

Wintersemester 2023/2024

Physische Geographie 1

(Grundkursvorlesung PG 1 – Vorlesungsteil Klimatologie)

Prof. Dr. Christoph Beck

Lehrstuhl für Physische Geographie mit Schwerpunkt Klimaforschung

Institut für Geographie

Universität Augsburg

Strahlungsumsatz an der Erdoberfläche

Globalstrahlung unterliegt an der EOF

Reflexion und **Absorption**

Albedo = Verhältnis von reflektierter zu einfallender Strahlung

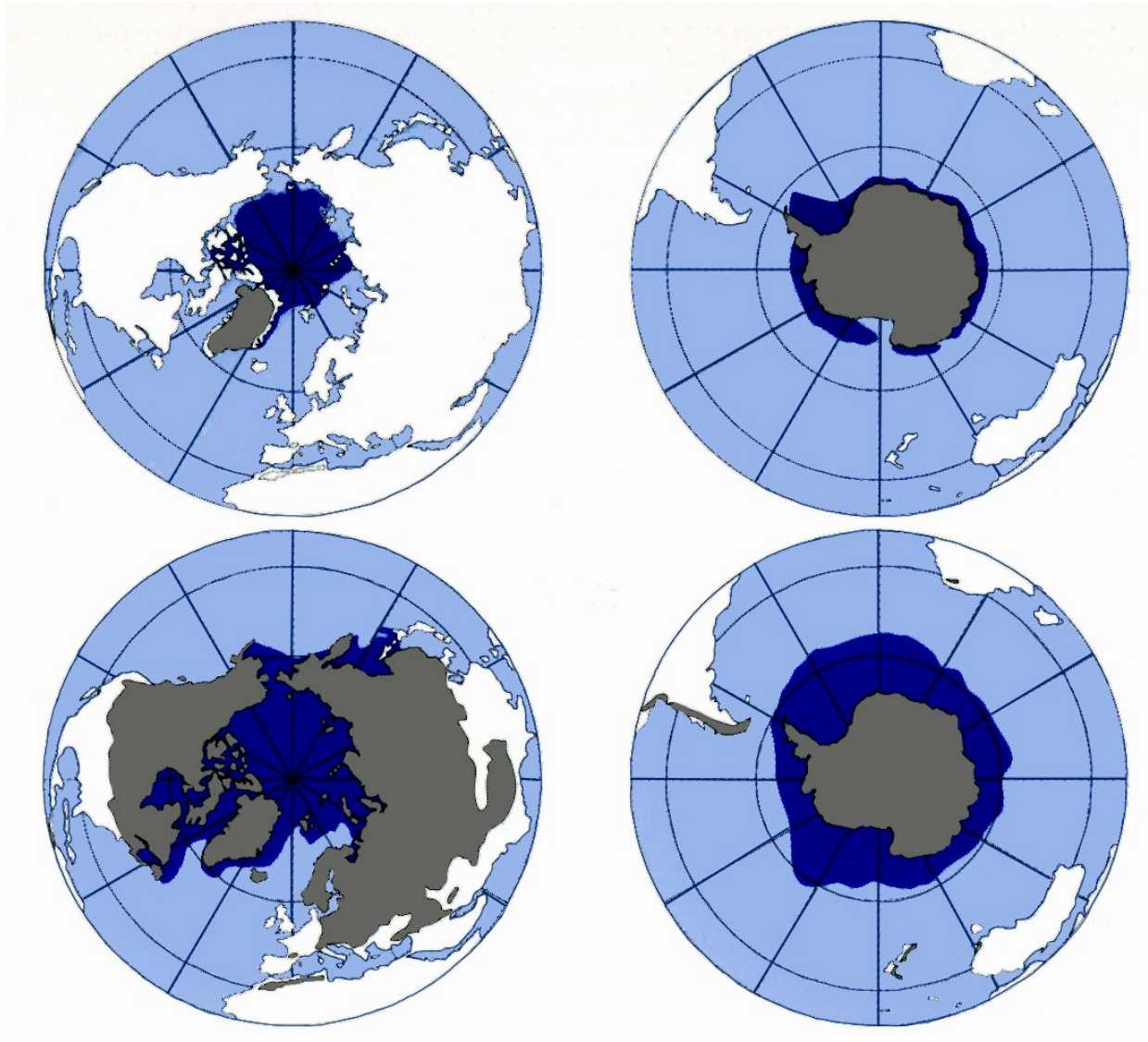
Albedo = Verhältnis von reflektierter zu einfallender Strahlung

Albedowerte (in % der auftreffenden Globalstrahlung)

Wasser:	7 – 25	Braunerden feucht:	7 – 12
Schnee:	75 – 95	Braunerden trocken:	20 – 23
Wüste:	25 – 30	Betondecke:	17 – 27
Getreide:	15 – 25	Asphalt:	5 – 10
Savanne:	15 – 20	Schichtwolken:	40 – 60
Wald:	5 – 20	Haufenwolken:	70 – 90

Planetarische Albedo (ca. 30%) =
atmosphärische (Wolken) Albedo + Albedo der Erdoberfläche

Raumzeitliche Variabilität der Albedo



Sommer

Winter

Eis- (blau) und Schnee- (grau) Bedeckung
(nach Hantel 1989 aus Schönwiese 2003)

