

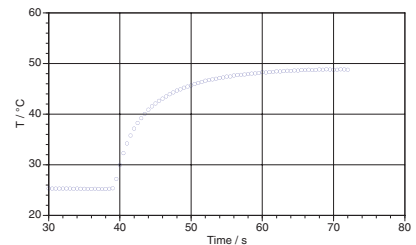
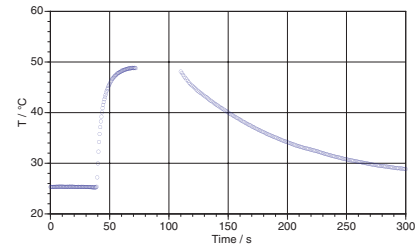
Physics as a Systems Science

End of Semester Exam, February 2005

First Semester Mechanical Engineering, MB1a

1. Ein Thermometer (Temperatursonde) befindet sich in Luft bei Raumtemperatur. Dann wird es in heisses Wasser gesteckt. Nachdem sich die Temperaturablesung nicht mehr ändert, wird es aus dem Wasser genommen, getrocknet und wieder in der Luft bei Raumtemperatur liegen gelassen (siehe Daten in den Diagrammen; Vergrößerungen siehe Beilagen).

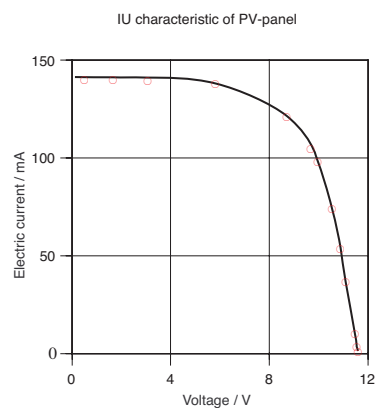
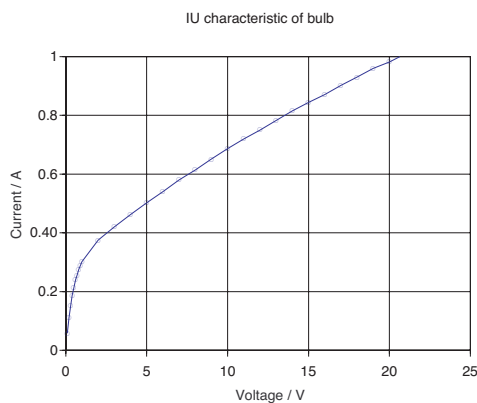
- Sie sollen von Auge im zweiten Diagramm die Zeitkonstante der Reaktion des Thermometers auf eine Temperaturänderung in Wasser bestimmen (ohne weitere Hilfsmittel, ausser vielleicht einem Taschenrechner, und ohne das Diagramm zu transformieren). Wie machen Sie das am besten? Wie gross ist die Zeitkonstante?
- Sie sollen aus den Daten des Temperaturangleichs an die Luft (nach 120 s) ein Diagramm erstellen, in dem die Temperatur *theoretisch* eine Gerade ergeben könnte. Benutzen Sie dieses Diagramm, um die Zeitkonstante des Thermometers für Angleich an die Lufttemperatur zu bestimmen. Wie gross ist diese Zeitkonstante?
- Der Wärmeübergangskoeffizient von Thermometer (Stahl) an Luft ist bekannt. Wie berechnen Sie daraus den Widerstand zwischen Sonde und Luft? Wenn Sie die Analogie zwischen thermischen und elektrischen Vorgängen zu Rate ziehen, wie können Sie mit den bisherigen Resultaten die Wärmekapazität des Thermometers bestimmen? Sie brauchen dazu noch andere Angaben, die wir nicht haben. Zeigen Sie Ihren Weg also allgemein (mit symbolischen Gleichungen) auf.



2. Ein grosses thermisches Kraftwerk (wie das Atomkraftwerk Leibstadt) nimmt die Entropie vom Reaktor bei 600 K auf und gibt sie bei 300 K an den Kühler ab. Die Nutzleistung beträgt 1.0 GW.

