minærva

AS 7

SKRIPT

Planeten, Klima, Leben

Erklärskript

Die Aufgaben 203–239 zu diesem Skript stehen im Aufgabenskript, die Lösungen im Lösungsskript. Verweise auf Aufgaben sind Links.

Astronomie – Klasse 7 bis Kursstufe

Pirmin Gohn

Nutzungshinweis: Dieses Skript darf nur im Rahmen des Unterrichts verwendet werden; insbesondere ist die eigenständige Weitergabe untersagt.

Skriptreihe AS · Astronomie (Klasse 7 bis Kursstufe)

AS1 Himmel	**AS2** Erde und Mond	**AS3** Sonnensystem	**AS4** Sonne	**AS5** Himmelsmechanik
AS6 Licht aus dem All	**AS7** Planeten und Leben	**AS8** Sterne	**AS9** Sternentwicklung	**AS10** Kosmos

Lernen mit minærva

Dieses Skript ist ein Teil von minærva. Alles gehört zusammen: Jedes Thema führt von der Erklärung zum Üben, zum Ausprobieren und ins große Bild.

minaerva.de

Skripte Verstehen
Der Stoff zum Nachlesen: Erklärungen, Herleitungen, Beispiele und typische Fehler.
minaerva.de

noctua Üben
Fragen zu jedem Abschnitt, mit sofortiger Rückmeldung.
noctua.minaerva.de

fabrica Ausprobieren
Versuche und Anschauungen zum Selbermessen und Anfassen, ohne Konto, auch auf dem iPad.
fabrica.minaerva.de

tela Vernetzen
Das Wissensnetz: worauf ein Thema aufbaut und wohin es führt.
tela.minaerva.de

So greifen die Skripte ineinander

Erklärskripte	Astronomie: zehn Themenskripte AS1–AS10 von Klasse 7 bis zur Kursstufe mit dem Stoff, aber ohne Aufgaben. Unter jeder Abschnittsüberschrift steht, aus welchem Bildungsplan der Stoff stammt (Physik, IMP, Basisfach Astrophysik, Wahlfach Astronomie) oder ob er Zusatz ist.
Aufgabenskript	Ein gemeinsames Aufgabenskript für alle Themen. Die Erklärskripte verweisen darauf; jede Aufgaben-, Abbildungs- und Tabellennummer gibt es in der Reihe nur einmal.
Lösungsskript	Die Lösungen zu allen Aufgaben, mit denselben Nummern.

Am Ende vieler Abschnitte stehen Links zur passenden Übung, zum Versuch und ins Wissensnetz. In der PDF-Datei lassen sie sich direkt antippen.

Inhaltsverzeichnis

Worum es geht ... **4**
1 Strahlungsbilanz eines Planeten ... **5**
1.1 Das Licht der Sonne ... 5
1.2 Die Solarkonstante ... 5
1.3 Aufgenommen und abgestrahlt ... 6
1.4 Venus, Erde und Mars im Modell ... 7
1.5 Die Strahlungsbilanz der Erde ... 8
2 Treibhauseffekt bei Venus, Erde und Mars ... **10**
2.1 Wie der Treibhauseffekt wirkt ... 10
2.2 Ein einfaches Schichtmodell ... 10
2.3 Drei Nachbarn im Vergleich ... 11
2.4 Die Temperatur in kleinen Schritten simulieren ... 12
2.5 Klimasimulationen und Szenarien ... 13
3 Die habitable Zone ... **15**
3.1 Was Leben braucht ... 15
3.2 Die stellare habitable Zone ... 15
3.3 Leben auf Venus und Mars? ... 16
3.4 Mehr als der richtige Abstand ... 16
3.5 Die galaktische habitable Zone ... 17
4 Wie Planetensysteme entstehen ... **18**
4.1 Hinweise aus dem Sonnensystem ... 18
4.2 Von der Wolke zur Scheibe ... 18
4.3 Vom Staub zum Planeten ... 18
4.4 Die Schneegrenze: Gesteins- und Gasplaneten ... 19
4.5 Andere Systeme sind anders ... 19
5 Exoplaneten finden ... **20**
5.1 Warum Exoplaneten schwer zu sehen sind ... 20
5.2 Die Transitmethode ... 20
5.3 Die Radialgeschwindigkeitsmethode ... 21
5.4 Astrometrie ... 22
5.5 Der Mikrolinseneffekt ... 22
5.6 Direkte Abbildung ... 23
5.7 Die Methoden im Vergleich ... 23
6 Atmosphären untersuchen und Leben suchen ... **25**
6.1 Transmissionsspektroskopie ... 25
6.2 Biosignaturen ... 25
6.3 Suche nach Leben im Sonnensystem ... 26
6.4 Kontakt mit Außerirdischen? ... 26

Worum es geht

Kurz nach Sonnenuntergang steht im Westen oft ein auffallend heller „Stern“: die Venus, der „Abendstern“. Etwas höher leuchtet manchmal ein rötlicher Punkt, der Mars. Beide sind unsere Nachbarn, beide sind Gesteinsplaneten wie die Erde, beide haben eine Atmosphäre – und doch könnten sie kaum verschiedener sein: Auf der Venus ist es heißer als in einem Pizzaofen, auf dem Mars kälter als im Winter in der Antarktis. Nur die Erde dazwischen hat Ozeane und Leben.

