

# Physische Geographie - Klimatologie

Christoph Gerbig, Sönke Zaehle  
 Max-Planck-Institut für Biogeochemie  
 Hans-Knöll Str. 10, PF 100164, 07701 Jena  
 Tel.: (03641) 57-6373 (Gerbig) -6230 (Zaehle)

Vorlesungswebsite:

[https://www.bgc-jena.mpg.de/4750210/bsi\\_lectures\\_climatology](https://www.bgc-jena.mpg.de/4750210/bsi_lectures_climatology)

Email:  
 christoph.gerbig@bgc-jena.mpg.de  
 soenke.zaehle@bgc-jena.mpg.de

Datum	Thema	Dozent	Folien
<b>2022</b>			
17.10.2022	Einleitung, Klimageschichte	Gerbig	x
⇒ 24.10.2022	Energiebilanz	Gerbig	
07.11.2022	Prozesse 1	Gerbig	
14.11.2022	Klimazonen	Zaehle	
21.11.2022	Klimavariabilität	Zaehle	
28.11.2022	Prozesse 2	Gerbig	
05.12.2022	Messsysteme 1	Gerbig	
12.12.2022	Messsysteme 2	Gerbig	
19.12.2022	Semesterpause		
26.12.2022	Semesterpause		
<b>2023</b>			
02.01.2023	Modellierung	Zaehle	
09.01.2023	Klimawandel	Zaehle	
16.01.2023	Klima-BGC I	Zaehle	
23.01.2023	Klima-BGC II	Zaehle	
30.01.2023	Klima und Gesellschaft	Zaehle	
06.02.2023	Klausur		

## Organisatorisches bzgl. Modul BBGW5.1.5

Seminar:

- Eintragen für Themen unter Moodle - Allgemeines - Auswahlformular Seminarthema
- Aktiv zwischen 27.10 12 Uhr und 2.11 23:59

Benotung Seminar:

	gut	fehlerhaft	schlecht
Inhaltlich			
Präsentation			
Moderation			

## Fragen: elementare "Klimakennzahlen"

Temperatur:

- Jena: Maximale/minimale Temperatur? 39.8 (20.7.2022)  
-30.6 (22.1.1850)
- Absolutes Maximum/Minimum, wo? wann? 57.3C (Libyen, 1922)  
-89.2C (Vostok, 1983)
- Maximaler Jahresgang (wo?) 56C (Ostsibirien)
- Durchschnittstemperatur an der Erdoberfläche (Land/Ozean) ~15°C (1987-2016)

Niederschlag:

- Jena: Jahresniederschlag? 587mm = 587 l/m<sup>2</sup>
- Maximaler/minimaler Niederschlag, wo? 26.47m (Cherrapunji, Indien)  
0 mm (Atacama Wüste, Chile)
- Globaler mittlerer Jahresniederschlag? 953 ± 11 mm

Sonnenscheindauer in Jena

~4h/Tag  
 = 30% von astronomisch möglichen 13.3 h/Tag

# Energiebilanz

# Größenordnung exemplarischer Energieflüsse im globalen Klimasystem

Solar konstante	1370 Wm <sup>-2</sup>
Solare Einstrahlung (globales Jahresmittel)	~ 342 Wm <sup>-2</sup>
Wind und Meeresströmungen	~ 4 Wm <sup>-2</sup>
Geothermischer Wärme flu ß aus dem Erdinneren	~ 0.07 Wm <sup>-2</sup>
Gezeiten	~ 0.035 Wm <sup>-2</sup>
Photosynthese	~ 0.1 Wm <sup>-2</sup>
Ein Mensch	120 W
Primärenergieverbrauch in Deutschland 2020	~ 1.04 Wm <sup>-2</sup>

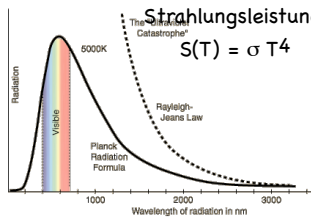
# Strahlungsspektren von Sonne und Erde (vereinfacht)

