4. Nicht-konzentrierende Solarthermie

In diesem Abschnitt wollen wir die Nutzung der Sonnenenergie zur Erwärmung von Brauchwasser besprechen. Naturgemäß ist dies ein eher ingenieurtechnischer Bereich. Wir werden uns die eher physikalisch interessanten Rosinen herauspicken – leider gibt es davon nicht viele …

4.1 Schwimmbäder

Schwimmbäder eignen sich hervorragend zur Nutzung der Solarenergie: ~~da~~

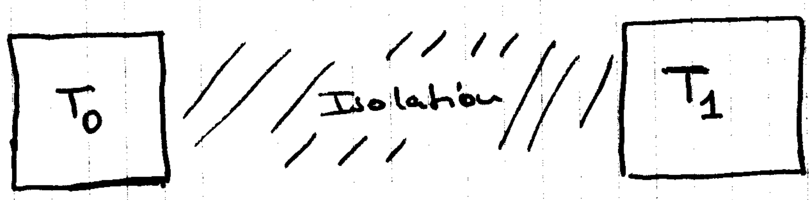
- Schwimmwasser ist Wärmereservoir
- Niedrige Temperaturen von ~ 23 °C angestrebt, d.h. thermische Verluste sind gering

In der BRD existieren ~ 8000 öffentliche und ~ 500 000 private Schwimmbäder.
Typischer Wärmebedarf ~ 150 kWh bis 450 kWh pro m^2 Wasserfläche. Bsp: 2000 m^2 durch Solar statt Heizöl beheizt ⇒ 75 000 l Öl oder 150 000 kg CO_2 pro Saison eingespart.

Als Materialien werden Kunststoffrohre verwendet, die schwarz gefärbt und UV beständig sind.

4.2 Wärme u. Wärmeleitung

Existiert zwischen zwei Reservoirs mit unterschiedlicher Temperatur ein Kontakt, so kommt es zum Wärmefluß welcher die Temperaturen auszugleichen versucht.



Die Wärmestromdichte $\vec{j}(\vec{x})$ ist definiert durch den totalen Wärmefluß durch einen Querschnitt A:

$$\frac{\delta Q}{dt} = \int_A d\vec{A}\, \vec{j}(\vec{x})$$

und das Fouriersche Gesetz der Wärmeleitung lautet

$$\vec{j}(\vec{x}) = -\lambda \operatorname{grad} T(\vec{x})$$

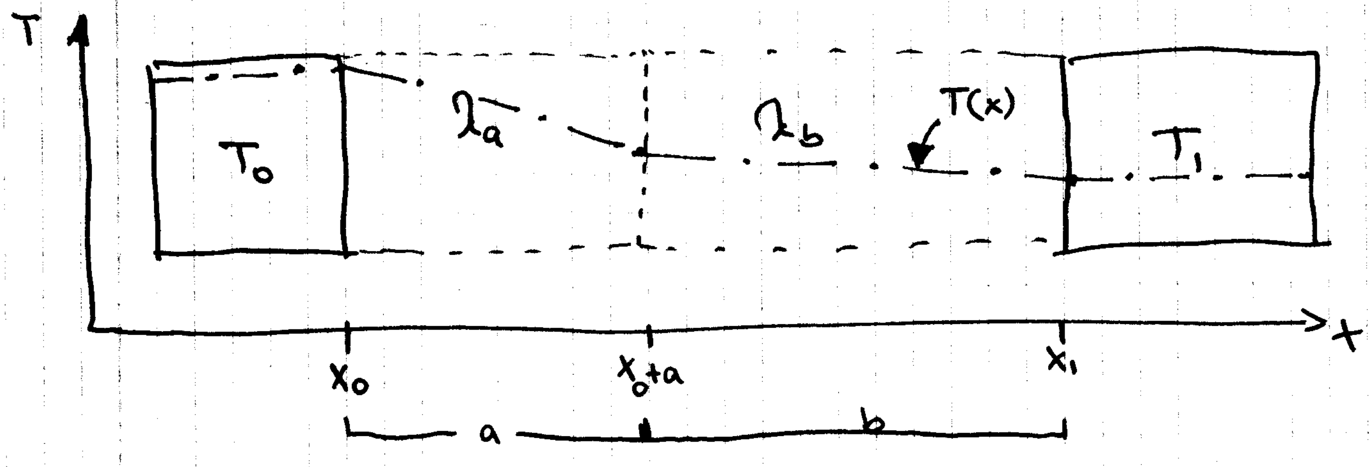
mit der Wärmeleitzahl λ

In einer Dimension also $j(x) = -\lambda \frac{dT}{dx}$.

Lösen wir nun die Wärmeleitungsgleichung für den stationären Fall und am Beispiel einer Isolation, welche aus zwei Schichtdicken "a" und "b" mit unterschiedlichen Materialien "λ_a" und "λ_b" besteht:

Im stationären Fall muß entlang der Isolation stets die gleiche Wärmestromdichte $j(x) = \text{const} = j$ herrschen: schließlich wird in der Isolation im stationären Fall Wärme weder erzeugt noch vernichtet.

Bildlich:



Integriert man das Fouriersche Gesetz

$$j\,dx = -\lambda\,dT \quad \Rightarrow \quad -dT = j\,\frac{dx}{\lambda(x)}$$

in unserem Beispiel ergibt sich

$$-\int_0^1 dT = j\int\frac{dx}{\lambda(x)} = \frac{j}{\lambda_a}\int_{x_0}^{x_0+a} dx + \frac{j}{\lambda_b}\int_{x_0+a}^{x_1} dx$$

$$\Rightarrow \quad T_0 - T_1 = j\left[\frac{a}{\lambda_a} + \frac{b}{\lambda_b}\right]$$

oder

$$j = \frac{T_0 - T_1}{\left[\frac{a}{\lambda_a} + \frac{b}{\lambda_b}\right]}$$

erweitert man dies auf n Schichten mit Wärmeleitzahl λ_i und Dicke s_i:

$$j = \frac{T_0 - T_1}{\sum \frac{s_i}{\lambda_i}}$$

Nimmt man schließlich noch den Wärmeübergang auf beiden Seiten gerade hinzu, so kann man den Wärmedurchgangskoeffizienten "k" bilden:

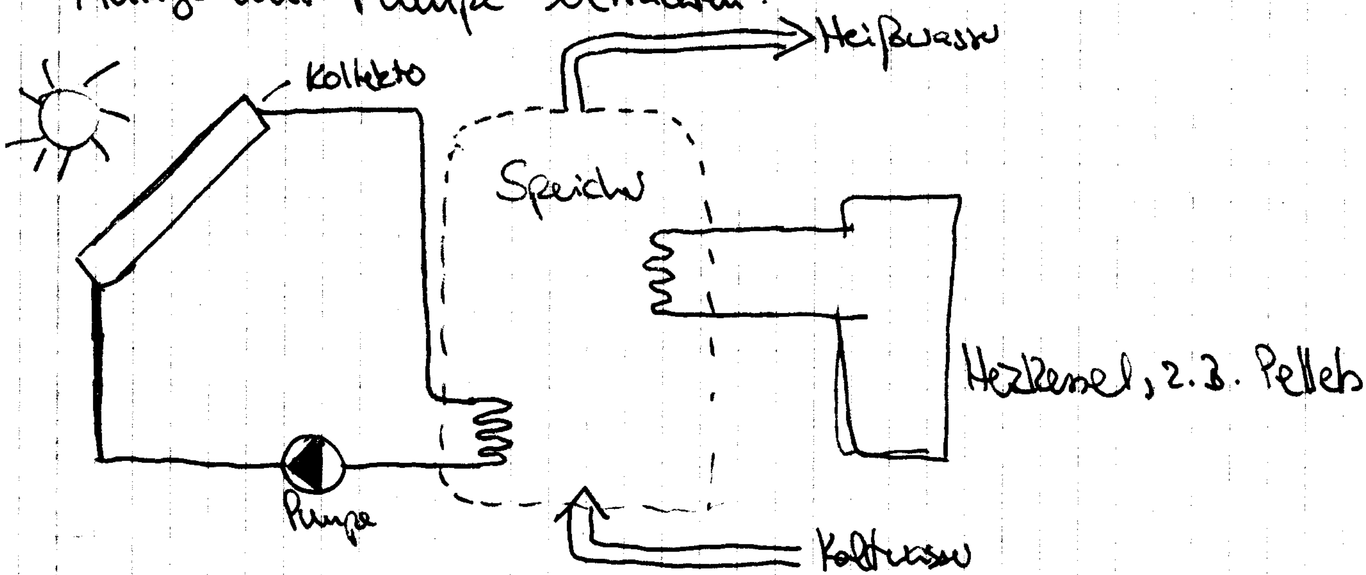
$$k = \left[\frac{1}{\alpha_0} + \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{n} \frac{s_i}{\lambda_i} \right]^{-1}$$