Strahlungsabsorption an der Erdoberfläche

Absorption =

Umwandlung elektromagnetischer Wellenenergie in Wärmeenergie

Umsatz absorbierter Energie in Abhängigkeit von:

spezifischer Wärme und **Wärmeleitfähigkeit**skoeffizient



$$J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$$



$$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

Strahlungsabsorption an der Erdoberfläche

	spezifische Wärme [J*g ⁻¹ *K ⁻¹]	Wärmeleitfähigkeit [W*m ⁻¹ *K ⁻¹]
Luft	1.0	0.02
Wasser	4.18	0.60
Eis	2.1	2.10
Holz	1.3	0.10 – 0.20
Humus	1.7	1.30
Sand (trocken)	0.8	0.35
Sandstein	0.7	1.60 – 2.10
Granit	0.8	2.10 – 2.90
Beton	0.9	1.00 – 1.30

Thermische Ausgleichswirkung von Wasserkörpern

⇒ **geringer Oberflächenwärmegewinn:**

- **große spezifische Wärme**
- **Verteilung der Absorptionsenergie auf rel. großes Volumen**
 - ⇒ **Eindringtiefe der Einstrahlung**
 - ⇒ **turbulente Durchmischung**

⇒ **geringe Abkühlung:**

- **vergleichsweise geringe (temperaturabhängige) Ausstrahlung**
- **allmähliche Zufuhr gespeicherter Energie**

Ausstrahlung terrestrischer Oberflächen

Gesamtenergie, die ausgestrahlt wird:

Stefan – Boltzmann – Gesetz:

$$E = \sigma * \varepsilon * T^4$$

E: Ausstrahlung

T: abs. Temperatur des ausstrahlenden Körpers

σ : Stefan-Boltzmann-Konstante ($5.67 * 10^{-8}$)

ε : Emissionsvermögen

Ausstrahlung terrestrischer Oberflächen

Wellenlänge maximaler Energie:

Wien'sches Verschiebungsgesetz:

$$\lambda_{\max} * T = \text{const.}$$

λ_{\max} : Wellenlänge maximaler Energie

T: abs. Temperatur des ausstrahlenden Körpers

Atmosphärische Gegenstrahlung

Weitgehende Absorption der terrestrischen Ausstrahlung (E) an Atmosphärenbestandteilen und allseitige Ausstrahlung

**\Rightarrow atmosphärische Rückstrahlung
(Gegenstrahlung G_A) zur Erdoberfläche**

$$E - G_A = \text{effektive terrestrische Ausstrahlung}$$

Zusammenfassung der Strahlungsterme an der Erdoberfläche

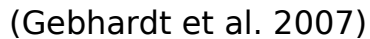
S:	Direkte Sonnenstrahlung	}	Globalstrahlung (kurzwellig)
H:	Diffuse Himmelsstrahlung		
a:	Albedo		
E:	Terrestrische Ausstrahlung	}	(langwellig)
G_A:	Atmosphärische Gegenstrahlung		

Zusammenfassung der Strahlungsterme an der Erdoberfläche

S:	Direkte Sonnenstrahlung	} Globalstrahlung (kurzwellig)
H:	Diffuse Himmelsstrahlung	
a:	Albedo	
E:	Terrestrische Ausstrahlung	} (langwellig)
G_A:	Atmosphärische Gegenstrahlung	

$$Q = (S + H) * (1 - a) - E + G_A$$

Q = Strahlungsbilanz (an der Erdoberfläche)



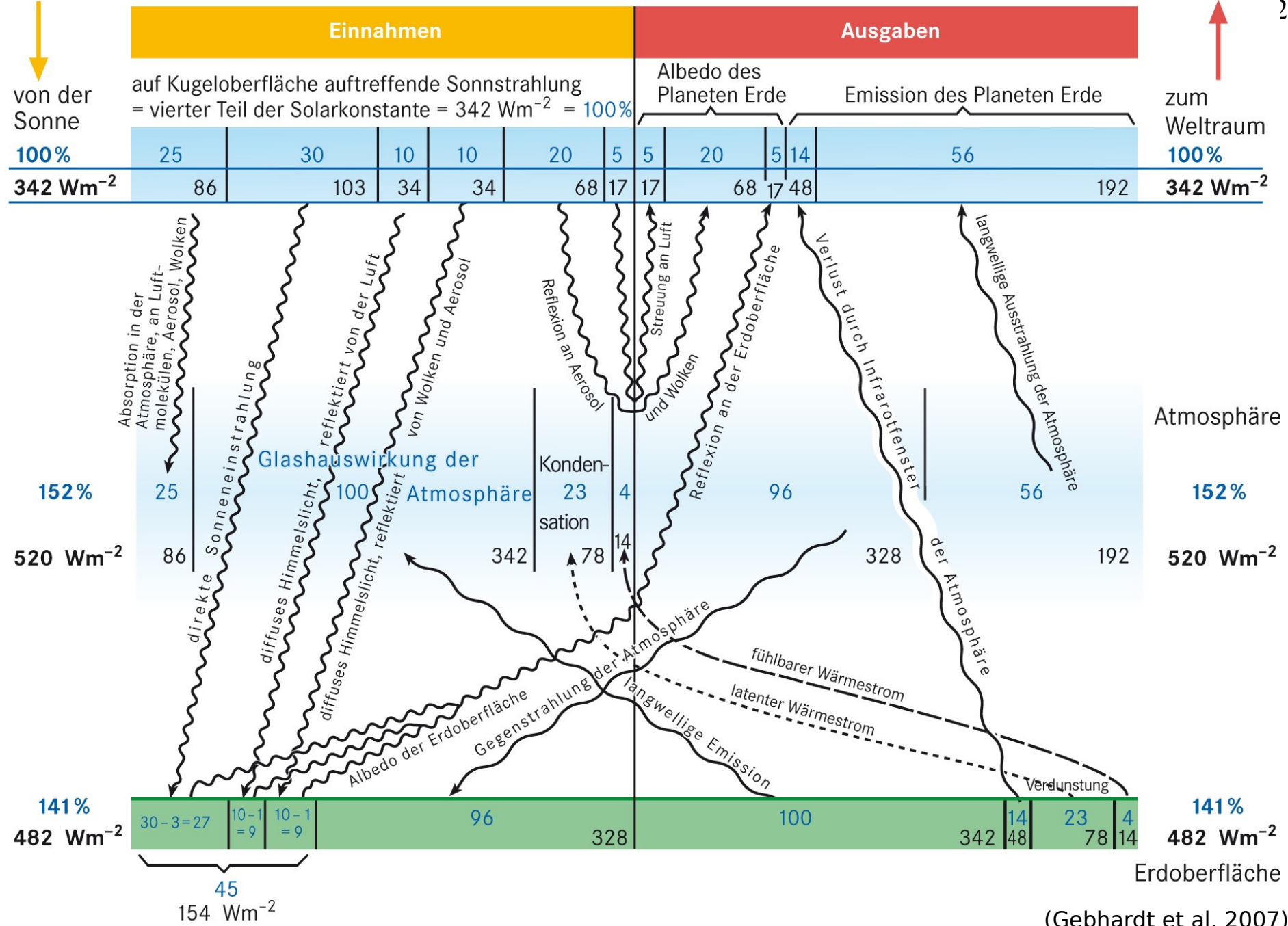
Solarkonstante (S_0) = $1368 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