Planck'sches Strahlungsgesetz

$$B_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/(\lambda k_B T)} - 1}$$

Stefan-Boltzmann-Gesetz

Strahlungsleistung:  
 $S(T) = \sigma T^4$



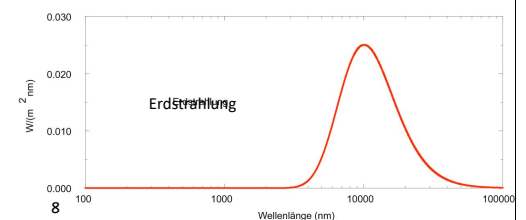
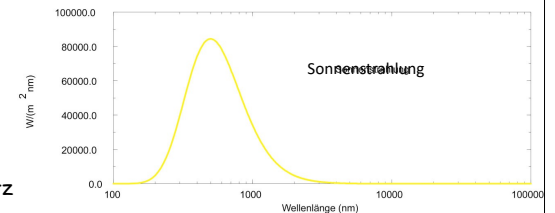
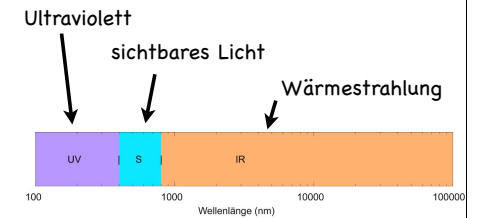
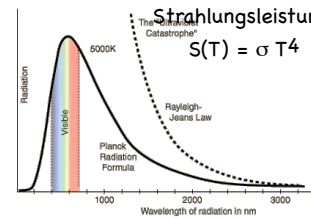
# Strahlungsspektren von Sonne und Erde (vereinfacht)

Planck'sches Strahlungsgesetz

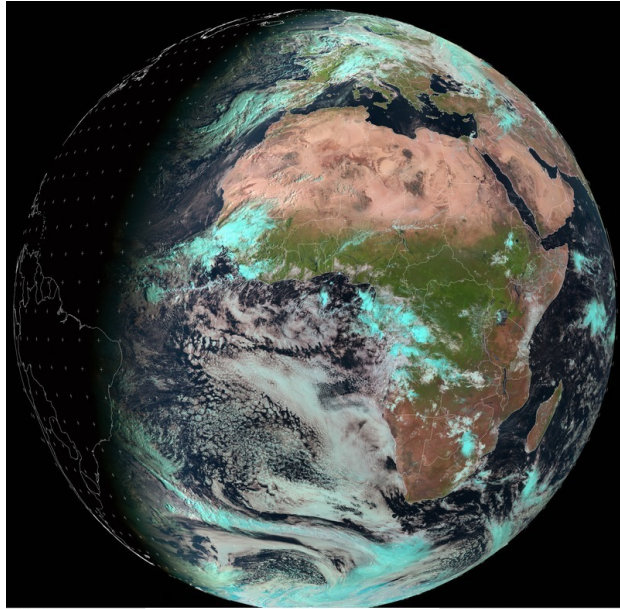
$$B_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/(\lambda k_B T)} - 1}$$