- Skizzieren Sie ein Prozessdiagramm (mit Träger- und Energieströmen) für die Anlage (ein System vom Reaktor zum Kühler).
- Wenn die Wärmekraftmaschine ideal operieren könnte, wie gross wäre dann der Entropiestrom durch die Maschine?
- Der thermische Wirkungsgrad des Kraftwerks beträgt nur 30%. Wie gross sind also der Entropiestrom und der Energiestrom vom Reaktor an die Wärmekraftmaschine?

- d. Wie gross ist die Entropieproduktionsrate in der Wärmekraftmaschine? (D.h. zwischen Reaktor und Kühler?)
- e. Wie gross ist die gesamte Entropieproduktionsrate? (D.h. inklusive Reaktor?)
3. Eine Glühlampe mit einer gemessenen Charakteristik wie im linken Diagramm soll an ein oder mehrere PV Panel angeschlossen werden. Die Lampe wird normalerweise bei einer Spannung um 10 V betrieben. Die Charakteristik eines Panels wurde bei einer Einstrahlung von 400 W/m^2 gemessen (rechtes Diagramm). Das Panel besteht aus 21 Zellen mit je einer Fläche von 15 cm^2 .



- a. Wenn die Lampe an eine ideale Spannungsquelle von 10 V angeschlossen wird, was ist dann ihre elektrische Leistung?
- b. Wie gross ist für diesen Fall der Widerstand des Glühdrahtes?
- c. Beim Glühdraht handelt es sich um einen normalen Metalldraht, bei dem der Ladungstransport ohmisch ist. Warum ist die Charakteristik nicht linear?

Nun soll die Lampe an ein oder an mehrere Panel angeschlossen werden. Die Strahlungsdichte ist 400 W/m^2 .

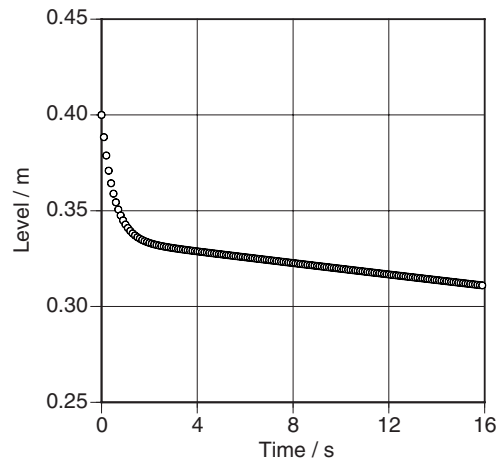
- d. Warum bringt es kaum etwas, wenn Sie die Lampe an ein einziges Panel anschliessen?
- e. Sie können mehr gleiche Panels benützen. Wie schliessen Sie sie zusammen? Parallel oder in Serie (nur eine Wahl, keine Mischung der Schaltungsart!)? Warum?
- f. Wenn man 7 Panels nimmt und die Lampe anschliesst, so wird sich fast exakt eine Spannung von 10 V über der Lampe einstellen. Warum ist das so? Benützen Sie die beiden Charakteristiken (zeichnen Sie wenn nötig ein neues Diagramm) um die Antwort klar zu begründen.
- g. Was ist dann der Wirkungsgrad der des PV-Arrays (Array ist die Kombination der Panels)?

4. Ähnlich wie in der Photographie unten werden in einem physischen Modell ein dicker und ein dünner Tank durch ein kurzes Rohrstück verbunden. Aus dem dünnen Tank führt ein ähnliches aber längeres Rohr horizontal weg.

