

Lösungen: Temperaturstrahlung und Klima

Temperaturstrahlung und Klima, S. 91

Teste dein Wissen 1

Erkläre einer Freundin oder einem Freund, wie man die Temperatur der Erde berechnen kann.

Antwort:

Man macht eine Energiebilanz im Strahlungsgleichgewicht. Die Erde „fängt“ Sonnenenergie über den Querschnitt πR_E^2 ein. Mit einer mittleren Einstrahlung am Erdboden von etwa $I \approx 1000 \text{ W/m}^2$ ergibt sich eine einfallende Leistung P_{ein} von:

$$P_{\text{ein}} = \pi R_E^2 \cdot I$$

Die Erde strahlt als (idealisierter) Schwarzer Strahler über die gesamte Oberfläche

$O_E = 4\pi \cdot R_E^2$ Wärmestrahlung ab:

$$P_{\text{aus}} = 4\pi R_E^2 \cdot \sigma T^4 \quad (\sigma \approx 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4)$$

Gleichsetzen $P_{\text{ein}} = P_{\text{aus}}$ liefert

$$4\pi R_E^2 \cdot \sigma T^4 = \pi R_E^2 \cdot I \Rightarrow 4\sigma T^4 = I \Rightarrow T = \left(\frac{I}{4\sigma}\right)^{1/4}$$

Mit einer mittleren Einstrahlung am Erdboden von etwa $I \approx 1000 \text{ W/m}^2$ ergibt sich:

$$T_E = \left(\frac{1000 \text{ W/m}^2}{4 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4}\right)^{1/4} \approx 258 \text{ K}$$

Ohne Treibhauseffekt ergibt sich näherungsweise $T_E \approx 258 \text{ K} \approx -15^\circ\text{C}$. Dass die Erde real im Mittel etwa $+15^\circ\text{C}$ hat, erklärt man mit der Atmosphäre und dem damit verbundenen natürlichen Treibhauseffekt.

Teste dein Wissen 2

Begründe, welche Argumente dafür sprechen, dass der derzeitige globale Temperaturanstieg der Erde vom Menschen verursacht ist.

Antwort:

- Starker Anstieg von Treibhausgasen seit der Industrialisierung: Dazu zählen u.a. Kohlendioxid (CO_2) Anstieg von 279 ppm auf 420 ppm (2023). Methan (CH_4) Anstieg von 0,73 ppm auf 1,92 ppm (2023).
- Ursachen sind menschliche Aktivitäten: Darunter zählen Förderung/Verbrennung fossiler Brennstoffe (Erdöl/Gas, Kohle), Landwirtschaft (Methan, Lachgas), Abholzung und Entwässerung von Mooren (CO_2 -Speicher gehen verloren) sowie Aerosolerzeugung in der Industrie (Sulfate, Ruß).

Teste dein Wissen 3

Erkläre einer Person zu Hause, was man unter dem Treibhauseffekt versteht.

Antwort:

Die Erde erhält Energie als Sonnenstrahlung. Ein Teil wird reflektiert, der Rest wird absorbiert und von der Erde als Infrarot-Wärmestrahlung wieder abgegeben. In der Atmosphäre gibt es Gase (v. a. Wasserdampf und CO_2), die diese IR-Strahlung absorbieren und anschließend in alle Richtungen wieder emittieren. Dadurch kommt ein Teil der Energie zurück zur Erdoberfläche, was die Erdtemperatur erhöht. Das nennt man natürlichen Treibhauseffekt; ohne ihn wäre Leben in der heutigen Form nicht möglich. Der anthropogene (vom Menschen verursachte) Treibhauseffekt wird durch Gase, die durch Aktivitäten des Menschen freigesetzt werden, verursacht.

Teste dein Wissen 4

Begründe, welche die wichtigsten Treibhausgase sind und welche davon anthropogen sind.

Antwort:

Wichtigste Treibhausgase:

- Wasserdampf (wichtigstes Treibhausgas)
- CO_2 , CH_4 (Methan), N_2O (Lachgas), FCKW/halogenierte Gase

Anthropogen (vom Menschen verursacht):

- **CO_2 :** durch Verbrennung von Kohle/Öl/Gas, Entwaldung.
- **CH_4 :** Landwirtschaft und fossile Energiegewinnung.
- **N_2O :** Landwirtschaft (Düngung).
- **FCKW/halogenierte Gase:** industriell hergestellt

Teste dein Wissen 5

Bei steigenden globalen Temperaturen könnten Meeresströmungen versiegen. Begründe!