und der Wärmefluß wird zu

$$\frac{\delta Q}{dt} = kA\,(T_0 - T_1)$$

4.3 Solarthermieanlagen mit Zwangsumlauf

Als typische Brauchwasseranlage kann man eine Anlage mit Pumpe betrachten:



Hiebei wird das heiße Wasser in einem 200l ~ 1500l Wasserspeicher angesammelt. Die Pumpe zum Kollektor schaltet sich dann ein, wenn die Temperatur im Kollektor die des Speichers um 5 - 10° C übersteigt.

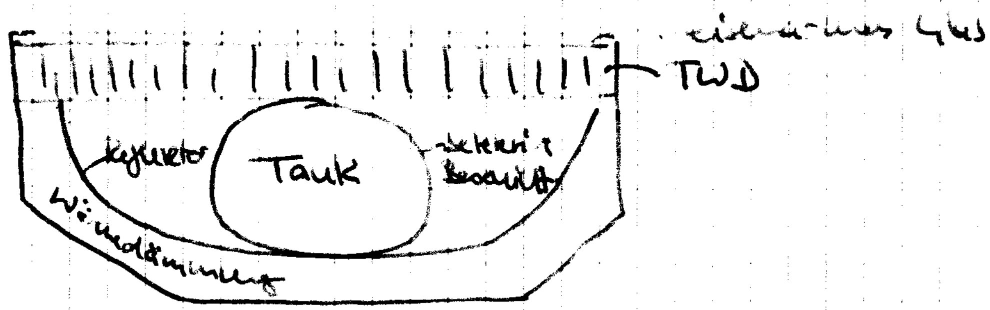
In den Wintermonaten wird zusätzlich mit einem konventionellen Ofen hinzugeheizt.
Besonders elegant gelingt dies mit einer Pelletheizung. Diese arbeitet nur mit einem Pufferspeicher effizient, welcher bei unserer Anlage eh schon vorhanden ist.

4.4 Solar Kollektoren

Hier werden wir auf Bauformen und Materialien eingehen

4.4.1 Speicherkollektoren

Relativ neu sind Kollektoren, bei denen der Pufferspeicher im Kollektor integriert wird. Bisher war dies an der unzureichenden Wärmedämmung des eingesetzten Glases gescheitert. Inzwischen gibt es aber "Transparente Wärmedämmung" (TWD), die auf der Frontseite den Wärmedurchgang entscheidend reduzieren. Von
$k \sim 3..6 \frac{W}{m^2K}$ für Glas hin zu $0.7 ... 0.5 \frac{W}{m^2K}$
für Polycarbonatstrukturen (100 mm) oder Aerogelgranulat (Ka...)