Stefan-Boltzmann-Gesetz

Strahlungsleistung:  
 $S(T) = \sigma T^4$



# Die Erde im sichtbaren Licht



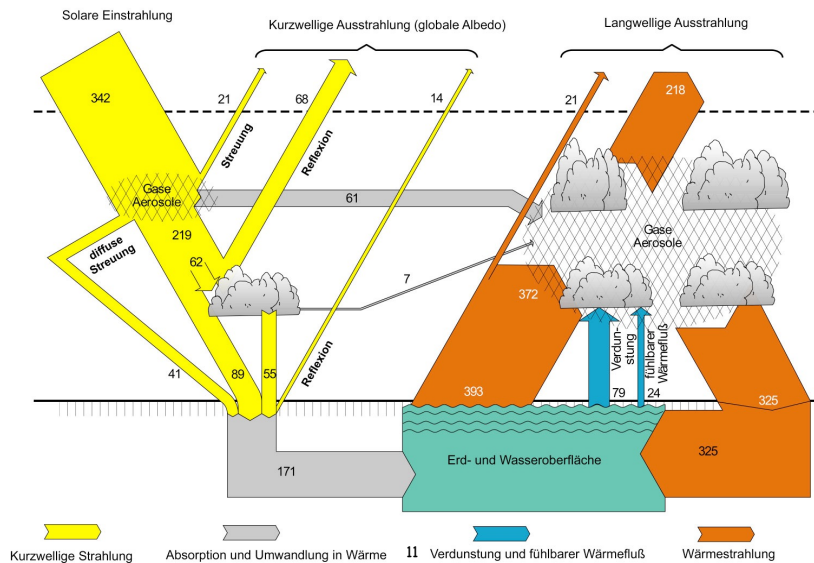
Meteosat  
(24.10.2022, 8 UTC)  
EUMETSAT

© EUMETSAT Meteosat Orig Natural Colour, 2022-10-24 08:00:00 UTC

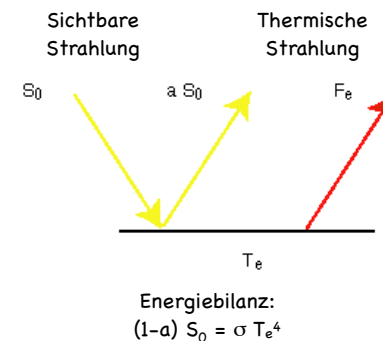
# Albedo ausgewählter Oberflächen

Untergrund	Albedo	Untergrund	Albedo
Sand trocken	30-45%	Wasseroberfläche	4-95%
Sand nass	20-30%	Meereis	25-60%
Schwarzerde unbewachsen	5-15%	Schnee neu	70-95%
Braunerde unbewachsen	7-25%	Schnee alt	40-70%
Wüste	25-30%	Haufenwolken	70-90%
Tundra	15-20%	Schichtwolken	40-50%
Gras, Getreide	10-25%		
Savanne	15-20%		
Tropischer Regenwald	10-15%		
Laubwald	10-20%		
Nadelwald	5-15%		