Antwort:

Ein Beispiel hierfür ist der Golfstrom innerhalb der thermohalinen Zirkulation. Normalerweise strömt warmes Wasser nach Norden, gibt dort Wärme ab und sinkt aufgrund der steigenden Dichte bei Island und Grönland in die Tiefe, um als Tiefenströmung zurückzufließen. Dieser Kreislauf kann jedoch gestört werden, wenn durch schmelzende Gletscher große Mengen Süßwasser in das Meer gelangen. Dadurch sinkt die Salzkonzentration und die Dichte des Wassers nimmt nicht mehr ausreichend zu, sodass das Absinken ausbleibt und die gesamte Zirkulation abbrechen oder kippen kann.

Teste dein Wissen 6

Erkläre, welche Rolle die Ozeane für den Strahlungshaushalt der Erde spielen.

Antwort:

- **Wärmespeicher:** Ein großer Teil der globalen Wärmeenergie ist in den Ozeanen gespeichert, wodurch sie schnelle Temperaturschwankungen auf der Erde effektiv dämpfen.
- **CO_2 -Speicher/Senke:** Die Meere fungieren als wichtige Senke, indem sie CO_2 aufnehmen, wobei die Speicherfähigkeit für gelöstes CO_2 mit steigenden Wassertemperaturen jedoch abnimmt.
- **Biologische Rückkopplung:** Das Phytoplankton verbraucht durch Photosynthese aktiv CO_2 und bildet damit einen wesentlichen Teil der komplexen Klimarückkopplungen.

Teste dein Wissen 7

Erkläre, welche Rolle die Polgebiete für den Strahlungshaushalt der Erde spielen.

Antwort:

Reflexion durch Eis und Schnee: Aufgrund ihrer hohen Albedo reflektieren Eis- und Schneeflächen einen Großteil der einfallenden Sonnenstrahlung, was einen kühlenden Effekt auf das Erdklima hat.

Absorption durch freigelegte Flächen: Wenn das Eis schmilzt, werden dunkle Meeres- oder Landflächen frei, welche die Strahlung verstärkt absorbieren und so zu einer zusätzlichen Erwärmung führen.

Eis-Albedo-Rückkopplung in der Arktis: Da sich die Arktis besonders stark erwärmt und die Eisdecke dadurch deutlich zurückgeht, wird dieser selbstverstärkende Prozess (Rückkopplung) weiter intensiviert.

Teste dein Wissen 8

Bewerte den Einfluss der Rodung von Wäldern auf den Strahlungshaushalt der Erde.

Antwort:

Negativ (treibhauseffektverstärkend): Rodung setzt Kohlenstoff frei (~1,5 Mrd. Tonnen Kohlenstoff/Jahr) und zerstört gleichzeitig einen wichtigen CO₂-Speicher (Photosynthese fällt weg).

Komplexer Zusatzpunkt (Albedo): Wälder sind dunkler als z. B. Schnee/Grasland und absorbieren mehr Sonnenstrahlung. Dadurch können sie die reflektierte Strahlung deutlich verringern.

Bewertung: Insgesamt ist Rodung klima- und strahlungshaushaltsmäßig sehr problematisch (mehr CO₂ + weniger Senke). Der Albedo-Aspekt macht die genaue Wirkung regional/zeitlich komplex, ändert aber nicht, dass Rodung im Gesamtsystem meist erwärmend wirkt.

Teste dein Wissen 9

Recherchiere, welchen Einfluss Smog auf die Gesundheit von Menschen hat (91.1).

Beispielantwort:

Laut Abbildung 91.1: Smog enthält u. a. Ruß, Schwefeldioxid, Staub und Nebel. Typische Quellen sind Kraftwerke/Industrie/Hausbrand/Autoabgase.

Gesundheitliche Auswirkungen:

- **Kurzfristig:** Reizung der Atemwege, Husten, Atembeschwerden
→ Verschlechterung von Asthma/Bronchitis und mehr Atemwegsinfektionen.
- **Langfristig:** erhöhtes Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen (z. B. Schlaganfall/Herzkrankheit), Lungenkrebs, sonstige Erkrankungen der Lunge und Atemwege; Störungen des Nervensystems; mehr vorzeitige Todesfälle bei chronischer Belastung durch Feinstaub.

Besonders gefährdet sind Kinder, ältere Menschen sowie Menschen mit bestehenden Herz-/Lungenerkrankungen.