Vorteile:
- kein externer Speicher
- geringere Kosten

4.4.2 Flachkollektoren

Flachkollektoren sind derzeit am verbreitetsten. Sie bestehen aus:

- Transparente Abdeckung
- Gehäuse
- Absorber

Folie (Folie)

Die Frontscheibe reflektiert, absorbiert und transmittiert die einfallende Strahlungsleistung Φ_e mit den Koeffizienten:

τ : transmission

α : absorption

ϱ : reflexion

und $\varrho + \tau + \alpha = 1$.

Im thermischen Gleichgewicht muß die Scheibe ebensoviel Energie absorbieren wie emittieren, sie würde sich sonst erhitzen, bzw. abkühlen. In diesem Fall also

$$\alpha = \underset{\uparrow \text{ Emissionsgrad}}{\varepsilon}$$

genau genommen sind α und ε frequenzabhängig, also

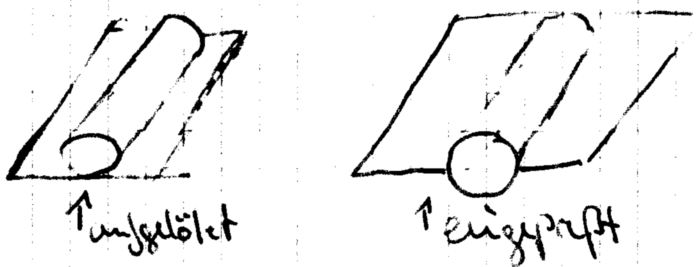
$$\alpha(\omega) = \varepsilon(\omega)$$

In der Praxis hat sich für die Frontscheibe eisenarmes Solarglas durchgesetzt, da diese $\tau \to 1$ hat. Meist wird das Glas sogar nur als Einfachverglasung ~~a~~ verwendet.

Spezielle Materialien für die Scheibe, können die Energiebilanz weiter verbessern, kommen bei uns aber aus Kostengründen nicht in Frage.
Die Materialien absorbieren fast nicht im sichtbaren Bereich, in dem die Sonne abstrahlt, wohl aber im langwelligen infraroten Bereich, indem die

Folie Wärmestrahlung des Kollektors auftritt: (Folie)

Der Absorber wird meistens als Fahnenabsorber mit aufgelötetem oder eingepresstem Kupferrohr gebaut:



Der Absorber soll nun die Strahlung der Sonne aufnehmen und möglichst wenig davon wieder emittieren.

Wir hatten ja in der 2. Vorlesung das Stefan-Boltzmann Gesetz benutzt:

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad \text{mit} \quad A = 1\,m^2 \text{ und } \sigma = 5.7 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

ergibt sich dann für die Abstrahlung unseres Absorbers pro m^2 (die wir ja eigentlich gar nicht wollen) für den Fall, daß dieser näherungsweise ein schwarzer Körper wäre:

$$P = 5.7 \cdot 10^{-8} \frac{W}{K^4} T^4$$

Nun strahlt die Sonne aber nur mit ca. 1000 W/m² ein, d.h. bei einer Absorbertemperatur von

$$5.7 \cdot 10^{-8} \frac{W}{K^4} T^4 \stackrel{!}{=} 1000 \, W$$

$$\Rightarrow T \approx 360 K \approx 90°C$$

Überwiegt die Abstrahlung des Absorbers den Einfall der Sonnenenergie (ganz zu schweigen von Dämmung etc).

Den Ausweg aus diesem Dilemma liefern sogenannte "selektive Beschichtungen". Bei diesen ist die Absorption (u. Emission!) im sichtbaren Bereich hoch, im langwelligen infraroten Bereich aber gering.

Somit wird das fast Plancksche Spektrum der Sonne sehr gut absorbiert, die an sich "Plancksche" Strahlung der Absorbertemperatur kommt jedoch nicht zustande: der Absorber wird im Spektralbereich der Absorbertemperatur die Leistung nicht richtig los!

