




Energie 1: Wärme & Wärmeinhalt

Energieeintrag in Gewässer?

- a. **Wärme**
- b. **Mechanische Energie** (Wind & Wellen)

Wichtig:
Austausch an der **Grenzfläche** zwischen Luft und Wasser

Wieviel Energie wird übertragen ?

- $E_{\text{thermisch}} = a \times \text{Solarkonstante} \times \text{Fläche See} \times \text{Zeit} \sim$

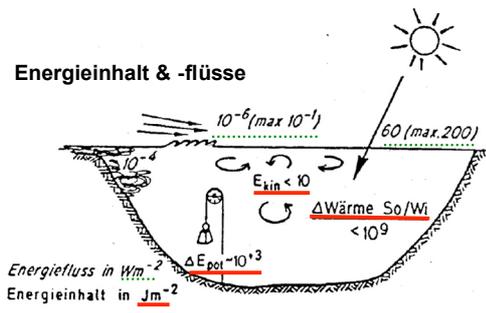
EPAS / Hydrosphäre

WS 2004 / 05
Imboden / Herfort / Kipfer

Energieinhalt im See



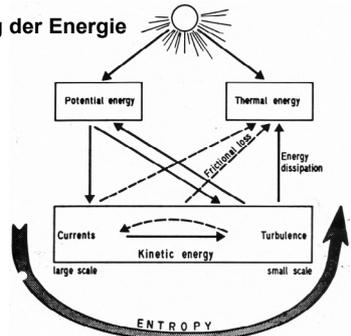
Energieinhalt & -flüsse



Energiefluss in Wm^{-2}
Energieinhalt in Jm^{-2}

Strahlung / Wärme \gg Kinetische Bewegung
1. Hauptsatz der Thermodynamik

Der Weg der Energie



Unterschied: **Wärme** \leftrightarrow **Bewegung**?
• **ungerichtet** \leftrightarrow **gerichtet**

- 2. Hauptsatz der Thermodynamik

Zeitskala von Bewegung: $h - T_g$
 \rightarrow Wärme

EPAS, Hydrosphäre

WS 2004 / 05
Imboden / Herfort / Kipfer



(Wärme) Energiebilanz (im See)



Totaler Energiefluss = QUELLEN - SENKEN

$$H_{\text{tot}} = \sum H_{\text{in}} - \sum H_{\text{out}}$$

- QUELLEN: H_{in} SENKEN: H_{out}

$$H_{\text{tot}} = H_S + H_A - (H_W + H_V + H_K)$$

+ weitere Terme

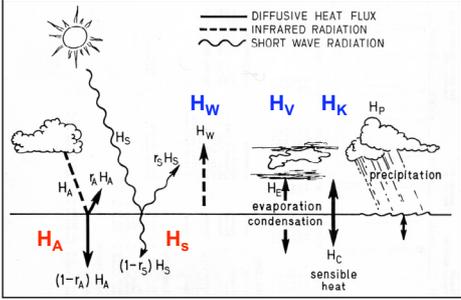
H_S : Absorption von kurzwelliger Strahlung
 H_A : Absorption von langwelliger Strahlung
 H_W : Thermische (Infrarot) Abstrahlung
 H_V : Verdunstung
 H_K : Sensible (fühlbare) Wärme