Rechenaufgabe 1

- Berechne die Leistung einer Solarzelle von 1 m² bei einem theoretischen Wirkungsgrad von 20 %, wenn die Strahlungsintensität 800 W/m² beträgt.
- Berechne, welche Fläche benötigt würde, um einen Elektroherd (Anschlussleistung: 2,5 kW) mit elektrischer Energie zu versorgen?
- Bestimme, welche Fläche man in Österreich mit Photovoltaikanlagen bedecken müsste, damit die derzeit in Wärmekraftwerken erzeugte elektrische Energie (gesamter Strombedarf 68 000 GWh, 20% davon Wärmekraft) durch Solarenergie ersetzt werden könnte (Pro Jahr scheint die Sonne ca. 2 000 Stunden).
- Diskutiere die Probleme, die sich bei Verwendung von Photovoltaik zur großflächigen Stromversorgung ergeben.

Antwort:

Gegeben: $A = 1 \text{ m}^2$, $\eta = 20\% = 0,2$, $I = 800 \text{ W/m}^2$

a) Leistung der Solarzelle

$$P = \eta \cdot I \cdot A$$
$$P = 0,20 \cdot 800 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 1 \text{ m}^2 = \mathbf{160 \text{ W}}$$

Bei einem Wirkungsgrad von 20 % beträgt die Leistung 160 W pro m².

b) Fläche für einen Elektroherd

Gegeben: $P_{\text{Herd}} = 2,5 \text{ kW} = 2\,500 \text{ W}$

Leistung pro 1 m^2 : 160 W/m^2

$$A = \frac{P_{\text{Herd}}}{160 \text{ W/m}^2} = \frac{2\,500 \text{ W}}{160 \text{ W/m}^2} = 15,625 \text{ m}^2$$

Für 2,5 kW werden bei optimalen Bedingungen etwa $15,6 \text{ m}^2$ Solarzellen gebraucht.

c) Photovoltaikfläche

Geht man von einem gesamten Strombedarf von 68 000 GWh aus, dann beträgt der durch Wärmekraft (20 % davon) erzeugte Strom etwa:

$$E_W = 68\,000 \text{ GWh} \cdot 0,2 = 13\,600 \text{ GWh} = 136 \cdot 10^8 \text{ kWh}$$

Jahresenergie pro 1 m^2 :

$$E_{1\text{qm}} = P_{1\text{qm}} \cdot t = 160 \text{ W} \cdot 2000 \text{ h} = 320\,000 \text{ Wh} = 320 \text{ kWh}$$

Die benötigte Solarfläche ergibt sich aus:

$$A = \frac{E_W}{E_{1\text{qm}} \text{ m}^{-2}} = \frac{136 \cdot 10^8 \text{ kWh}}{320 \text{ kWh/m}^2} = 42,5 \cdot 10^6 \text{ m}^2 = 42,5 \text{ km}^2$$

Um die in Wärmekraftwerken erzeugte elektrische Energie durch Solarenergie zu ersetzen, bräuchte man $42,5 \text{ km}^2$ Solarfläche.

d) Diskussion: typische Probleme bei PV als großflächige Stromversorgung

Eines der Hauptprobleme ist, dass man elektrische Energie derzeit nur über Speicherkraftwerke oder in Akkumulatoren speichern kann. Da die Photovoltaikleistung wetterbedingt schwankt und im Jahresmittel nur ca. 50 % der Maximalleistung erreicht, wäre eine doppelt so große Fläche nötig. Dieser enorme Speicherbedarf (Batterien, Pumpspeicher, Wasserstoff) führt jedoch zu signifikanten Wirkungsgradverlusten, während die Nutzung von Freiflächen statt Dachflächen oft den Naturschutz sowie die gesellschaftliche Akzeptanz gefährdet.

Zudem erfordert die dezentrale Erzeugung einen massiven Netzausbau zu den Verbrauchszentren. Auch der ökologische Fußabdruck bei Materialgewinnung, Produktion und Recycling ist kritisch, da die begrenzte Lebensdauer der Anlagen und der Bedarf an Rohstoffen eine nachhaltige Entsorgung erschweren.

Rechenaufgabe 2

Die Erde absorbiert etwa 70 % der einfallenden Strahlung, der Rest wird reflektiert. Ohne Atmosphäre würde die Erde ca. 90 % der auftreffenden Energie absorbieren, da die Reflexion von Licht an der Lufthülle, vor allem an den Wolken entfielen. Berechne die Gleichgewichtstemperatur, die sich in diesem Fall einstellen würde. Vergleiche dein Ergebnis mit den Temperaturen, die auf dem Mond herrschen. Wie könnte man die Unterschiede zu deinem Ergebnis erklären?