# Schema der globalen Energieflüsse in der Atmosphäre (Wm<sup>-2</sup>)



# Energiebilanzmodell I

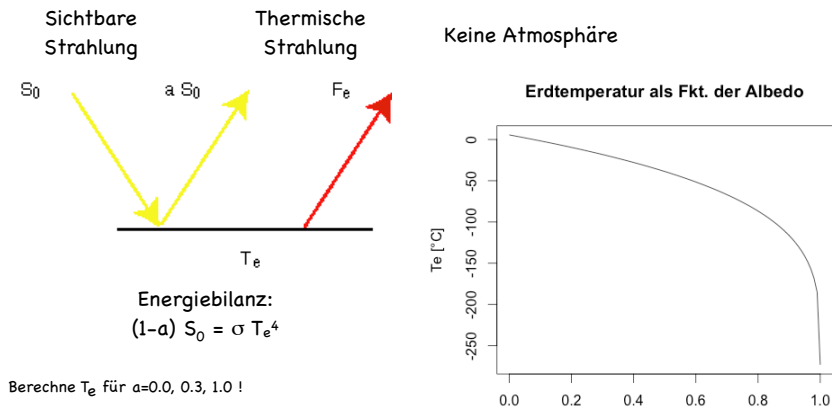


Keine Atmosphäre

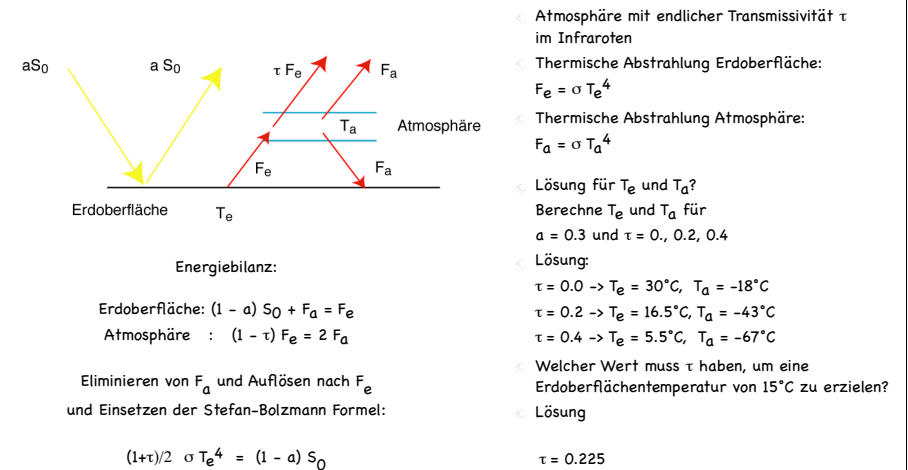
- ☉ Solare Einstrahlung im gemittelt über das Jahr und die gesamte Erdoberfläche:  
 $S_0 = 342 \text{ Wm}^{-2} (= I_0/4)$
- ☉ Albedo:  $a$
- ☉ Thermische Abstrahlung:  
 $F_e = \sigma T_e^4$   
 (Stefan-Boltzmann Gesetz)
- ☉  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$
- ☉ Erdoberflächentemperatur:  $T_e$

Berechne  $T_e$  für  $a=0.0, 0.3, 1.0$  !

# Energiebilanzmodell I



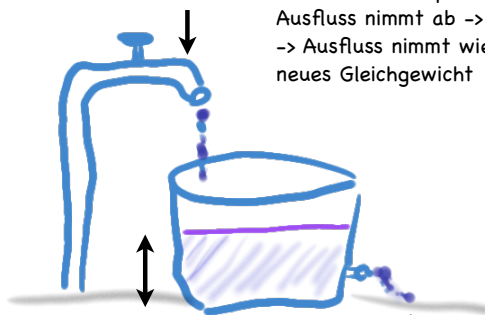
# Energiebilanzmodell II



## Wasserfass-Analogie

Zufluss  $\cong$   
Sonneneinstrahlung

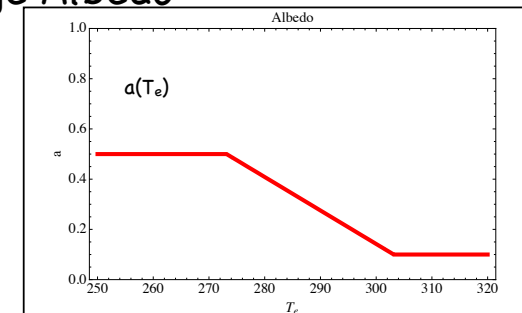
- Ausfluss ist proportional Wasserstand (Wasserdruck!)
- Zufluss nimmt zu  $\rightarrow$  Wasserstand steigt  $\rightarrow$  Ausfluss nimmt zu  $\rightarrow$  neues Gleichgewicht
- Partielles Verstopfen des Ausflusses  $\rightarrow$  Ausfluss nimmt ab  $\rightarrow$  Wasserstand steigt  $\rightarrow$  Ausfluss nimmt wieder zu  $\rightarrow$  neues Gleichgewicht



Wasserstand  $\cong$   
Temperatur

Ausfluss  $\cong$   
IR-Ausstrahlung

## Energiebilanzmodell II: Temperaturabhängige Albedo



## Energiebilanzmodell II: Temperaturabhängige Albedo

Gleichgewichtszustand wenn  
Einstrahlung = Ausstrahlung, d.h.

$$(1+\tau)/2 \sigma T_e^4 = (1 - a(T_e)) S_0$$

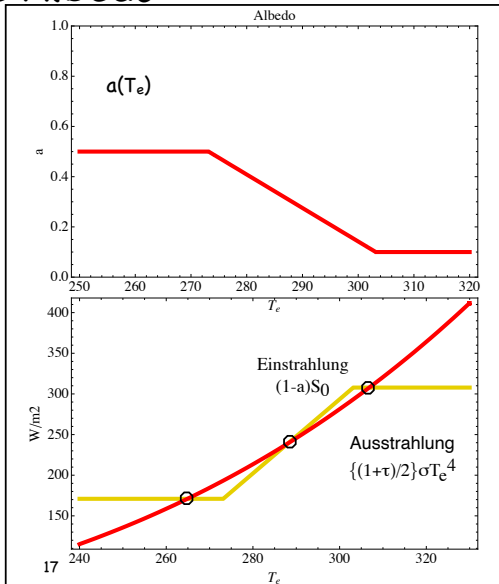
-> Frage: Welche sind stabil?