Weitere Terme: Niederschläge, Schneeschmelze, Zu- und Abflüsse
 → irrelevant



EPAS, Hydrosphäre

WS 2004 / 05
Imboden / Herfort / Kipler



— DIFFUSIVE HEAT FLUX
 - - - INFRARED RADIATION
 ~~~~~ SHORT WAVE RADIATION

## Grenzflächenprozesse

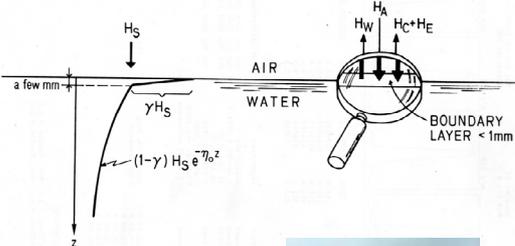


---

**Wo findet Austausch statt?**

Austauschprozesse finden **alle an der Oberfläche** innerhalb weniger **Millimeter** statt.

> Wind: Änderung der Grenzschicht  
 > See: **Erst durch Windmischung relevant für (stehendes) Gewässer**



a few mm  
 AIR  
 WATER  
 BOUNDARY LAYER < 1mm  
 'windig'



'ruhig': Lake Mashu



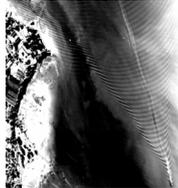
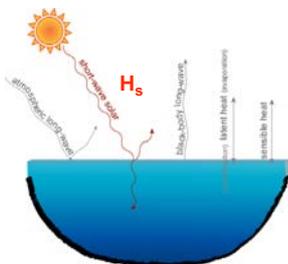


EPAS, Hydrosphäre

WS 2004 / 05  
Imboden / Herfort / Kipler



Quelle 'Solarstrahlung':  $H_s$



Reflexion: Oberflächenwellen

$H_s$ : ABSORPTION KURZWELLIGER STRALUNG

→ Direkte Sonneneinstrahlung (messbar)

→ 'Solarkonstante'

- + 60 – 200  $Wm^{-2}$

$$H_s = H_s^0 \cdot (1 - r_s) \cdot (1 - 0.65B) \quad [Wm^{-2}]$$

mit:

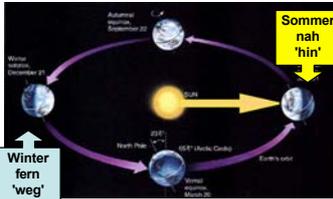
$H_s^0$ : Solare Einstrahlung bei klarem Himmel [ $Wm^{-2}$ ]

$r_s$ : Reflexion der kurzwelligen Strahlung  
Juli: 4%, Januar: 14%

B: rel. Anteil von Wolken bedeckten Himmels



Jahreszeiten



EPAS, Hydrosphäre

WS 2004 / 05  
Imboden / Herfort / Kipler



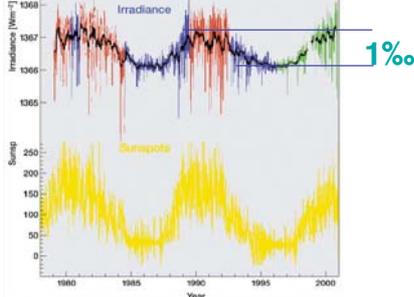
$H_s$  & Sonnenaktivität...



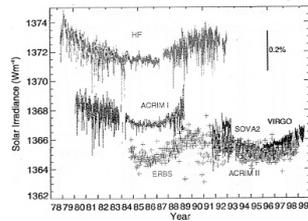
Solarkonstante... **nicht wirklich konstant**

Einfluss der Sonne auf Erdklima:  $\pm 1.5 W!$

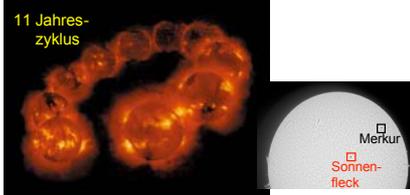
Fröhlich and Lean 1998



Effektive Solarkonstante & Messungen



Sonnenaktivität = Sonnenflecken



EPAS, Hydrosphäre

WS 2004 / 05  
Imboden / Herfort / Kipler



## H<sub>s</sub>, Licht und Eindringtiefe...

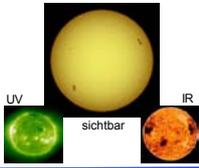


Extinktion der Strahlung im Wasser:  
In jedem Tiefenintervall verschwindet der gleiche Prozentsatz:

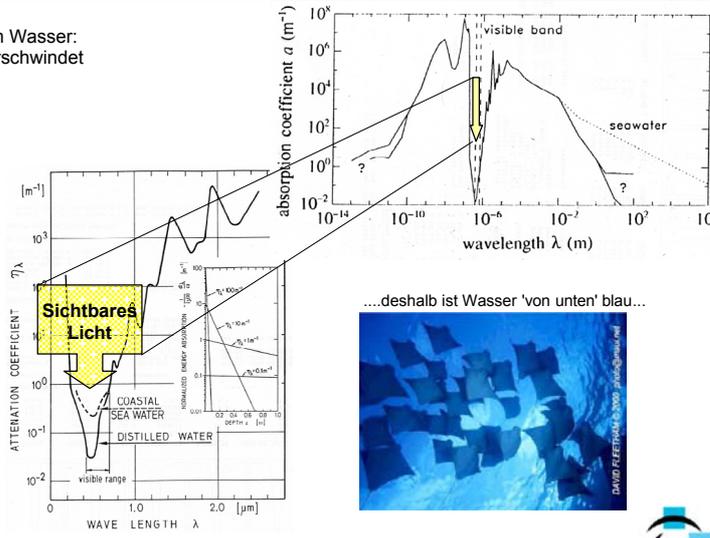