Terrestrische Wärmeabstrahlung (Q_E) = $390 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
(unter Annahme eines idealen schwarzen Körpers)

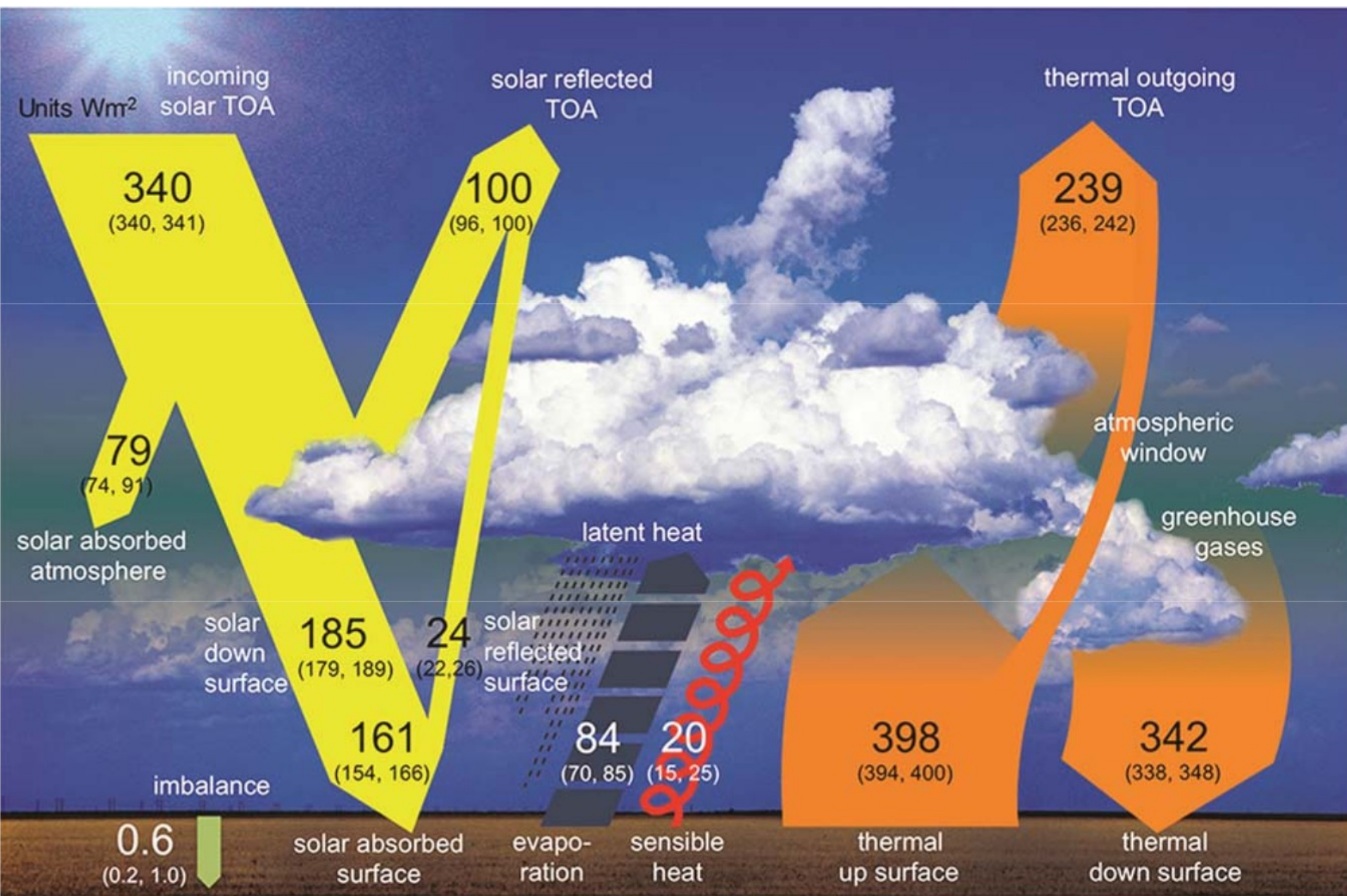
?