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$$

$$\tau = 0.225$$

$$S_0 = 342 \text{ Wm}^{-2}$$

$$a(T_e) = \begin{cases} 0.5 & (T_e < 273\text{K}), \\ 0.1 & (T_e > 303\text{K}), \\ \text{linear} & (273\text{K} < T_e < 303\text{K}) \end{cases}$$



## Energiebilanzmodell III (zeitabhängig)

### Grundgleichung

Zeitabhängiges Energiebilanzmodell

$$C \frac{dT_e}{dt} = (1 - a) S_0 - \frac{1 + \tau}{2} \sigma T_e^4$$

wobei:  $\uparrow$  Änderung des Wärmehalts,  $\uparrow$  Absorbierte Sonnenstrahlung,  $\uparrow$  Emittierte Wärmestrahlung

C: Wärmekapazität

$\alpha$ : Albedo

$\tau$ : Transmissivität der Atmosphäre

$\sigma$ : Stefan-Bolzmann Konstante

$T_e$ : Erdtemperatur

$S_0$ : Solarkonstante

18

## Wärmekapazität

• Einheit (hier):  $\text{J m}^{-2} \text{K}^{-1}$

• Wasser:  $c_{\text{H}_2\text{O}} \approx 1 \text{ kcal kg}^{-1} \text{K}^{-1} = 4000 \text{ J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

( vgl. Erdboden:  $c_{\text{Erdb.}} = 800 \text{ J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$  )

• ->  $1 \text{ m}^3$  Wasser entspricht:  $C \approx 4 \cdot 10^6 \text{ J m}^{-2} \text{K}^{-1}$

• Ozean (2/3 der Erdoberfläche) der Wassertiefe  $H_{\text{oc}}$ :

$$C = H_{\text{oc}} \cdot 2/3 \times 4 \times 10^6 \text{ J m}^{-2} \text{K}^{-1}$$

• Ozean:

Deckschicht (ca. 75m):  $2 \cdot 10^8 \text{ J m}^{-2} \text{K}^{-1}$

Oberer Ozean (ca. 360m):  $10^9 \text{ J m}^{-2} \text{K}^{-1}$

Gesamter Ozean (ca. 3900m):  $1.6 \cdot 10^{10} \text{ J m}^{-2} \text{K}^{-1}$

Atmosphäre:  $10^7 \text{ J m}^{-2} \text{K}^{-1}$

19

## Energiebilanzmodell III (zeitabhängig)

### Linearisierung: Entwicklung von $T_e^4$ um Referenzwert $T_0$

Taylor-Entwicklung um Referenztemperatur  $T_0$

(z.B. 0C):

$$\sigma T_e^4 \approx \sigma T_0^4 + 4\sigma T_0^3 (T_e - T_0) = A + B(T_e - T_0)$$

daher, mit  $T_e' = T_e - T_0$ :

$$C \frac{dT_e'}{dt} = (1 - a) S_0 - A - B T_e'$$

Lineare Differenzialgleichung erster Ordnung:

$$\frac{dT_e'}{dt} + \frac{B}{C} T_e' = (1 - a) S_0 - A$$

Lösung des homogenen Systems:

$$T_e'(t) = T_e'(0) e^{-\frac{B}{C}t}$$

mit Zeitkonstanten:

$$\tau = \frac{C}{B}$$

20

## Einstellzeiten für das thermische Gleichgewicht

	$C$ [ $\text{J m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ]	$\tau$ [yr]
Atmosphäre	$10^7$	0,28
Deckschicht (75m)	$2 \cdot 10^8$	5,5
Oberer Ozean (360m)	$10^9$	27,5
Gesamter Ozean (3900m)	$1.6 \cdot 10^{10}$	440