$$\frac{dH_s}{dz} = -\eta \cdot H_s$$

Lösung für Intensität:  
 $H_s = H_s(z=0) \cdot e^{-\eta \cdot z}$

Fragen:  
 • Warum sehen 'wir' im sichtbaren Bereich?  
 • Woher weiss die Sonne...



UV    sichtbar    IR



absorption coefficient  $\alpha$  (m<sup>-1</sup>)

wavelength  $\lambda$  (m)

visible band

seawater

visible range

COASTAL SEA WATER

DISTILLED WATER

Sichtbares Licht

...deshalb ist Wasser 'von unten' blau...

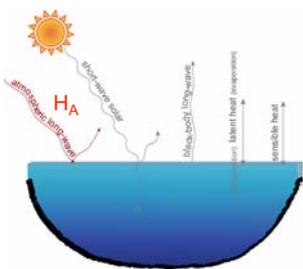


EPAS, Hydrosphäre
WS 2004 / 05  
Imboden / Herfort / Kipler



## H<sub>A</sub>: langwellige Einstrahlung





atmospheric longwave radiation  $H_A$

shortwave solar radiation

longwave longwave radiation

latent heat evaporation

net longwave radiation

net shortwave radiation

### H<sub>A</sub>: ABSORPTION VON LANGWELLIGER STRAHLUNG

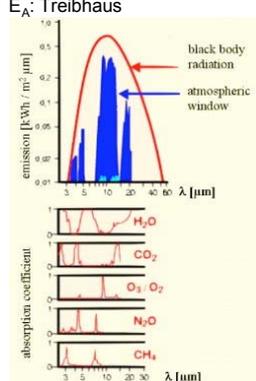
→ Infrarotstrahlung der Atmosphäre  
+ 250 – 350 Wm<sup>-2</sup> >> H<sub>s</sub>

Physikalischer Hintergrund?  
 > Schwarzkörperstrahlung / Stefan-Boltzmann Gesetz:  $H \propto T^4$

$$H_A = \bar{T}_A^4 \cdot \sigma \cdot (1-r_A) \cdot E_A \quad [\text{Wm}^{-2}]$$

mit:  
 T<sub>A</sub>: mit. absolute Temperatur der Atmosphäre [K]  
 σ: Boltzmann Konstante [5.67·10<sup>-8</sup> Wm<sup>-2</sup>K<sup>-4</sup>]  
 r<sub>A</sub>: Reflexion der langwelligen Strahlung [-]  
 E<sub>A</sub>: Emissionskoeffizienten der Atmosphäre [-]

E<sub>A</sub>: Treibhaus



emission [kWh / m<sup>2</sup> · μm]

absorption coefficient

black body radiation

atmospheric window

H<sub>2</sub>O

CO<sub>2</sub>

O<sub>3</sub>, O<sub>2</sub>

N<sub>2</sub>O

CH<sub>4</sub>

λ [μm]



EPAS, Hydrosphäre
WS 2004 / 05  
Imboden / Herfort / Kipler

## H<sub>A</sub>: langwellige Einstrahlung, 2



**E<sub>A</sub> = E<sub>A</sub>( → Treibhauseffekt: H<sub>2</sub>O ) ?**

Empirische Zusammenhänge: Messungen !!

- nach Brutsaert:
 
$$E_A = 1.24 \cdot \left( \frac{e_A}{T_A} \right)^{1/7}$$