Antwort:

Ohne Treibhauseffekt sollte die Erdtemperatur etwa $T_{70\%} \approx 258 \text{ K} (-15^\circ\text{C})$ betragen.

Da in der Bilanz gilt $T \propto P^{1/4}$ (weil $\sigma T^4 = P/A$), folgt:

$$\frac{T_{90\%}}{T_{70\%}} = \left(\frac{0,9}{0,7}\right)^{1/4} \Rightarrow T_{90\%} = T_{70\%} \cdot \left(\frac{0,9}{0,7}\right)^{1/4}$$

$$T_{90\%} = 258 \text{ K} \cdot \left(\frac{0,9}{0,7}\right)^{1/4} \approx 258 \text{ K} \cdot 1,065 \approx 275 \text{ K} \approx +2^\circ\text{C}$$

Vergleich mit dem Mond:

Ohne Atmosphäre fehlen Wärmetransport (Winde), Wärmespeicher (Ozeane) und „Isolationswirkung“. Zudem gibt es sehr lange Tag-/Nachtphasen. Deshalb schwanken die Temperaturen auf dem Mond extrem (bis zu 130°C am Tag und -170°C nachts). Ein einfacher Gleichgewichts-Mittelwert erklärt die realen Extremwerte nur begrenzt.

Rechenaufgabe 3

- a) Erörtere, wie viel Energie die Sonne jährlich zur Erde strahlt. Der weltweite Primärenergiebedarf pro Jahr beträgt etwa $1,6 \cdot 10^{14} \text{ kWh}$ (Daten von 2014) (Erdradius $6\,371 \text{ km}$, Strahlungsleistung der Sonne am Boden der Erdatmosphäre ca. $1\,000 \text{ W/m}^2$).
- b) Bestimme, in welchem Verhältnis der Primärenergiebedarf zur eingestrahltten Sonnenenergie steht.
- c) Begründe, ob wir diesen Energiebedarf über die Sonne decken könnten. Welche Probleme müssten dabei gelöst werden?

Antwort:

Gegeben: $E_{\text{prim}} = 1,6 \cdot 10^{14} \text{ kWh/a}$, $R_E = 6\,371 \text{ km} = 6,371 \cdot 10^6 \text{ m}$, $I \approx 1000 \text{ W/m}^2$

a)

Querschnittsfläche der Erde:

$$A = \pi R_E^2 = \pi (6,371 \cdot 10^6)^2 \approx 1,275 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$$

Für die ankommende Strahlungsleistung gilt:

$$P = I \cdot A \approx 1000 \text{ W/m}^2 \cdot 1,275 \cdot 10^{14} \text{ m}^2 = 1,275 \cdot 10^{17} \text{ W}$$

Jahresenergie in kWh ($t = 365 \cdot 24 \text{ h} = 8\,760 \text{ h}$):

$$E_{\text{jähr}} = P \cdot t \approx 1,275 \cdot 10^{17} \cdot 8\,760 \text{ h} \approx 11,2 \cdot 10^{17} \text{ kWh}$$

Die Sonne liefert auf die gesamte Erde bezogen (Querschnitt πR_E^2) im Jahr etwa $11,2 \cdot 10^{17} \text{ kWh}$.

b)

$$\frac{E_{\text{jähr}}}{E_{\text{prim}}} = \frac{11,2 \cdot 10^{17} \text{ kWh}}{1,6 \cdot 10^{14} \text{ kWh}} = 7000$$

Die Sonne liefert um etwa 7 000-mal mehr Energie, als der Primärenergiebedarf.

c) Prinzipiell könnten wir den Energiebedarf mit Sonnenenergie decken.

Der Primärenergiebedarf ist nur ein sehr kleiner Bruchteil der eingestrahltten Sonnenenergie. Faktoren wie Wirkungsgrad, Flächenbereitstellung, Speicher mit Tag/Nacht- und saisonalen Schwankungen, Netzausbau/Transport, Rohstoffe/Produktion/Recycling und Akzeptanz sind entscheidend für die zukünftige Realisierbarkeit.

Rechenaufgabe 4

Interpretiere die Diagramme 91.2 und 91.3 und beurteile, welche politischen Schlussfolgerungen aus den Diagrammen gezogen werden können.

