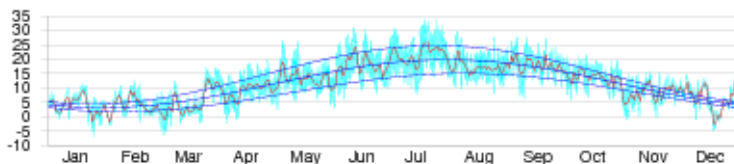


Fig.E.16: Die Temperaturkurve von Cambridge und ein Fit, der die Temperatur als Überlagerung einer jährlichen Sinusschwankung zwischen 3°C und 20°C und einer täglichen Sinusschwankung mit bis zu 11,3°C Amplitude annähert. Die mittlere Temperatur ist 11,5°C.

Betrachten wir eine Nachbarschaft mit ziemlich hoher Bevölkerungsdichte. Kann jeder Erdwärmepumpen betreiben, ohne aktive Rückführung im Sommer (wie auf Seite 169 beschrieben)? Die Befürchtung ist, dass wir, wenn wir alle zugleich Wärme aus dem Boden saugen, diesen zu Eis gefrieren könnten. Ich werde mich dieser Frage mit zwei Berechnungen nähern. Zuerst bestimme ich den natürlichen Wärmefluss in den und aus dem Boden im Sommer und im Winter. Ist der Wärmefluss, den wir im Winter aus dem Boden saugen wollen, signifikant höher als der natürliche Fluss, dann wissen wir, dass unser Saugen die Bodentemperatur signifikant verändern wird und deshalb wohl nicht funktionieren kann. Für diese Berechnung nehme ich an, dass sich die Bodentemperatur durch die verschiedenen Einflüsse von Sonne, Wolken und Nachthimmel langsam im Jahresverlauf auf und ab bewegt (Fig.E.16).

### ***Die Auswirkungen externer Temperaturveränderung***

Um die Wirkung der Außentemperatur in den Boden und die verschiedenen Energieflüsse in den und aus dem Boden zu bestimmen, braucht man etwas höhere Mathematik, die ich in Box E.19 ans Ende dieses Kapitels ausgelagert habe.

Das Ergebnis dieser Berechnung ist ein hübsches Diagramm (Fig.E.17), das zeigt, wie die Temperatur in jeder Tiefe verläuft. Es ist für jedes Bodenmaterial anwendbar, da die Materialeigenschaften allein in der charakteristischen Länge  $z_0$  (Gleichung E.7)) liegen, die von der Leitfähigkeit  $\kappa$  und der Wärmekapazität  $C_v$  sowie von der Frequenz  $\omega$  der Temperaturänderung abhängt. (Wir können tägliche und jahreszeitliche Variationen gleichermaßen mit dieser Theorie beschreiben.) In der Tiefe  $2z_0$  beträgt die Temperaturschwankung noch ein Siebtel von der an der Oberfläche, und ist um etwa eine



Drittelperiode verzögert. In der Tiefe  $3z_0$  beträgt die Schwankung noch ein Zwanzigstel und ist um eine halbe Periode verzögert.

Im Falle der täglichen Schwankungen in Granit beträgt die charakteristische Länge  $z_0 = 0,16$  m. (Also sind 32 cm Stein die Dicke, die man braucht, um tägliche Temperaturschwankungen abzuschirmen.) Für die jahreszeitlichen Schwankungen in Granit ist die charakteristische Länge  $z_0 = 3$  m.

Konzentrieren wir uns auf jährliche Schwankungen und betrachten wir einige andere Materialien. Charakteristische Längen für verschiedene Materialien stehen in der dritten Spalte von Tabelle E.18. Für feuchte Sandböden oder für Beton sind die charakteristischen Längen vergleichbar mit der von Granit – etwa 2,6 m. In trockenen oder torfigen Böden ist die charakteristische Länge  $z_0$  kürzer – etwa 1,3 m. Das ist vielleicht eine gute Nachricht, denn sie bedeutet, dass Sie dort nicht so tief graben müssen, um Boden mit konstanter Temperatur zu finden. Doch es ist auch eine schlechte Nachricht: Die natürlichen Flüsse sind in trockenen Böden ebenfalls geringer.

Der natürliche Fluss variiert übers Jahr und hat einen Spitzenwert (Gleichung (E.9)), der um so kleiner ist, je kleiner die Leitfähigkeit ist.

Im Falle von Granit ist der maximale Fluss  $8 \text{ W/m}^2$ . Für trockene Böden liegt der maximale Fluss zwischen  $0,7 \text{ W/m}^2$  und  $2,3 \text{ W/m}^2$ , für feuchte Böden zwischen  $2 \text{ W/m}^2$  und  $8 \text{ W/m}^2$ .