S_0 wirkt auf Querschnittsfläche
($\pi \cdot R^2$) der Erde

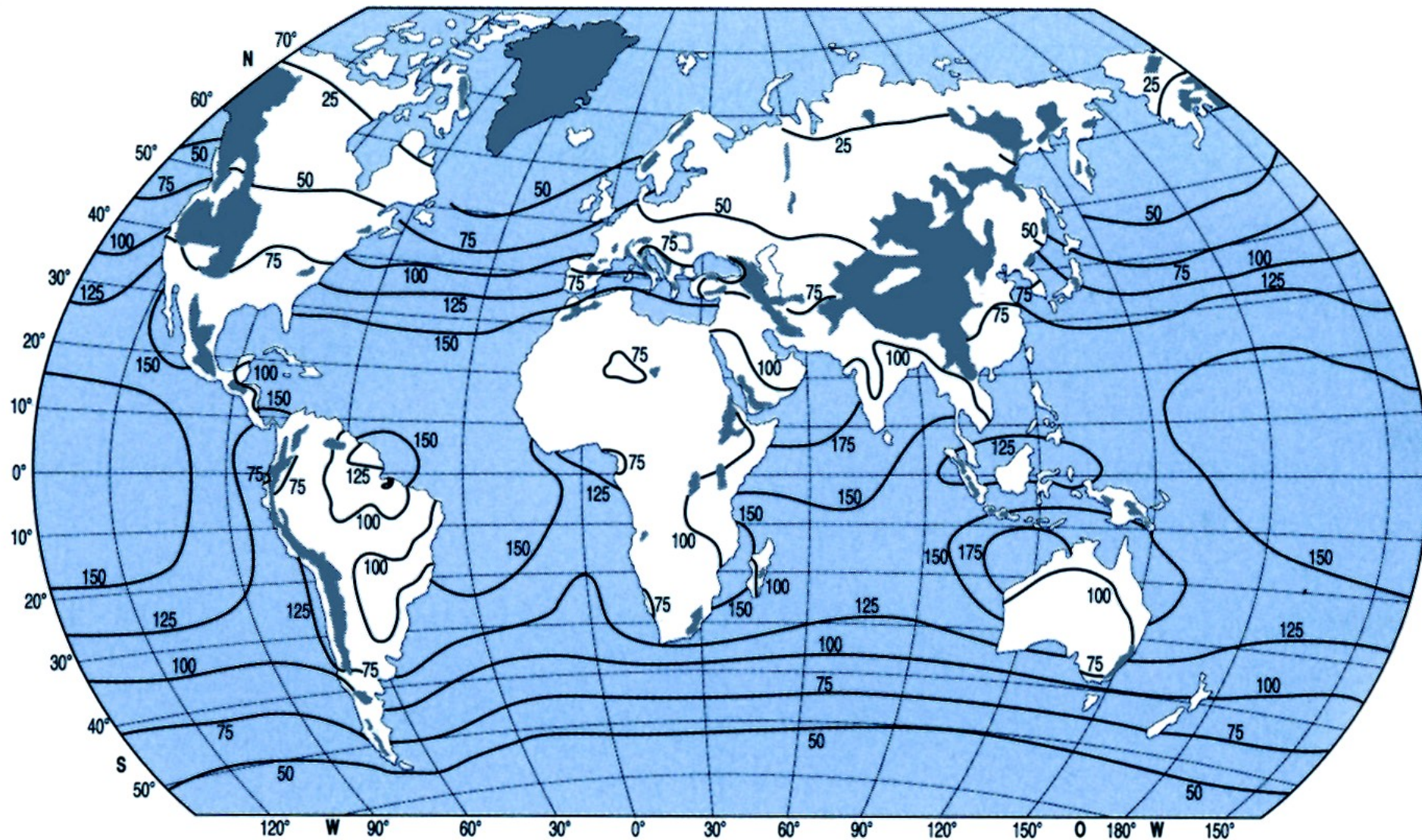
Q_E erfolgt über die gesamte
Kugeloberfläche ($4\pi \cdot R^2$)



(Gebhardt et al. 2007)