 mit: e<sub>A</sub>: Wasserdampfdruck in der Atmosphäre [mbar]
- Zusätzliche Korrektur für Wolken:
 

Wolken → Infrarotstrahlung

$$H_A = (1-r_A) \cdot \sigma \cdot \bar{T}_A^4 \cdot E_A$$

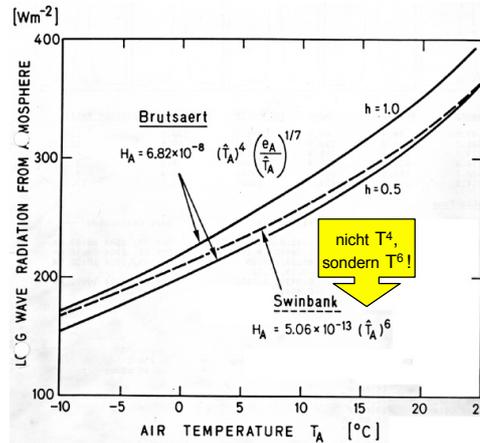
$$= (1-r_A) \cdot \sigma \cdot \bar{T}_A^4 \cdot 1.24 \cdot \left( \frac{e_A}{T_A} \right)^{1/7} \cdot (1+0.17B^2)$$

$$= 6.8 \cdot 10^{-8} \cdot \bar{T}_A^4 \cdot \left( \frac{e_A}{T_A} \right)^{1/7} \cdot (1+0.17B^2)$$



EPAS, Hydrosphäre

WS 2004 / 05  
Imboden / Herfort / Kipler

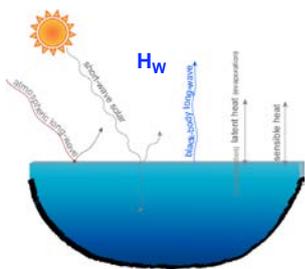


## H<sub>W</sub>: langwellige Abstrahlung



EPAS, Hydrosphäre

WS 2004 / 05  
Imboden / Herfort / Kipler



### H<sub>W</sub>: LANGWELIGE ABSTRAHLUNG DER WASSEROBERFLÄCHE

→ Wärmestrahlung (Stefan-Boltzmann)

$$H_W = E_A \cdot \sigma \cdot \bar{T}_W^4 = (1-r_W) \cdot \sigma \cdot \bar{T}_W^4 \text{ [Wm}^{-2}\text{]}$$

- mit:
- E<sub>W</sub>: Emissionskoeffizient von Wasser
  - r<sub>W</sub>: Reflexion der langwelligen Strahlung  
E<sub>W</sub> = 1-r<sub>W</sub> = 0.97
  - σ: Stefan-Boltzmannkonstante [5.67·10<sup>-8</sup> Wm<sup>2</sup>K<sup>-4</sup>]
  - T<sub>W</sub>: absolute Temperatur des Wassers [K]

Beispiel:  
See bei 4 °C / 20 °C

Temperaturmessung durch Satelliten !!!  
Warum eigentlich?

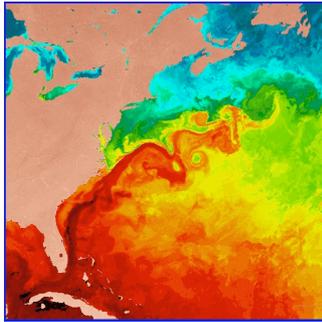


$H_W$ : langwellige Abstrahlung, 2

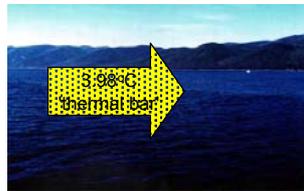
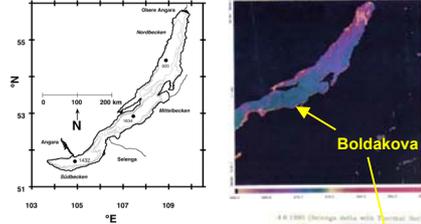


Temperaturmessungen durch Satelliten

Golfstrom vor den USA



Baikalsee: Mai / Juni 93

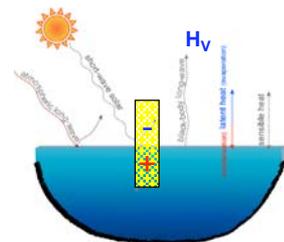


EPAS, Hydrosphäre

WS 2004 / 05  
Imboden / Herfort / Kipler



$H_V$ : Verdunstung



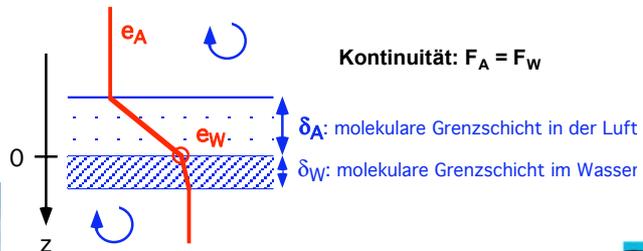
$H_V$ : WÄRMEVERLUST DES WASSERS DURCH VERDUNSTUNG

→ + bei Taubildung

Treibende Kraft ?:



Verdunstung & graue Planet



Kontinuität:  $F_A = F_W$

WS 2004 / 05  
Imboden / Herfort / Kipler



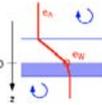
## H<sub>v</sub>: Verdunstung, 2



Nach dem 1. Fick'schen Gesetz:

$$F_A = -D_{H_2O}^A \cdot \frac{de}{dz}$$

$$\sim -D_{H_2O}^A \cdot \frac{e_A - e_W}{\delta_A}$$



mit:  
 $D_{H_2O}^A$ : Diffusionskoeffizient H<sub>2</sub>O in Luft [m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>]  
 $e_A$ : Partialdruck von H<sub>2</sub>O [mbar]  
 $e_W$ : Sättigungsdampfdruck [mbar]  
 $\delta_A$ : Dicke der atmosphärischen Grenzschicht [m]

$$H_v = \text{const} \cdot F_A = f(u, \dots) \cdot (e_W - e_A) \text{ [Wm}^{-2}\text{]}$$

Bemerkungen:

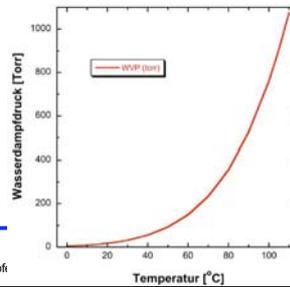
• Der Sättigungsdampfdruck  $e_w$  steigt stark mit zunehmender Temperatur an.

• Wann wird  $H_v = 0$  ?

rel. LF = 100%  
 $e_A \neq e_W$

•  $f = f(\text{Wind})$  ?

$f$  berücksichtigt WIND und andere meteorologische Faktoren auf die Verdunstung



## H<sub>v</sub>: Verdunstung, 3



• Verschiedene empirische Ansätze um den Einfluss des Windes auf  $H_v$  (und  $H_k$ ) zu parametrisieren.

z. B. nach Kuhn

$$f(u) = 5.44 + 2.19 \cdot u_{10} + 0.24 \cdot (T_W - T_A)$$

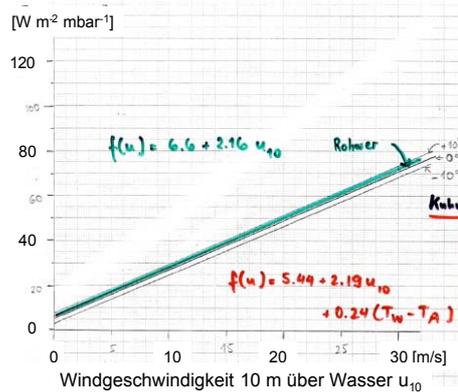
[Wm<sup>-2</sup>mbar<sup>-1</sup>]

• Zusammenhang zwischen  $H_v$  und der Verdunstung,  $Q_v$ :

$$H_v = \frac{m_{H_2O} \cdot L_D}{A \cdot t}$$

$$= \frac{\rho_W \cdot h \cdot A \cdot L_D}{A \cdot t}, \quad Q_v = \frac{h}{t}$$

$$Q_v = \frac{H_v}{\rho_W \cdot L_D} \sim 36 \cdot 10^{-3} \cdot H_v \quad [\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}]$$

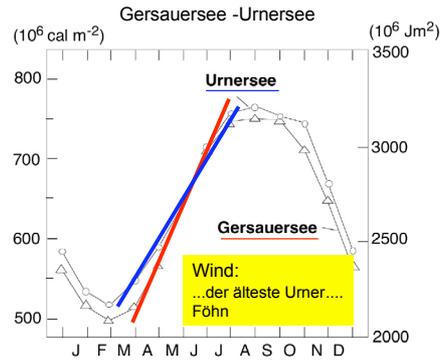
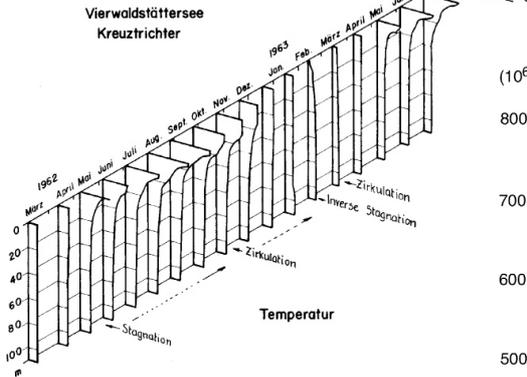




Zusammenfassung: Wärme, 2



Mischungstiefe im VWS  
(nach Ambühl)



EPAS, Hydrosphäre

WS 2004 / 05  
Imboden / Herfort / Kipler



Wärmeaustausch in (Fließgewässern)



Rückblick in die Geschichte  
letztes Jahrtausends):  
'the swinging sixties'....

Diskussion in der Schweiz:  
Wasserkraftwerke ↔ Kernkraftwerke

Aus jener Zeit stammen: Mühleberg & Betznau

Beispiel: KKW Mühleberg

250 MW Leistung; Wirkungsgrad: 30%

Typischer Aareabfluss: ~ 100 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>