Was bedeutet das? Ich schlage vor, wir nehmen eine Fluss in der Mitte dieser Zahlen an,  $5 \text{ W/m}^2$ , als eine praktische Kenngröße, um eine Abschätzung zu erhalten, welche Leistung wir mit einer Erdwärmepumpe pro Flächeneinheit aus dem Boden pumpen können. Saugen wir einen Fluss signifikant kleiner als diese  $5 \text{ W/m}^2$ , wird die Störung, die wir gegenüber dem natürlichen Fluss bewirken, klein sein. Saugen wir dagegen mit einem Fluss größer als  $5 \text{ W/m}^2$ , müssen wir damit rechnen, dass wir die Bodentemperatur signifikant vom natürlichen Wert wegschieben und solche Flüsse gar nicht erreicht werden können.

Die Bevölkerungsdichte einer typischen englischen Vorstadtsiedlung entspricht etwa  $160 \text{ m}^2$  pro Person (Doppelhaus-Reihen mit  $400 \text{ m}^2$  pro Haus, einschließlich Straßen und Höfen. Bei dieser Siedlungsdichte können wir die Größenordnung für die Schranke der Wärmepumpen-Leistung ausrechnen:

$$5 \text{ W/m}^2 \times 160 \text{ m}^2 = 800 \text{ W} = 19 \text{ kWh/d pro Person.}$$

Das ist ungemütlich nahe an der Leistung, die wir im Winter gerne pumpen würden: Es ist anzunehmen, dass unser Spitzenbedarf im Winter für Warmluft und Warmwasser bei einem alten Haus wie dem meinen gut  $40 \text{ kWh/d}$  pro Person erreichen kann.

Diese Berechnung legt nahe, dass in einer städtischen Siedlung *nicht jeder eine Erdwärmepumpe benutzen kann*, außer wenn man im Sommer darauf achtet, aktiv Wärme in den Boden zurückzupumpen.

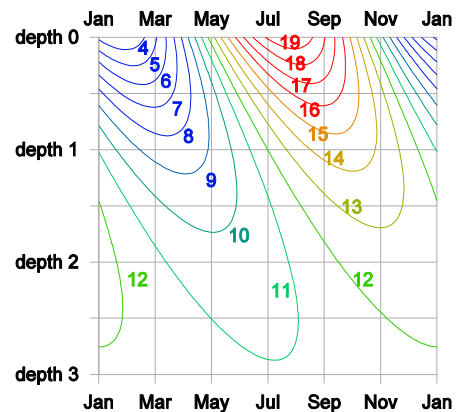


Fig.E.17: Temperatur (in °C) vs. Tiefe und Zeit. Die Tiefe ist in Vielfachen der charakteristischen Länge  $z_0$  angegeben, die für Granit 3 m beträgt. In der „Tiefe 2“ (6 m) ist die Temperatur immer bei 11 oder 12 °C. Bei „Tiefe 1“ taumelt sie noch zwischen 8 und 15 °C.

Lassen Sie mich noch eine zweite Rechnung anstellen und ableiten, welche Leistung man stetig mit einer Rohrschleife in einer Tiefe  $h = 2\text{m}$  saugen kann. Wir erlauben uns, die Temperatur bei der Rohrschleife um  $\Delta T = 5^\circ\text{C}$  unter die mittlere Bodentemperatur an der Oberfläche abfallen zu lassen und nehmen eine konstante Bodentemperatur an der Oberfläche an. Dann können wir den Wärmefluss von der Oberfläche berechnen. Bei einer angenommenen Leitfähigkeit von  $1,2\text{ W/m/K}$  (typisch für feuchten Lehmboden)

$$\text{Fluss} = \kappa \times \frac{\Delta T}{h} = 3\text{ W/m}^2.$$

Wenn wir wieder wie oben eine Bevölkerungsdichte von  $160\text{ m}^2$  pro Person annehmen, ist das Maximum der Wärmeleistung einer Erdwärmepumpe, wenn jeder in der Nachbarschaft eine hat,  $480\text{ W}$  oder  $12\text{ kWh/d}$  pro Person.

Wieder kommen wir also zu dem Ergebnis, dass in einer typischen Siedlung mit schlecht isolierten Häusern wie dem meinen *nicht jeder ein Erdwärmepumpe betreiben kann*, außer wenn man im Sommer darauf achtet, aktiv Wärme in den Boden zurückzupumpen. In Großstädten mit noch höherer Bevölkerungsdichte sind Erdwärmepumpen wahrscheinlich gar nicht einsetzbar.

Deshalb rate ich zu Luftwärmepumpen als die beste Heizmöglichkeit für die meisten Leute.