21

## Numerische Version des zeitabhängigen, simplen Energiebilanzmodells

Energiebilanzmodell III (mit Zeitabhängigkeit):

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} C_e T_e(t) &= S_0(1-a) + F_a^{\downarrow} - F_e^{\uparrow} \\ &= S_0(1-a) - \frac{1+\tau}{2} F_e^{\uparrow} \end{aligned}$$

Parametrisierung des Strahlungsflusses als Funktion der Temperatur der Erdoberfläche:

$$F_e^{\uparrow} = \sigma T_e^4$$

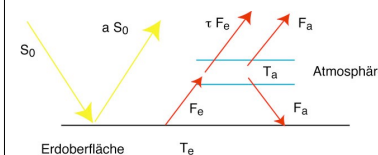
Diskretisierung der Zeit ( $t_0, t_1, t_2, \dots, t_i, \dots$ ) und der zeitlichen Ableitung:

$$\frac{d}{dt} C_e T_e(t) \approx C_e \frac{T_{e,i+1} - T_{e,i}}{\Delta t}$$

Auflösung nach  $T_{e,i+1}$  ergibt Iterationsformel

$$T_{e,i+1} = T_{e,i} + \frac{\Delta t}{C_e} \left( (1-a)S_0 - \frac{1+\tau}{2} \sigma T_{e,i}^4 \right)$$

22



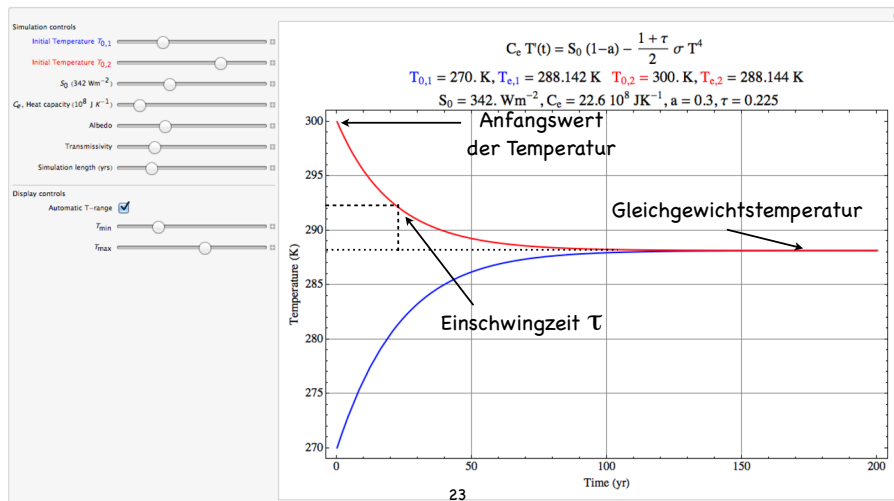
## Numerische Version des Energiebilanzmodells

Download: Vorlesungswebseite

[https://www.bgc-jena.mpg.de/4750210/bsi\\_lectures\\_climatology](https://www.bgc-jena.mpg.de/4750210/bsi_lectures_climatology)