$$\Delta T = \frac{E_{th}}{Q \cdot \rho \cdot c_p} = 1.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

→ relativ kleine Erwärmung

Jedoch:

Relevante Frage: 'thermisches Gedächtnis'

→ Wie lange bleibt die Temperaturänderung im System erhalten ?

Andere mögliche Szenarien:

→ KKW's an (Stau) Seen

→ Biologische Auswirkungen

EAWAG fand 2 wesentliche Kriterien

1. T < 25 °C

2. ΔT ≤ 3 °C

sofern Gewässer sauber, biologischer Sauerstoffbedarf steigt mit höherer Temperatur.

Folgerung:

Selbst an grossen Flüssen können

nur 1 (- 2) KKW's gekühlt werden:

→ KÜHLTÜRME !!!

EPAS, Hydrosphäre

WS 2004 / 05  
Imboden / Herfort / Kipler



## Wärmeaustausch in (Fließgewässern), 2

**Zurück zu den 'Techno Beats' des 3. Jahrtausend**

**Wie ändert sich der TOTALE Wärmefluss,  $H_{tot}$ , bei einer Temperaturänderung von 1 K?**

Bei konstanten meteorologischen Bedingungen gilt:  
**Quellen:**  $H_{in} = H_s + H_A \sim$  **konstant**  
**Senken:**  $H_{aus} = H_w + H_v + H_K = f(T)$   
 $\rightarrow H_{aus} = H_{out}(T_w)$

$\rightarrow$  Konzept der GLEICHGEWICHTS - Temperatur  $T^*$

mit:  $T^*$ : Gleichgewichtstemperatur [K]

$H_{tot} = 0 = H_{in} - H_{out}(T^*)$

**A:**  $A = \left. \frac{dH_{out}}{dT} \right|_{T^*}$

mit: **A: Ausgleichskoeffizient** [ $Wm^{-2}K^{-1}$ ]

Gleichgewichtstemperatur

$\rightarrow$  Störungsansatz: (lineare Näherung für kl. Auslenkungen)

$$H_{out}(T_w) = H_{out}(T^* + \delta T)$$

$$= H_{out}(T^*) + \left. \frac{dH_{out}}{dT_w} \right|_{T^*} \delta T = H_{out}(T^*) + A \cdot \delta T$$

$H_{out}(T_w) = H_{out}(T^*) + A \cdot \delta T$   
 $H_{in} = H_{out}(T^*) = \text{const.}$

Für den totalen Wärmefluss ergibt sich:

$$H_{tot} = H_{tot}(T_w)$$

$$= H_{in}(T_w) - H_{out}(T_w) = H_{in}(T^*) - H_{out}(T_w)$$

$$= -A \cdot (\delta T)$$

**$H_{tot}(T_w) = -A \cdot (T_w - T^*)$  [ $Wm^{-2}$ ]**

EPAS, Hydrosphäre

WS 2004 / 05  
Imboden / Herfort / Kipler