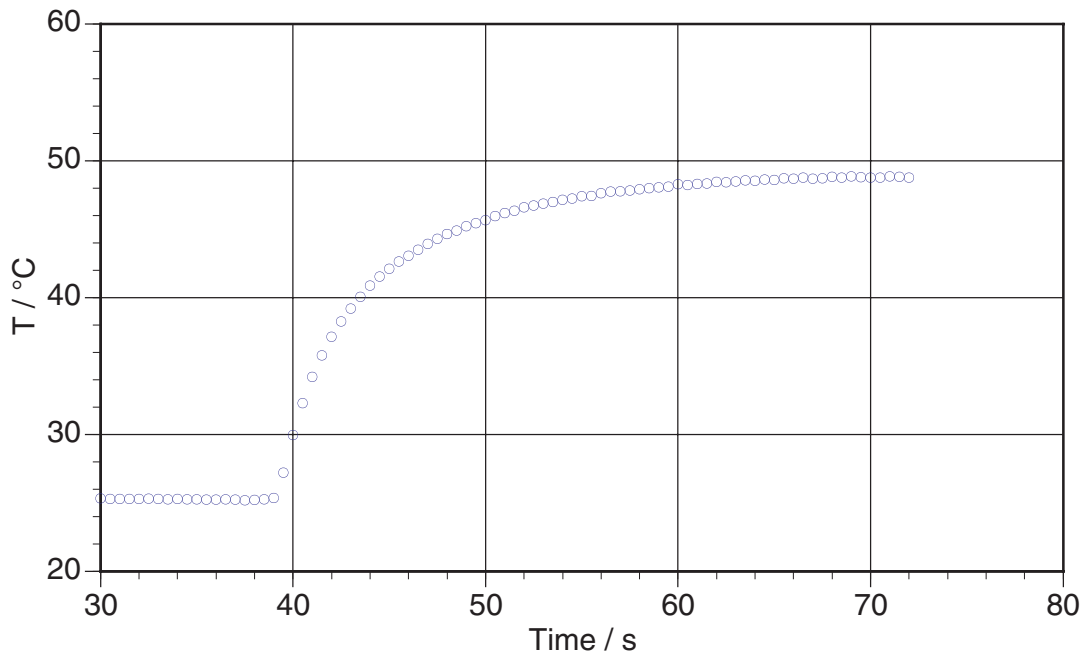
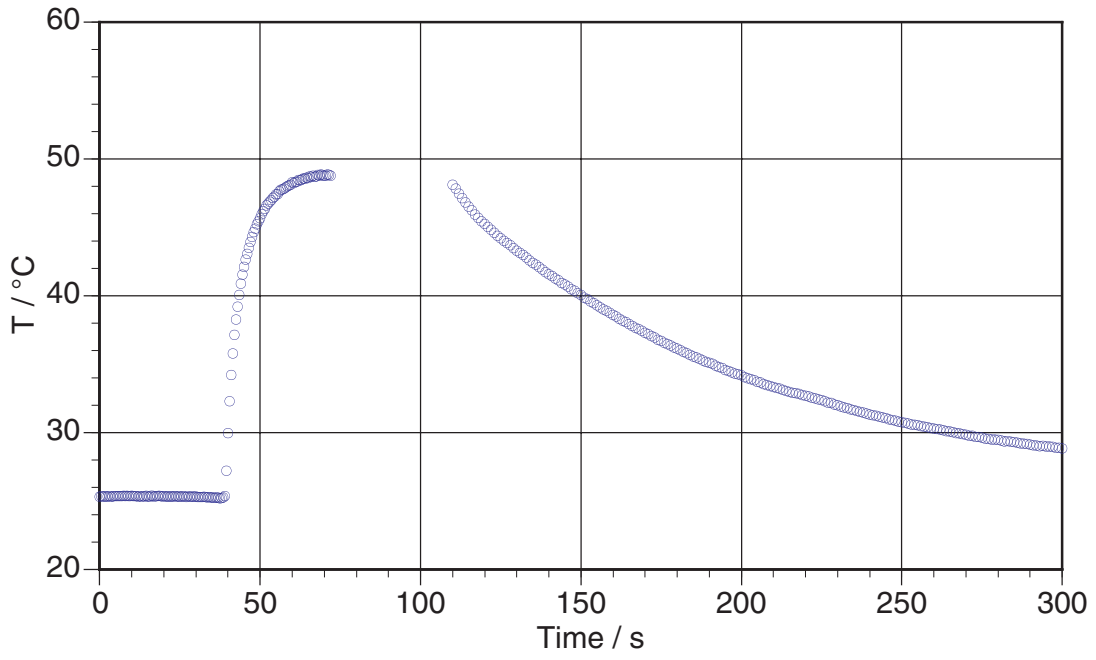
Beide Tanks sind anfangs gleich hoch gefüllt. Dann lässt man das Fluid (Öl mit einer Dichte von 1000 kg/m^3) auslaufen. Die Füllhöhe im dünnen Tank wird gemessen (siehe Diagramm; die Daten stammen aus einer Simulation eines einfachen Modells).