Räumliche Differenzierung der **Strahlungsbilanz**



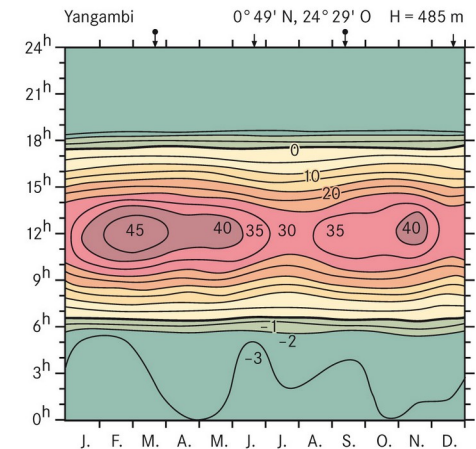
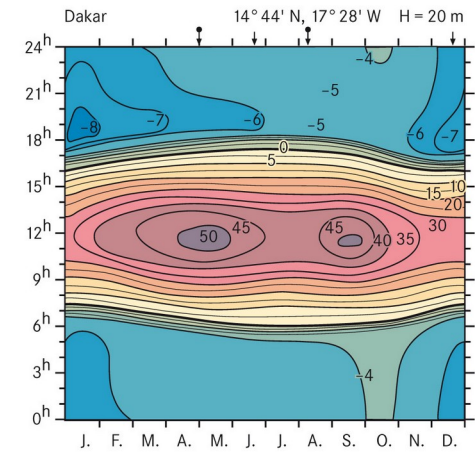
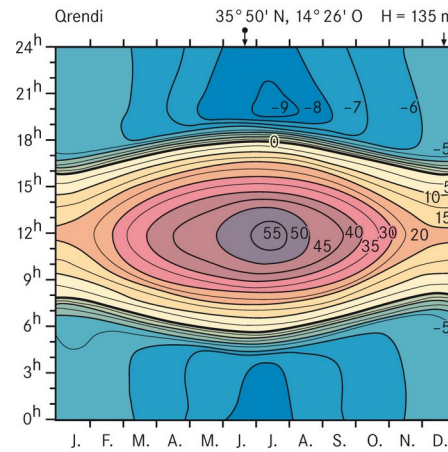
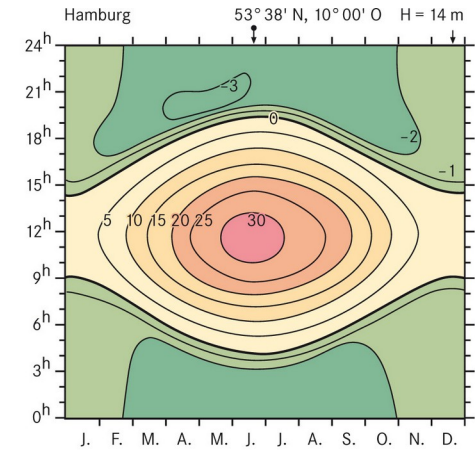
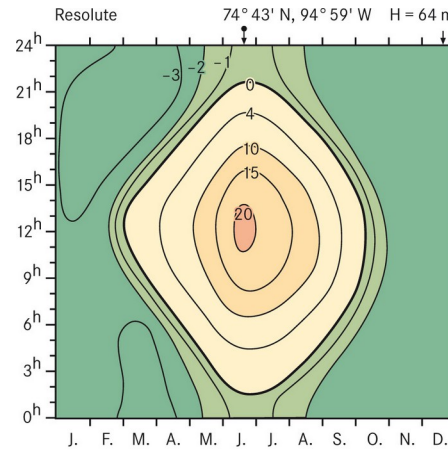
Weltkarte der Strahlungsbilanz
nach Satellitenmessungen, Jahresmittelwerte in W/m^2

(nach Peixoto und Oort 1992 und nach Hantel 1997, aus Schönwiese 2003)

[illegible]

Raumzeitliche Differenzierung der **Strahlungsbilanz**

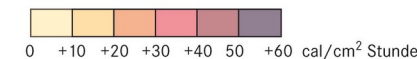
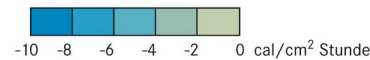
37



Strahlungsbilanz Q^* nach Kessler

↓ höchster Sonnenstand

↓ niedrigster Sonnenstand
(oder sekundäres Minimum in den Tropen)



(Gebhardt et al. 2007)

Flüsse sensibler und latenter Wärme

Positive Strahlungsbilanz der EOF (ca. +29%)

Negative Strahlungsbilanz der Atmosphäre (ca. -29%)

⇒ **Wärmeflüsse zwischen EOF und Atmosphäre**

Fluss **sensibler** Wärme (ca. 4%) ⇐ **molekulare** Wärmeleitung
turbulente Wärmeleitung