## Wärmeaustausch in (Fließgewässern), 3

**Zurück zur Abwärme von thermischen Kraftwerken.**

**$H_{tot}(T_w) = -A \cdot (T_w - T^*)$  [ $Wm^{-2}$ ]**

$\rightarrow$  KKW's wollen: **grosses A**

$\rightarrow A (T_2 > T_1) > T (T_1)$   
**Winter ist die kritische Zeit...**

$A_{Winter} \sim 17 Wm^{-2}K^{-1}$   
 $\bar{A}_{Mittel} \sim 25 Wm^{-2}K^{-1}$   
 $A_{Sommer} \sim 34 Wm^{-2}K^{-1}$

Zum Vergleich:  $H_{tot}^{See} \sim 100 Wm^{-2}$

$\rightarrow$  **durchaus vergleichbar...**

Gleichgewichtstemperatur im Rhein

Tem. [°C]

Gleichgewichtstemperatur

Lufttemperatur

Wassertemperatur

J F M A M J J A S O N D

Warum ist 'T\*' gut' im Fluss? **durchmischt**

EPAS, Hydrosphäre

WS 2004 / 05  
Imboden / Herfort / Kipler

## Aufgabe: Zustandsgleichung von Wasser



Abbildung 1.2 im Skript zeigt die Temperatur maximaler Dichte und die Schmelztemperatur von Wasser als Funktion der Salinität:

- Die Ozeane besitzen im Mittelwert eine Salinität von  $35 \text{ g kg}^{-1}$ . Wie können Sie damit erklären, daß die Ozeane immer dichter werden, wenn die Temperatur kleiner wird?
- Eine Wasserprobe enthält  $20 \text{ g kg}^{-1}$  gelöste Salze. Bei welcher Temperatur erreicht dieses Wasser i) seine maximale Dichte ii) seinen Gefrierpunkt?
- Eis schmilzt und mischt sich mit Meerwasser der Salinität  $35 \text{ g kg}^{-1}$ . Wird dieser Effekt den Gefrierpunkt des Meerwassers erhöhen oder erniedrigen? Wird das später bei Erniedrigung der Lufttemperatur die Bildung des Eises vereinfachen?

EPAS, Hydrosphäre

WS 2004 / 05  
Imboden / Herfort / Kipler



## Aufgabe: Es war einmal ein Hurrikan...



Tropische Wirbelstürme (Hurrikane) beziehen ihre gewaltigen Energien aus der Kondensation von Wasserdampf in der Atmosphäre. Um die Stürme am Leben zu halten, muss somit ausserhalb des Zentrums des Sturmes ständig Wasser verdampfen. So erhält der Sturm ständig neue Nahrung. In einem Zeitungsartikel über Hurrikane wurde kürzlich behauptet, während der Lebensdauer eines solchen Sturmes würden insgesamt **mehrere Hundert Milliarden Kilowattstunden** an Energie umgesetzt.