Antwort:

Diagramm 91.2 (Verkehrsbedingte Emissionen in der EU, 2019):

Das Diagramm verdeutlicht, dass im Jahr 2019 der Straßenverkehr mit 71,7 % der dominierende Verursacher von verkehrsbedingten CO₂-Emissionen in der EU war, wobei Personenkraftwagen mit 60,6 % den größten Anteil daran haben. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass effektiver Klimaschutz zwingend eine Verkehrswende im Straßenverkehr (z. B. durch Elektromobilität) sowie eine massive Verlagerung des Transports auf die emissionsarmen Varianten (z. B. Schienenverkehr) erfordert.

Diagramm 91.3 (Emissionen in der EU nach Sektor, 1990 - 2019):

Das Diagramm zeigt, dass die Inlandsbeförderung als einziger Sektor ihre Emissionen seit 1990 signifikant gesteigert hat (+25 %), während alle anderen Bereiche, wie Industrie, Energieversorgung, Landwirtschaft, Wohn- und Geschäftsgebäude, ihre Emissionen deutlich senken konnten (-25 % bis -30 %). Politisch bedeutet dies, dass bisherige Maßnahmen im Verkehrssektor wirkungslos waren und dieser Bereich als das zentrale Problemfeld der Klimapolitik priorisiert werden muss.

Rechenaufgabe 5

Benutze ein Simulationstool wie z. B. En-ROADS (91.4), um die Entwicklung der globalen Primärenergiequellen bis 2100 oder den Temperaturanstieg auf der Erde zu simulieren. Ändere die Werte und analysiere die Auswirkungen, die du dadurch sehen kannst.

Beispielantwort: (Anhand der En-ROADS Tools)

Das Dashboard verstehen:

Oben (Die Ergebnisse): Du siehst standardmäßig zwei Hauptgrafiken. Links werden die Energiequellen, rechts der projizierte Temperaturanstieg bis 2100 angezeigt.

Unten (Die Regler): Hier befinden sich die Schieberegler, unterteilt in Sektoren wie Energieversorgung, Transport & Verkehr, Gebäude & Industrie etc.

Interaktion: Bewege einen Regler (z. B. "Erneuerbare Energien" nach rechts), um Subventionen zu simulieren. Die Grafiken aktualisieren sich sofort. Klicke auf den Titel oder auf das 3-Punkte-Kontextmenü neben den entsprechenden Schieberegler, um eine Beschreibung der jeweiligen Maßnahme zu erhalten.

Beispielanalyse: Das "Verkehrs-Dilemma" lösen

Schritt 1: Nur Elektrifizierung des Verkehrs

Aktion: Schiebe im Bereich Transport & Verkehr den Regler „Elektrifizierung“ auf das Maximum (starke Förderung von E-Autos).

Erwartung: Man würde denken, die Temperatur sinkt massiv.

Beobachtung: Die projizierte Temperatur sinkt nur wenig (z.B. um 0,1 °C) oder gar nicht.

Grund: Wenn E-Autos mit Strom aus Kohle- oder Gaskraftwerken fahren, verlagert sich die Emission nur vom Auspuff zum Schornstein des Kraftwerks.

Schritt 2: Elektrifizierung + Ausbau erneuerbarer Energien

Aktion: Lasse den Regler für Elektrifizierung oben. Schiebe nun im Bereich Energieversorgung den Regler „Erneuerbare Energien“ auf hoch (starke Subventionen).

Beobachtung: Jetzt sinkt die Temperaturkurve deutlich stärker. (z.B. um 0,2-0,3 °C)

Grund: Die Verkehrswende in Schritt 1 funktioniert nur im Zusammenspiel mit einer Energiewende Schritt 2.

Schritt 3: Energieeffizienz im Verkehr

Aktion: Lasse den Regler für Elektrifizierung und erneuerbare Energien oben. Schiebe nun den Regler „Energieeffizienz“ im Bereich Transport & Verkehr nach oben.

Bedeutung: Dies simuliert technologische Verbesserungen (sparsamere Motoren) oder Verhaltensänderungen (z.B. mehr Schienen- statt Straßenverkehr).

Beobachtung: Dies bringt oft schnelle Erfolge, da der Energiebedarf insgesamt sinkt, bevor er überhaupt "grün" gedeckt werden muss. (Senkungen um etwa 0,1-0,2°C)

Zusatz: Kurzfazits formulieren

Welche Stellschrauben senken die Temperatur am stärksten? Welche sind womöglich politisch/technisch am schwierigsten? Welche Nebenwirkungen (Kosten, Landnutzung, Akzeptanz) wären zu erwarten?