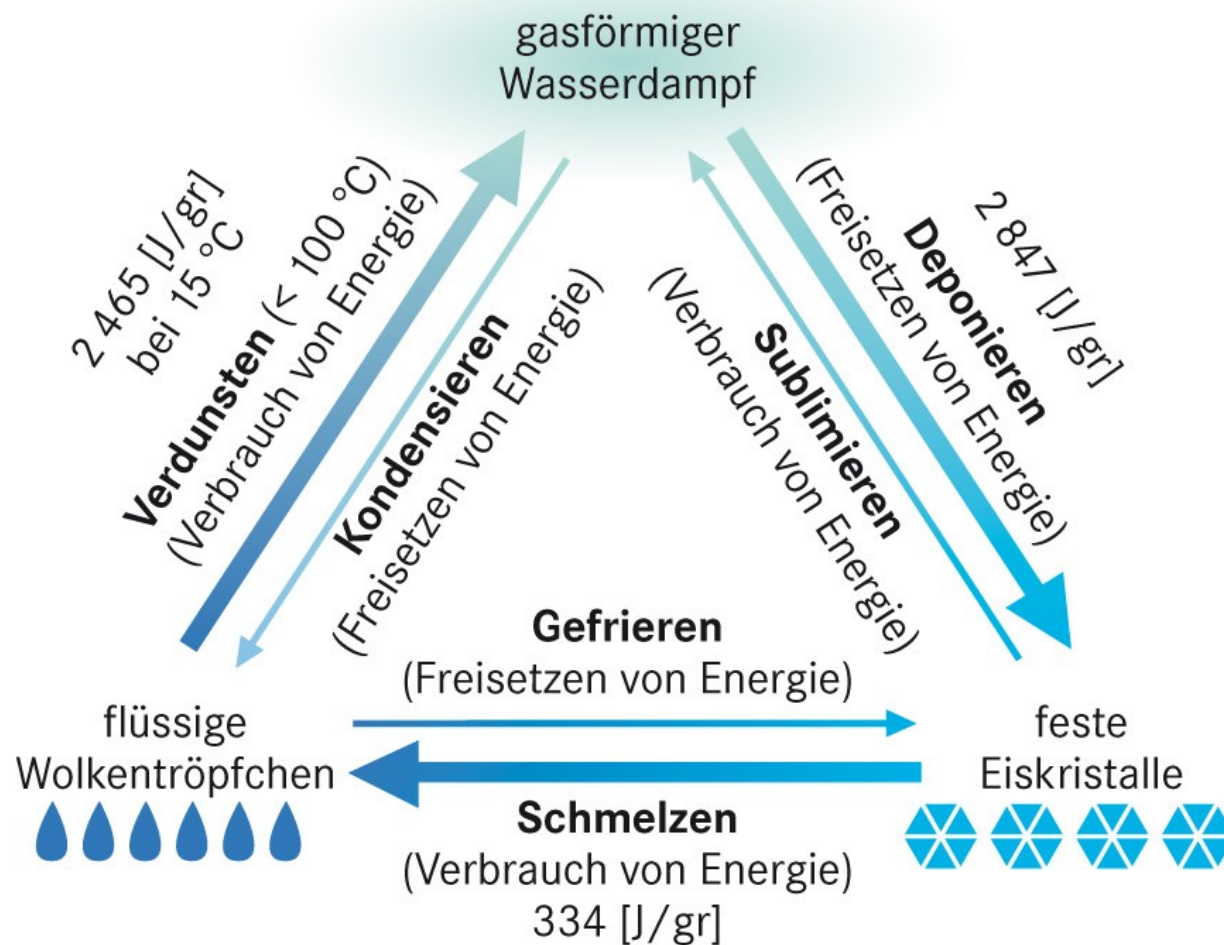
Fluss **latenter** Wärme (ca. 25%) ⇐ **Aggregatzustandsänderungen**
von H₂O

z.B.

Wärmeentzug (EOF) ⇐ Verdunstung/Schmelzen

Wärmezufuhr (Atmosphäre) ⇐ Kondensation/Gefrieren (Wolkenbildung)

Aggregatzustände von H₂O



Aus Gebhardt/Glaser/Radtke/Reuber: *Geographie*. 1. Aufl., © 2007 Elsevier GmbH

Verdunstungsenergie E_v in Abhängigkeit von der Temperatur T :

$T \text{ [}^\circ\text{C]}$	-10	0	10	20	30	40	100
$E_v \text{ [J/g]}$	2524	2498	2478	2452	2427	2394	2256

Flüsse sensibler und latenter Wärme

Raum-zeitlich variables Verhältnis von
sensible Wärmestrom (**W**) und **latentem** Wärmestrom (**V**)

Bowen-Verhältnis:

$$\beta = \frac{W}{V}$$

(Wärme)-Energiebilanz der Erdoberfläche

Energiebilanz:

$$Q + A = W + V + Sp + Ph$$

Q: Strahlungsbilanz

A: Anthropogener Wärmestrom

W: Fühlbarer Wärmestrom

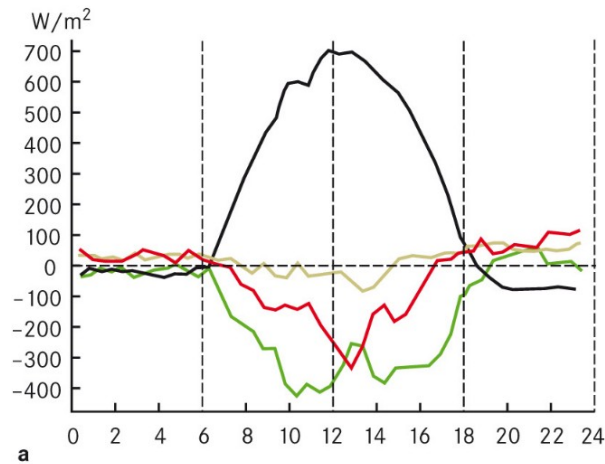
V: Latenter Wärmestrom

Sp: Speicherterm

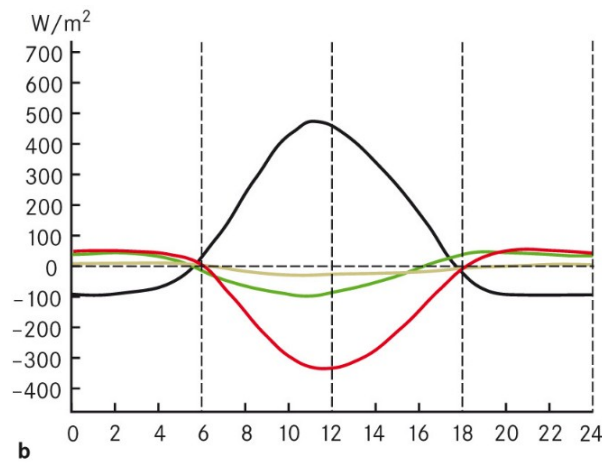
Ph: Photosynthese

(Wärme)-Energiebilanz der Erdoberfläche

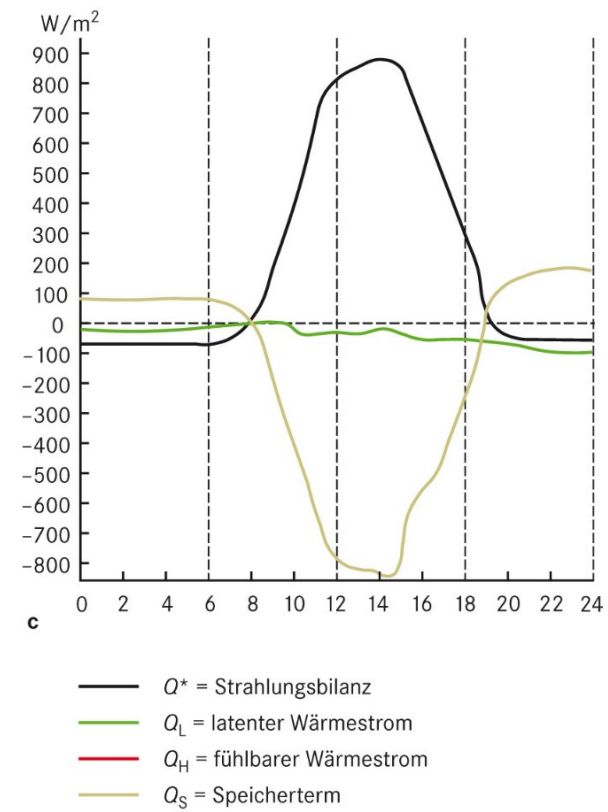
Kiefernwald
(Freiburg/Br.)



Wüste
(Gobi)



Wasser
(Trop. Atlantik)



Anthropogene Modifikationen des Strahlungs- und Energiehaushalts

Eingriff	Auswirkung auf...
Stratosphärischer Ozonabbau (durch FCKW, Halone u.a.)	$Ab_{so}, S+H$
Erhöhung der Aerosolkonzentration (z.B. Sulfat-Aerosol H_2SO_4)	$R_A, Ab_{so}, S+H$
Landnutzung (z.B. Waldrodung)	R_{EOF}, E_{EOF}, W, V
Städtische Baukörper (z.B. Oberflächenversiegelung)	$R_{EOF}, E_{EOF}, W, V, Sp$
Freisetzung strahlungswirksamer Spurengase	Ab_{EOF}, G_A

Natürlicher und anthropogen verstärkter Treibhauseffekt

- vorw. kurzwellige solare Einstrahlung gelangt zum grossen Teil ungehindert an die Erdoberfläche
- vorw. langwellige terrestrische Ausstrahlung wird zum größten Teil von atmosphärischen Spurengasen absorbiert und gelangt in erheblichem Umfang als atmosphärische Gegenstrahlung wieder in den bodennahen Bereich