- Als kritische ZeitungsleserIn möchten Sie überprüfen, ob diese Zahl von der Grössenordnung her stimmen könnte. Sie nehmen daher eine totale Energiemenge von **600 Milliarden kWh** und eine totale Lebensdauer des Sturmes von 10 Tagen an. Wie gross wäre damit die durchschnittliche umgesetzte Leistung?
- Wieviel Wasser müsste pro Tag kondensieren, um diese Energie freizusetzen?
- Wie vergleicht sich das mit Schweizerischen Kernkraftwerken?

EPAS, Hydrosphäre

WS 2004 / 05  
Imboden / Herfort / Kipler



## Lösung: Es war einmal ein Hurrikan...



Tropische Wirbelstürme (Hurrikane) beziehen ihre gewaltigen Energien aus der Kondensation von Wasserdampf in der Atmosphäre. Um die Stürme am Leben zu halten, muss somit ausserhalb des Zentrums des Sturmes ständig Wasser verdampfen. So erhält der Sturm die Energie, die er braucht, um weiter zu existieren. Die Energie wird durch die Kondensation von Wasserdampf in Energie umgesetzt.

**Zur Lösung:**

- (a) (a) Leistung Hurrikan:  $p = \frac{E}{t} = \frac{600 \cdot 10^{12} \cdot 3600}{10 \cdot 24 \cdot 3600} = 2.5 \cdot 10^{12} \text{ W}$  von der Grössenordnung her stimmen  
 könnte die nehmen dann eine totale Energiemenge von **900 Milliarden kWh** und eine totale Lebensdauer  
 des Sturmes von 10 Tagen an. Wie gross wäre damit die durchschnittliche umgesetzte Leistung?

- (b) (b)  $p = \frac{m_{\text{KW}} \cdot L_{\text{W}}}{t} \rightarrow \frac{m_{\text{KW}}}{t} = \frac{p}{L_{\text{W}}} = \frac{2.5 \cdot 10^{12}}{2.5 \cdot 10^6} = 10^6 \text{ kg/s} = 1000 \text{ m}^3/\text{s} \sim 0.1 \text{ km}^3/\text{Tag}$   
 Zum Vergleich: Aare  $\sim 100 \text{ m}^3/\text{s}$ , Rhein  $\sim 1000 \text{ m}^3/\text{s}$

- (c) (c) 1 CH-KKW:  $\sim 1 \text{ GW}$  Kernkraftwerken?  
**2001: 440 KKW mit  $3.5 \cdot 10^{11} \text{ W}$**   
 **$\rightarrow 1 \text{ Hurrikan} \sim 3'000 \text{ KKW}$**