CDF Versionen Energiebilanzmodelle unter „Hilfsmaterial“

### Einfaches Energiebilanzmodell mit konstanter Albedo



23

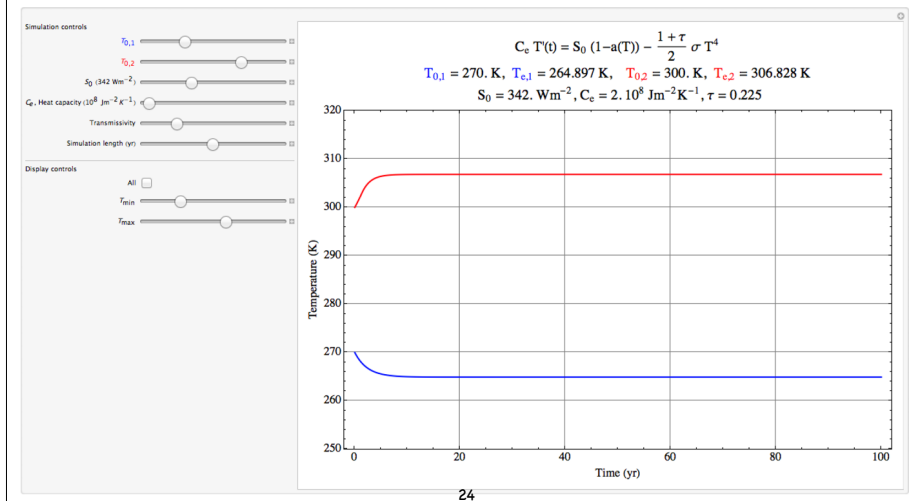
## Numerische Version des Energiebilanzmodells

Download: Vorlesungswebseite

[https://www.bgc-jena.mpg.de/4750210/bsi\\_lectures\\_climatology](https://www.bgc-jena.mpg.de/4750210/bsi_lectures_climatology)

CDF Versionen Energiebilanzmodelle unter „Hilfsmaterial“

### Energiebilanzmodell mit temperaturabhängiger Albedo

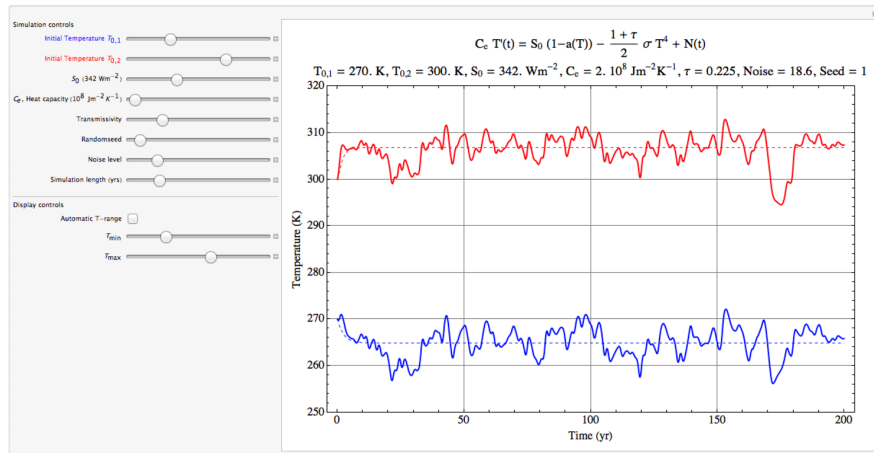


24

# Numerische Version des Energiebilanzmodells

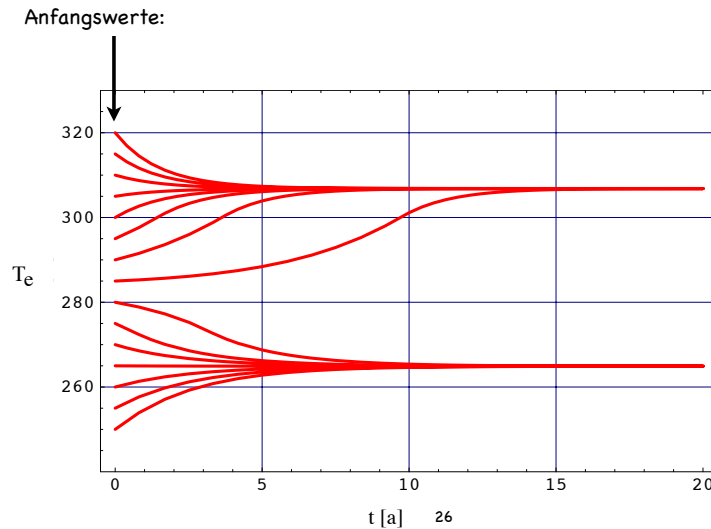
Download: Vorlesungswebseite  
[https://www.bgc-jena.mpg.de/4750210/bsi\\_lectures\\_climatology](https://www.bgc-jena.mpg.de/4750210/bsi_lectures_climatology)  
 CDF Versionen Energiebilanzmodelle unter „Hilfsmaterial“