Der Strömungswiderstand des wegführenden längeren Rohres beträgt $1.0 \cdot 10^8 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}^3$. Sie können annehmen, dass die Strömung laminar ist.

- Betrachten Sie die erste kurze Phase des Vorgangs (ungefähr während der ersten Sekunde). Wie gross ist die Änderungsrate der Füllhöhe ganz am Anfang?
- Wie gross ist die Zeitkonstante dieser ersten Phase?
- Schätzen Sie ab, um wieviel sich das Volumen des Öls im grossen Tank in den ersten 16 s geändert hat.
- Bestimmen Sie die hydraulische Kapazität des dünnen Tanks und damit seinen Radius.
- Wie gross ist der Radius des dicken Tanks?
- Inwiefern ist das physische Modell mit den beiden Tanks ein Modell für einen Superkondensator?



Problem 1

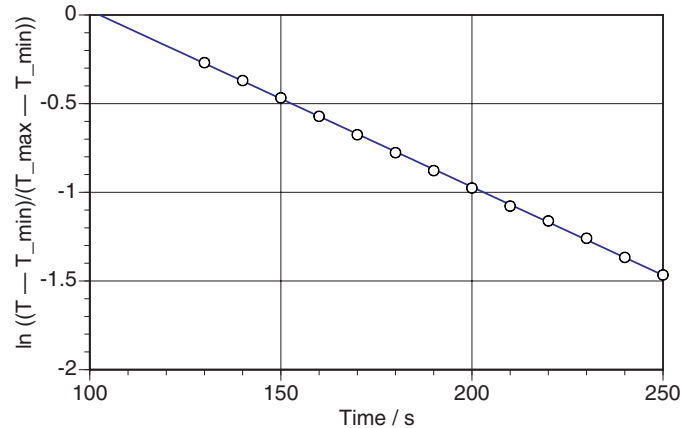


Solutions

1. Thermometer response

- a. The time constant corresponds to the time it takes for the temperature to rise to 64% of the initial temperature difference. This difference is $49^\circ\text{C} - 25.5^\circ\text{C} = 23.5\text{ K}$. 64% of this is 15 K. Therefore, after one time constant, a temperature of $25.5^\circ\text{C} + 15^\circ\text{C} = 40.5^\circ\text{C}$ should be reached. We can simply count the points in the second figure. After about 10 data points, the temperature is a little above 40°C . Therefore, the estimate of the time constant for the thermometer in water is 5.0 s.

b.



We prepare a graph for the decreasing temperature with a logarithmic scale for the temperature. From the slope we obtain the time constant of the thermometer in air: $\tau = 100\text{ s}$.

- c. The energy flow resistance is the sum of the resistances of all transfer layers. We can assume that the transfer inside the thermometer is very efficient compared to the convective transfer in air on the outside of the thermometer. That means that we only have to take into consideration the convective layer:

$$R_w = \frac{1}{AU_{conv}}$$

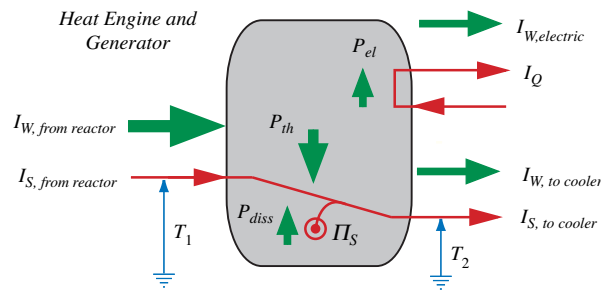
Using the analogy with a simple electric circuit, the time constant of the system is related to the (energy) capacitance and the (energy flow) resistance:

$$\tau = R_w C \Rightarrow C = \frac{\tau}{R_w} = \tau AU_{conv}$$

The quantities needed to calculate the (energy) capacitance of the thermometer are the time constant (determined in b), the convective heat transfer coefficient (given), and the surface area of the thermometer (not known).