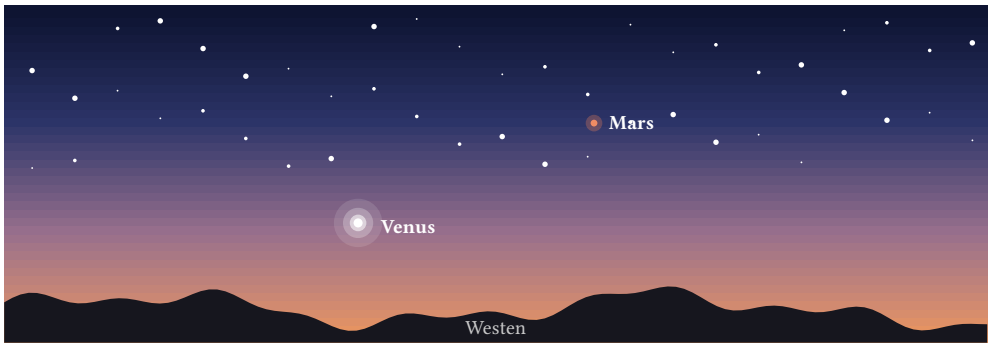


Abbildung 99: Abendhimmel im Westen kurz nach Sonnenuntergang (schematisch): Venus als heller „Abendstern“, darüber der rötliche Mars.

Warum das so ist, klärt dieses Skript Schritt für Schritt. Kapitel 1 zeigt, wie viel Energie ein Planet von seinem Stern bekommt und wieder abgibt. Kapitel 2 erklärt den Treibhauseffekt bei Venus, Erde und Mars und wie Klimasimulationen die Zukunft der Erde durchrechnen. Kapitel 3 fragt, in welchem Abstand von einem Stern Leben möglich sein könnte. Die Kapitel 4 bis 6 verlassen das Sonnensystem: Wie entstehen Planeten, wie findet man Planeten bei anderen Sternen, und wie könnte man dort Spuren von Leben erkennen?

Planeten, Klima, Leben im Lehrplan. Stufe: Klasse 9 bis Kursstufe. Welcher Plan welchen Abschnitt verlangt, sagen die Marken unter den Überschriften. IMP 9 (Geophysik) verlangt die Kapitel 1 bis 3, IMP 10 die Transitmethode aus Kapitel 5. Planetenentstehung, Exoplaneten und die Suche nach Leben sind Stoff des Wahlfachs Astronomie; Nachweismethoden und Atmosphären von Exoplaneten auch des Physik-Basisfachs mit Schwerpunkt Astrophysik.

Quellen-Marken. Unter jeder Abschnittsüberschrift steht, aus welchem Bildungsplan Baden-Württembergs der Stoff stammt: Physik 7/8 | IMP 8 | IMP 9 | IMP 10 für die Mittelstufe (Physik und Profilfach IMP), Basisfach Astrophysik | Wahlfach Astronomie für die Kursstufe (Physik-Basisfach mit Schwerpunkt Astrophysik, Wahlfach Astronomie). Zusatz heißt: Der Abschnitt steht in keinem dieser Pläne, gehört aber in anderen Ländern zum Pflichtstoff Astronomie (Sachsen-Anhalt, Mecklenburg-Vorpommern, Thüringen) und ist hier Bonus.

Die Aufgaben zu diesem Skript stehen im Aufgabenskript der Reihe, die Lösungen im Lösungsskript. Jedes Kapitel endet mit Verweisen auf passende Übungen in **noctua** und Stationen in **fabrica**. Fachbegriffe sind beim ersten Auftreten **fett** gesetzt und am Ende jedes Kapitels in einem Kasten zusammengefasst.