## Energiebilanzmodell mit temperaturabhängiger Albedo und zusätzlichem Rauschen



25

## Temperaturabhängige Albedo: Verlauf der Temperatur als Funktion des Anfangswertes



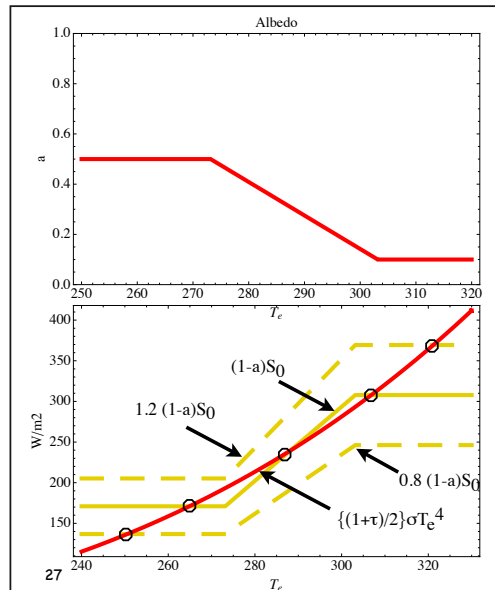
26

## Energiebilanzmodell II: Temperaturabhängige Albedo

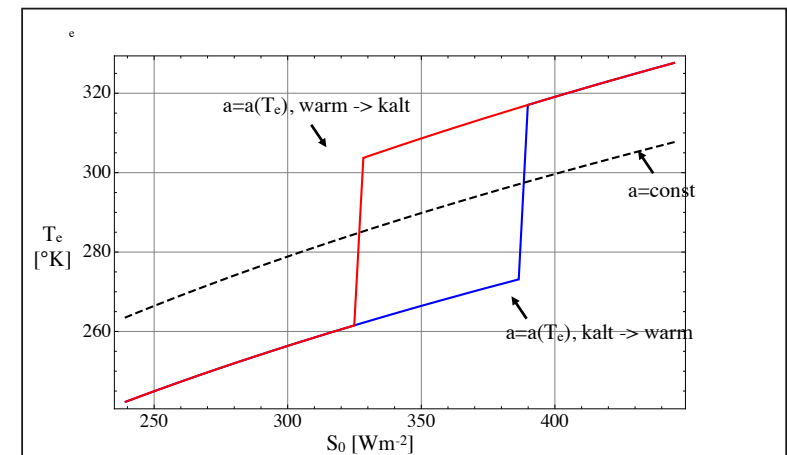
Gleichgewichtszustand wenn Einstrahlung = Ausstrahlung, d.h.

$$(1 + \tau) / 2 \sigma T_e^4 = (1 - a(T_e)) S_0$$

Effekt der Änderung der Solarkonstante:



## Temperaturabhängige Albedo: Resultierende Gleichgewichtstemperatur bei langsamer Variation der solaren Einstrahlung



28

## Fragen

- Welche Erdtemperatur stellt sich ein, wenn die Atmosphäre aus 2 im IR vollständig absorbierenden Schichten besteht?
- Welche Erdtemperatur ergibt sich bei n Schichten?
- Was kann man aus diesen Ergebnissen über den "runaway greenhouse effect" sagen?
- Welches sind die Strahlungs-Gleichgewichtstemperaturen von Venus, Erde und Mars?  
Sonnenabstand E-S: 1 AE, V-S: 0.71 AE,  
M-S: 1.67 AE; 1 AE =  $147 \cdot 10^6$  km  
Albedo:  $a_M=0.15$ ,  $a_E=0.3$ ,  $a_V=0.76$   
Welches sind die geschätzten  
Oberflächentemperaturen?