2. Thermal power plant

- a. The power plant works as follows. Entropy and energy flow into the engine from the reactor at the high temperature of 600 K. The entropy drops to 300 K and is emitted with less energy to the cooler. The energy released is used for driving the generator if the plant works ideally. In the real case, part of the energy released is dissipated (produces more entropy). The rest drives the generator.



- b. In the ideal case the electric power is equal to the thermal power:

$$P_{th} = P_{el}$$

$$(T_1 - T_2)I_S = P_{el} \Rightarrow I_S = \frac{P_{el}}{T_1 - T_2} = \frac{1.0 \cdot 10^9 \text{ W}}{300 \text{ K}} = 3.33 \cdot 10^6 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

- c.

$$\eta = 0.30 \Rightarrow I_{W,from reactor} = \frac{P_{el}}{\eta} = 3.33 \cdot 10^9 \text{ W}$$

$$I_{W,from reactor} = T_1 I_{S,from reactor} \Rightarrow I_{S,from reactor} = \frac{I_{W,from reactor}}{T_1} = \frac{3.33 \cdot 10^9 \text{ W}}{600 \text{ K}} = 5.56 \cdot 10^6 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

- d.

$$\Pi_S = I_{S,to cooler} - I_{S,from reactor}$$

$$I_{S,to cooler} = \frac{I_{W,to cooler}}{T_2} = \frac{I_{W,from reactor} - P_{el}}{T_2}$$

$$\Pi_S = \frac{I_{W,from reactor} - P_{el}}{T_2} - I_{S,from reactor} = \frac{3.33 \cdot 10^9 - 1.0 \cdot 10^9 \text{ W}}{300 \text{ K}} - 5.56 \cdot 10^6 \frac{\text{W}}{\text{K}} = 2.22 \cdot 10^6 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

- e. The total entropy production rate is obtained directly from the entropy flowing into the cooler (it must be equal to this quantity):

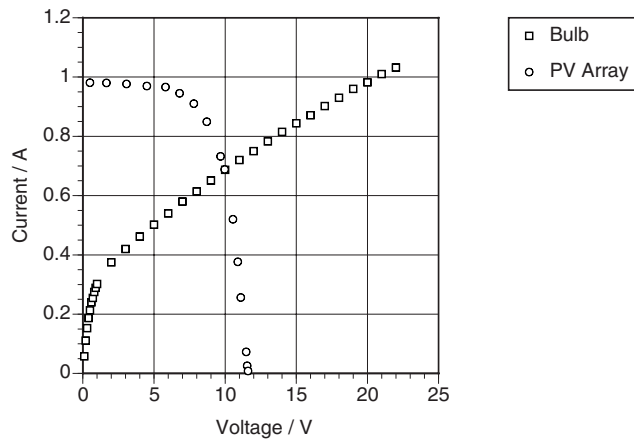
$$\Pi_{S,total} = I_{S,to cooler} = \frac{I_{W,from reactor} - P_{el}}{T_2} = \frac{3.33 \cdot 10^9 - 1.0 \cdot 10^9 \text{ W}}{300 \text{ K}} = 7.78 \cdot 10^6 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

3. Bulb and PV panel

- Having an ideal voltage source for the lamp means that the voltage across the lamp is 10 V. From the characteristic, the electric current will be 0.69 A. The power therefore equals 6.9 W.
- The resistance of the filament must be $R = UI_Q = 10 \text{ V} / 0.69 \text{ A} = 14.5 \Omega$.
- The resistivity of the material is temperature dependent. The resistivity increases with temperature. This makes the resistance larger with higher temperature. Therefore, for higher voltage and larger power, the resistance is larger, the current increases more slowly.
- The operating conditions of the system are found by superimposing the characteristics of bulb and PV panel. Where the characteristic curves intersect, we find the values pertaining to the operating conditions.

With a single panel at an irradiance of 400 W/m^2 , the maximum possible current is less than 0.15 A . The voltage associated with this current is about 0.3 V .