Natürliche Herkunft

Anthropogener Eintrag

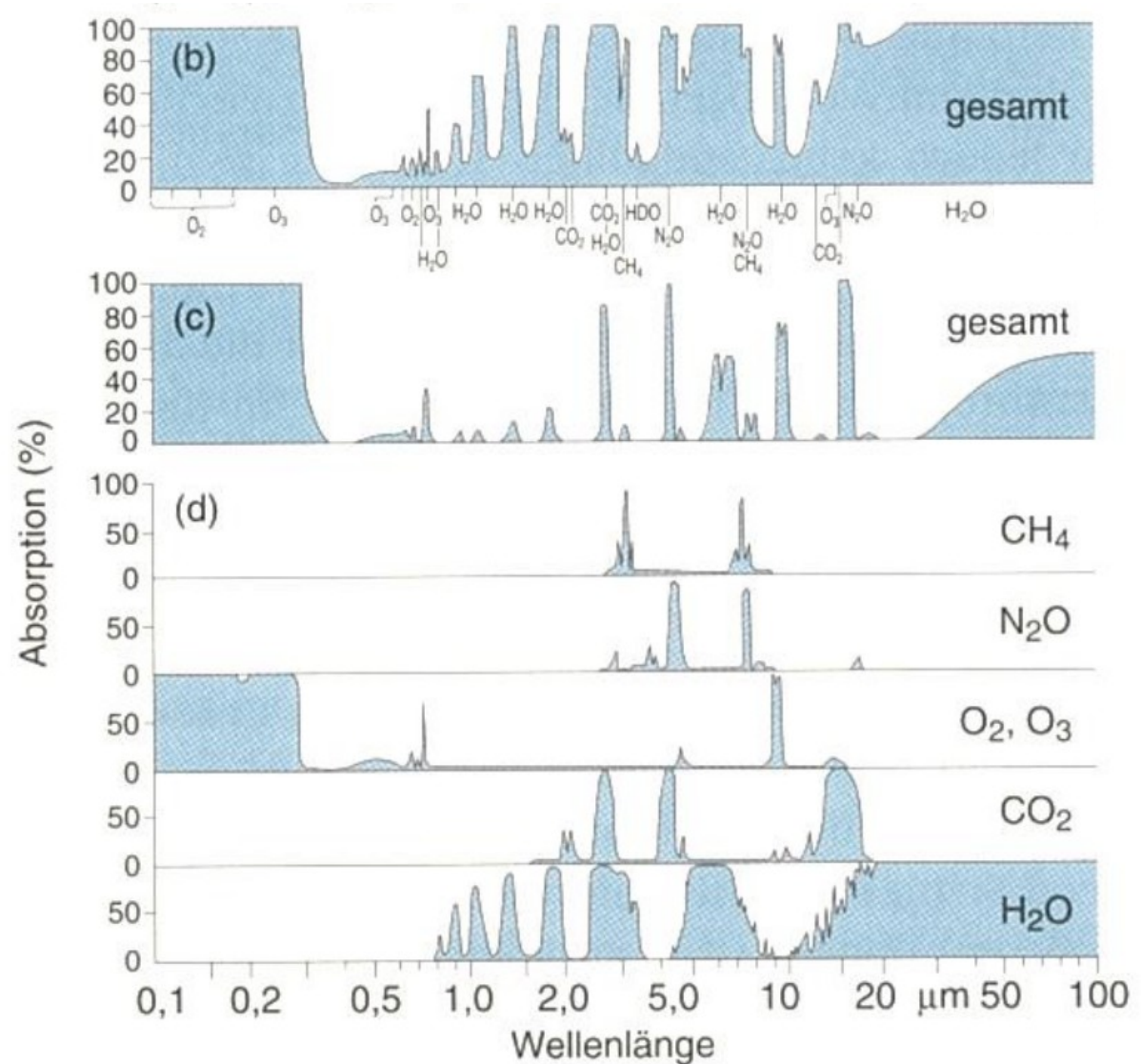
Wichtige klimarelevante Spurengase

in Meeresspiegelniveau

in 11 km Höhe

Absorptionsbanden

in Meeresspiegelniveau



(Schönwiese 2003)

Beitrag atmosph. Spurengase zum natürlichen Treibhauseffekt

Gas	Temp.-Erhöhung in °C	%-Anteil
Wasserdampf	20.6	62
Kohlendioxid	7.2	22
Ozon (bodennah)	2.4	7
Distickstoffoxid	1.4	4
Methan	0.8	3
weitere	0.8	2

⇒ **gesamter natürlicher Treibhauseffekt:** ca. 30°C

Beitrag atmosph. Spurengase zum anthropogenen Treibhauseffekt

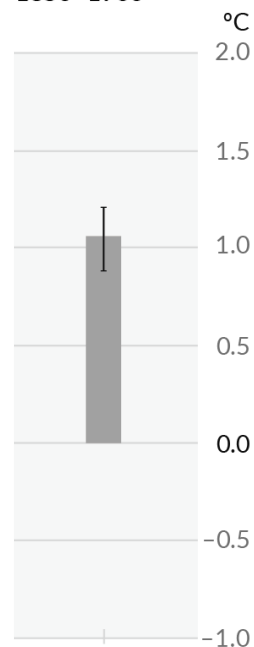
Gas	Konz.-Erhöhung in %/a	%-Anteil
Kohlendioxid	0.4	60
Methan	0.6	15
FCKW	0	11
Ozon (bodennah)	(5)	8
Distickstoffoxid	0.2	4
weitere	?	2

⇒ **bisheriger anthropogener Treibhauseffekt:** 0.8 – 1.2 °C

Observed warming is driven by emissions from human activities, with greenhouse gas warming partly masked by aerosol cooling

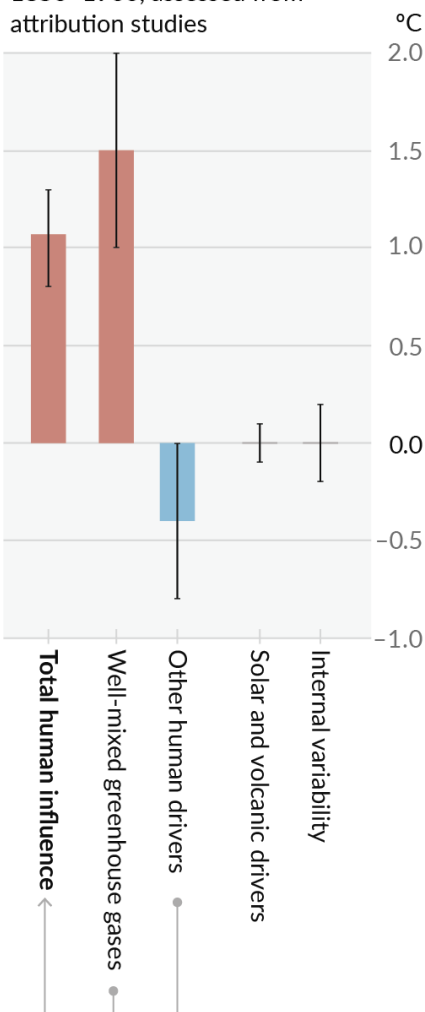
Observed warming

(a) Observed warming 2010–2019 relative to 1850–1900



Contributions to warming based on two complementary approaches

(b) Aggregated contributions to 2010–2019 warming relative to 1850–1900, assessed from attribution studies



(c) Contributions to 2010–2019 warming relative to 1850–1900, assessed from radiative forcing studies