	Wärme- Leitfähigkeit $\kappa$ (W/m/K)	Wärme- Kapazität $C_v$ (MJ/m <sup>3</sup> /K)	Charakt. Länge $z_0$ (m)	Fluss $A\sqrt{C_v\kappa\omega}$ (W/m <sup>2</sup> )
Luft	0.02	0.0012		
Wasser	0.57	4.18	1.2	5.7
Granit	2.1	2.3	3.0	8.1
Beton	1.28	1.94	2.6	5.8
<i>Sandboden</i>				
trocken	0.30	1.28	1.5	2.3
50% feucht	1.80	2.12	2.9	7.2
100% feucht	2.20	2.96	2.7	9.5
<i>Lehmboden</i>				
trocken	0.25	1.42	1.3	2.2
50% feucht	1.18	2.25	2.3	6.0
100% feucht	1.58	3.10	2.3	8.2
<i>Torfboden</i>				
trocken	0.06	0.58	1.0	0.7
50% feucht	0.29	2.31	1.1	3.0
100% feucht	0.50	4.02	1.1	5.3

Tabelle E.18: Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität verschiedener Materialien und Böden, die daraus abgeleitete charakteristische Länge

$z_0 = \sqrt{\frac{2\kappa}{C_v\omega}}$  und der maximale Fluss  $A\sqrt{C_v\kappa\omega}$  für jährliche Temperaturschwankungen mit einer Amplitude von  $8,3^\circ\text{C}$ . Die Sand- und Lehmböden haben eine Porosität von 0,4; Torfboden hat die Porosität 0,8.

## Thermische Masse

Hilft eine Erhöhung der thermischen Masse eines Gebäudes, die Heiz- und Kühlkosten zu verringern? Das kommt darauf an. Die Außentemperatur kann im Tagesverlauf um etwa  $10^\circ\text{C}$  schwanken. Ein Gebäude mit großer thermischer Masse (etwa mit dicken Steinwänden) wird diese Schwankungen auf natürliche Weise ausgleichen und ohne Heizung oder Kühlung seine Innentemperatur etwa auf der mittleren Außentemperatur halten. Solche Gebäude benötigen in England über viele Monate weder Kühlung noch Heizung. Im Gegensatz dazu könnte ein schlecht isoliertes

Haus geringer thermischer Masse tagsüber als zu warm und nachts als zu kalt empfunden werden, was zu größerem Heiz- und Kühlaufwand führt.

Doch ist große thermische Masse nicht immer ein Vorteil. Ist ein Zimmer im Winter nur für wenige Stunden pro Tag genutzt (etwa ein Leseraum), ist die erforderliche Energie, um den Raum auf angenehme Temperatur zu bringen um so größer, je größer auch seine thermische Masse ist. Die zusätzlich investierte Wärme wird länger in einem thermisch massiven Raum gehalten, doch wenn keiner da ist, der sich darüber freut, ist diese Energie vergeudet. Im Falle unregelmäßig benutzter Räume macht es Sinn, eine Bauweise mit geringer thermischer Masse anzustreben und die geringe Masse bei Bedarf schnell aufzuheizen.

## Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

323 Tabelle E.18 Quelle: Bonan (2002),

[www.hukseflux.com/thermalScience/thermalConductivity.html](http://www.hukseflux.com/thermalScience/thermalConductivity.html)

Wenn wir annehmen, dass der Boden aus festem, homogenem Material mit Leitfähigkeit  $\kappa$  und Wärmekapazität  $C_V$  besteht, dann folgt die Temperatur in Tiefe  $z$  unter der Oberfläche, zur Zeit  $t$ , der anstehenden Temperatur an der Oberfläche entsprechend der Diffusionsgleichung

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \frac{\kappa}{C_V} \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2}. \quad (\text{E.4})$$

Liegt an der Oberfläche  $z = 0$  ein sinusförmiger Temperaturverlauf mit der Frequenz  $\omega$  und der Amplitude  $A$  vor,

$$T(0,t) = T_{\text{Oberfläche}}(t) = T_{\text{mittel}} + A \cos(\omega t), \quad (\text{E.5})$$

dann ist die resultierende Temperatur in der Tiefe  $z$  zur Zeit  $t$  eine abfallende und oszillierende Funktion

$$T(z,t) = T_{\text{mittel}} + A e^{-z/z_0} \cos(\omega t - z/z_0), \quad (\text{E.6})$$

wobei  $z_0$  eine charakteristische Länge sowohl für den Abfall als auch für die Oszillation ist

$$z_0 = \sqrt{\frac{2\kappa}{C_V \omega}}. \quad (\text{E.7})$$

Der Wärmefluss (die Leistung pro Einheitsfläche) in der Tiefe  $z$  ist

$$\kappa \frac{\partial T}{\partial z} = \kappa \frac{A}{z_0} \sqrt{2} e^{-z/z_0} \sin(\omega t - z/z_0 - \pi/4). \quad (\text{E.8})$$

Beispielsweise ist an der Oberfläche der maximale Fluss

$$\kappa \frac{A}{z_0} \sqrt{2} = A \sqrt{C_V \kappa \omega}. \quad (\text{E.9})$$

Box E.19: Herleitung des natürlichen Wärmeflusses verursacht durch sinusförmige Temperaturschwankungen.