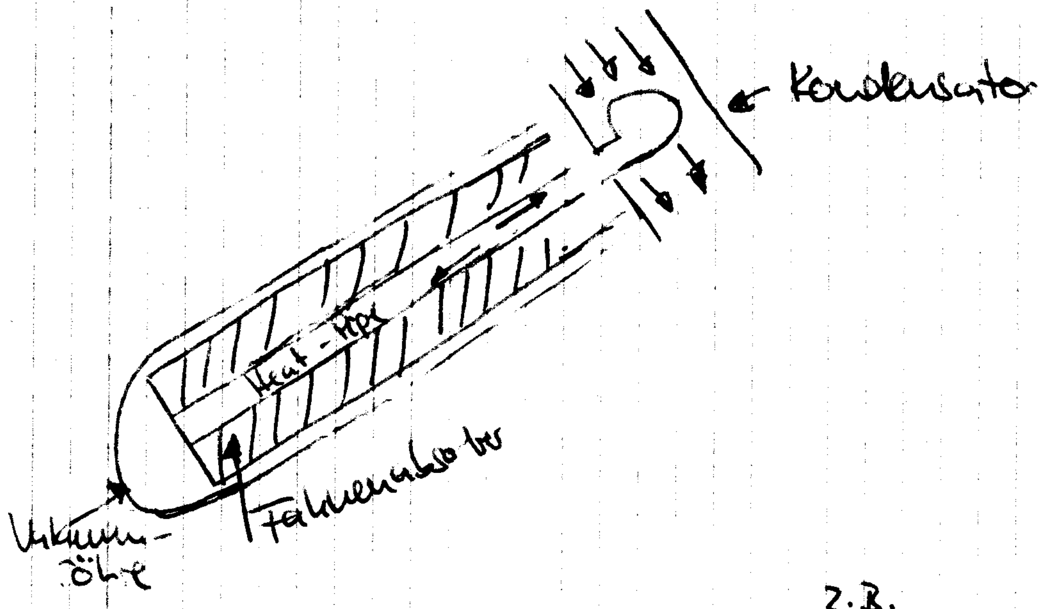
Folie!

		sichtbar	infrarot
Bsp.:	nicht selektiver Abs.:	$\alpha = \varepsilon = 0.97$	$\alpha = \varepsilon = 0.97$
	TiNOX	$\alpha = \varepsilon = 0.95$	$\alpha = \varepsilon = 0.04$

4.4.3 Vakuumröhrenkollektoren

In den vollständig abgeschlossenen Glasröhren des Vakuumröhrenkollektors läßt sich ein Hochvakuum lange Zeit aufrechterhalten (Getter zum H-einfang).

In den Röhren befindet sich ein Absorberblech in dessen Mitte eine Heat-pipe angebracht ist. In der Heat pipe ist eine Flüssigkeit, welche bei den dort herrschenden Temperaturen verdampft, die Pipe nach oben steigt und in einem Kondensator abkühlt, welcher wiederum die Wärme abtransportiert. Die abgekühlte Flüssigkeit fließt dann durch Schwerkraft den Absorber hinab:



Nimmt man als Flüssigkeit z.B. Methanol:

Siedepunkt: 65°C

Verdampfungswärme: 845 $\frac{kJ}{kg}$

so muß man, um E = 1000 Ws = 1kJ Strahlungsenergie pro m² abzutransportieren $m = \frac{1\,kJ}{845\,kJ}\,kg \approx 1.2\,g$

pro Sekunde verdampfen.

4.5 Wärmespeicher

Nehmen wir einen Wärmespeicher gefüllt mit der Masse "m" Wasser und der spezifischen Wärmekapazität $c = 4{,}2\ kJ/kgK = 1.2\ Wh/(kgK)$.
Unser Speicher soll eine momentane Temperatur $T(t)$ haben, einen Isolierung mit Wärmedurchgangszahl k und eine Umgebungstemperatur $T_{Raum} = 20°C$.