- e. We want to have a higher current; the voltage possible with a single panel is high enough (maximum: 11.5 V). Therefore, we should connect several panels in parallel.
- f. With seven panels in parallel, the characteristic of the array is a curve having the shape of a single panel, but with a maximum current of close to 1 A (the maximum voltage of 11.5 V is still the same). The combined characteristic diagrams show the solution of the problem.



- g. The power of the lamp is as calculated in problem a, namely 6.9 W .

The energy current associated with solar radiation is found from the irradiance and the surface area of all the cells:

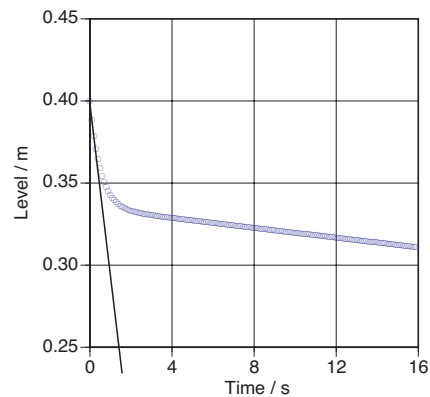
$$I_{W,rad} = AG = 7.21 \cdot 15 \cdot 10^{-4} \cdot 400 \text{ W} = 88.2 \text{ W}$$

Therefore, the efficiency of the array is given by

$$\eta = \frac{P_{bulb}}{I_{W,rad}} = \frac{6.9}{88.2} = 0.078$$

4. Two tanks

- a. Rate of change of the level is obtained graphically:
 $dh/dt = 0.15 \text{ m} / 1.375 \text{ s} = 0.11 \text{ m/s}$.



- b. The time constant is estimated from how long it would take for the small tank to be drained if the rate of change of level continued at the initial rate:

$$\tau = \frac{h_{init}}{dh/dt} = \frac{0.4}{0.11} \text{ s} = 3.65 \text{ s}$$

- c. There are at least two possibilities to find the change of volume in the large tank. One would be to first find the change of level and the size of the tank. The other one is to use the law of balance of volume and find the outflow from the tank. The second path is more direct. We estimate the amount of oil drained from the large tank by estimating the flow out of the small tank during 16 s. (There is only very little oil coming out of the narrow tank during this time!)

$$\bar{I}_V = \frac{\Delta \bar{p}}{R_V} = \frac{\rho g \bar{h}}{R_V} \approx \frac{1000 \cdot 10 \cdot 0.32}{1.0 \cdot 10^8} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 3.2 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\Delta V = V_e = \bar{I}_V \Delta t = 3.3 \cdot 10^{-5} \cdot 16 \text{ m}^3 = 5.1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

- d. Capacitance found from time constant:

$$\tau = R_V C_V \Rightarrow C_V = \frac{\tau}{R_V}$$

$$C_V = \frac{A}{\rho g} = \frac{\pi r^2}{\rho g} \Rightarrow r = \sqrt{\frac{\rho g C_V}{\pi}} = \sqrt{\frac{1000 \cdot 10 \cdot 3.65}{1.0 \cdot 10^8 \pi}} \text{ m} = 0.011 \text{ m}$$

- e. Estimate the time constant of the large tank from the second (slow) phase of draining. $dh/dt = 0.021 \text{ m} / 12 \text{ s} = 1.78 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$, therefore

$$\tau = \frac{h_{init}}{dh/dt} = \frac{0.4}{1.78 \cdot 10^{-3}} \text{ s} = 224 \text{ s}$$

Therefore, the hydraulic capacitance of the large tank is $224/3.65 = 61$ times larger than that of the small tank. This means that the radius of the tank must be $\sqrt{61} = 7.8$ times larger than that of the small tank. $r = 7.8 \text{ cm}$.

- f. A supercapacitor can be modeled as a series of normal capacitors in parallel. The outermost capacitor has a small capacitance compared to all the other ones. If we combine the large capacitors into a single large one, we have a model analogous to the hydraulic one presented here. The fact that the voltage of a supercapacitor drops similarly to what is seen in the graph of the water level in the small tank is proof of this assumption.