Für einen 300 l Speicher ergibt sich dann die gespeicherte Wärmemenge bei z.B. $T = 90°C$

$$Q = c \cdot m\,(T - T_{Raum}) = 1.2\ \frac{Wh}{kgK} \cdot 300\ (70K)$$
$$\approx \underline{25\ kWh}$$

Doch wie lange speichert eine Speicher die Wärme?
Hierzu betrachten wir einerseits

$$\delta Q = -c \cdot m \cdot dT$$

und andererseits

$$\frac{\delta Q}{dt} = kA\,(T - T_{Raum})$$

mit der Oberfläche A.
Dann können wir schreiben:

$$-c \cdot m \cdot \frac{dT}{dt} = kA\,(T - T_{Raum})$$

$$\Rightarrow\ -\frac{c \cdot m}{kA}\,\frac{dT(t)}{dt} = T(t) - T_{Raum}$$

Die homogene Gleichung wird gelöst durch

$$T(t) = \Omega \exp\left[-\frac{kA}{cm}t\right],$$

die inhomogene durch

$$T(t) = \Omega \exp\left[-\frac{kA}{cm}t\right] + T_{Raum}$$

und schließlich der Vorfaktor Ω bestimmt durch

$$T(t=0) = \Omega + T_{Raum} \Rightarrow \Omega = T(t=0) - T_{Raum},$$

also:

$$T(t) = \left(T(0) - T_{Raum}\right) \exp\left[-\frac{kA}{cm}t\right] + T_{Raum}$$

Die Zeitkonstante der Abkühlung ist demnach durch

$$\tau = \frac{c \cdot m}{k \cdot A}$$ gegeben. (so daß $T(t) \propto e^{-t/\tau}$)

Nehmen wir als Bsp einen $m = 1000\,kg$ Tank, mit $100mm$ Isolierung aus Steinwolle und $\lambda = 0.04 \frac{W}{mK}$.

Ergo ist $k = \frac{\lambda}{0.1m} = 0.4 \frac{W}{Km^2}$

Unsere 1000 kg Wasser packen wir der Einfachheit halber in einen kugelförmigen Tank:

$$1000\,dm^3 = 1\,m^3 = \frac{4}{3}\pi r^3 \Rightarrow r = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi}}\,m$$

$$\approx \underline{\underline{0.6\,m}}$$

Mit Oberfläche $A = 4\pi r^2 = 4\pi \left(\frac{3}{4\pi}\right)^{2/3} m^2 \approx \underline{\underline{4.8\, m^2}}$

Demnach ist die Zeitkonstante

$$\tau = \frac{1.2\ Wh/(kg K) \cdot 1000\ kg}{0.4\ W/(K m^2) \cdot 4.8\ m^2}$$

$$= \underline{\underline{625\ h}}.$$

4.6 Nutzwärmebedarf und solarer Deckungsgrad

Der Wärmebedarf Q_N zur Brauchwasserversorgung kann durch die Menge an Warmwasser pro Tag abgeschätzt werden:

$$Q_N = c \cdot m \,(T_{WW} - T_{KW})$$

wobei $T_{WW} = 10^\circ C$ angenommen werden kann.

Pro Person ergibt dies je nach Gewohnheiten ca. $\underline{\underline{Q_N \sim 1000 - 4000\ Wh/Tag}}$.

Eine wichtige Kenngröße zur Dimensionierung der Solaranlage stellt der "solare Deckungsgrad" SD dar. Ausgedrückt durch Q_N, den Speicherverlusten Q_{sp} und die Wärme durch Zuschaltung Q_{zu}, ist er definiert als

$$SD \equiv \frac{Q_N + Q_{sp} - Q_{zu}}{Q_N + Q_{sp}}$$

Anlagen zur Brauchwassererwärmung werden aus Wirtschaftlichkeitsgesichtspunkten mit SD = 50% - 60% ausgelegt.

(Folie!)