1 Strahlungsbilanz eines Planeten

1.1 Das Licht der Sonne

IMP 9

Hält man die Hand in die Sonne, spürt man Wärme; ein dunkles Auto heizt sich im Sommer stark auf. Die Sonne schickt uns Energie als Strahlung – und zwar nicht nur sichtbares Licht. Zerlegt man das Sonnenlicht mit einem Prisma, sieht man die Farben von Rot bis Violett. Jenseits des roten Endes liegt unsichtbare **Infrarotstrahlung** (Wärmestrahlung), jenseits des violetten Endes die **Ultraviolettstrahlung** (UV), die einen Sonnenbrand verursacht.

Jeder Körper strahlt, und zwar umso stärker und umso kurzwelliger, je heißer er ist (Skript AS8, Kapitel 3). Die Sonnenoberfläche hat etwa 5800 K; ihre Strahlung hat das Maximum bei etwa 500 nm, mitten im sichtbaren Bereich. Knapp die Hälfte der Energie kommt als sichtbares Licht, ungefähr ebenso viel als Infrarot, weniger als ein Zehntel als Ultraviolett. Die Erde mit rund 290 K strahlt dagegen fast nur im fernen Infrarot um 10 µm (Abbildung 100).

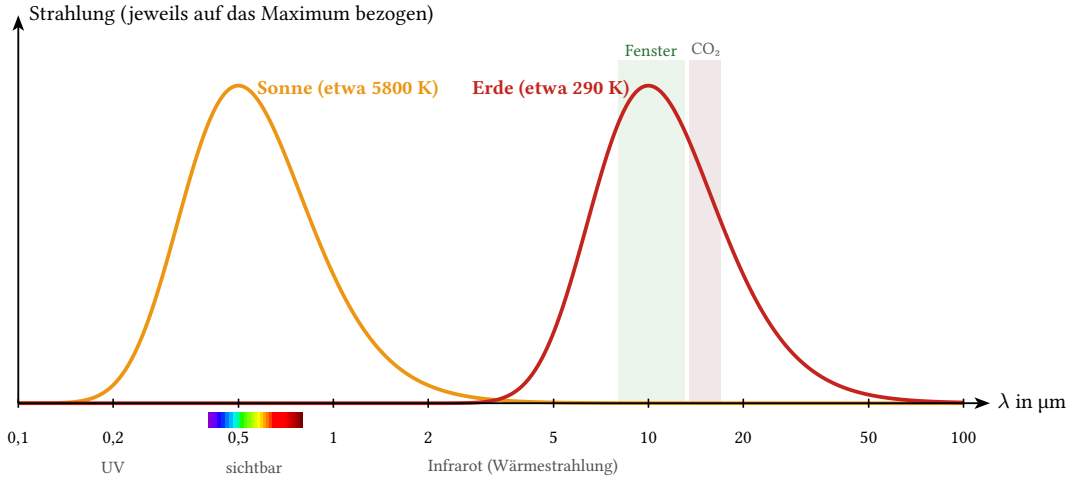


Abbildung 100: Strahlung der Sonne (etwa 5800 K) und der Erde (etwa 290 K), jede Kurve auf ihr Maximum bezogen; die Wellenlängenachse ist logarithmisch. Die beiden Bereiche überlappen kaum. Grün: das „Fenster“, in dem die Luft Wärmestrahlung durchlässt, daneben die starke Absorption durch Kohlendioxid.

Merksatz

Sonnenstrahlung und Wärmestrahlung

- Die Sonne strahlt **kurzwellig**: vor allem sichtbares Licht und nahes Infrarot, dazu etwas Ultraviolett.
- Planeten strahlen **langwellig**: Wärmestrahlung im fernen Infrarot.
- Nach dem **Wienschen Verschiebungsgesetz** liegt das Maximum bei $\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$ mit $b = 2{,}898 \cdot 10^{-3}\ \text{m} \cdot \text{K}$.

Dass die beiden Strahlungen in ganz verschiedenen Bereichen liegen, ist der Schlüssel zum Treibhauseffekt (Kapitel 2): Ein Gas kann für Licht durchsichtig und für Wärmestrahlung undurchsichtig sein.

1.2 Die Solarkonstante

IMP 9

Die Sonne strahlt ihre Leistung, die Leuchtkraft $L_\odot = 3{,}83 \cdot 10^{26}\ \text{W}$, gleichmäßig in alle Richtungen ab. Im Abstand r verteilt sich diese Leistung auf eine Kugeloberfläche $4\pi r^2$. Die Leistung, die pro Quadratmeter senkrecht zur Strahlung ankommt, heißt **Bestrahlungsstärke** S:

$$S = \frac{L_\odot}{4\pi r^2}.$$

Definition

Die **Solarkonstante** ist die Bestrahlungsstärke der Sonne im mittleren Abstand der Erde (1 AE), gemessen über der Atmosphäre senkrecht zur Strahlung:

$$S_0 = \frac{3{,}83 \cdot 10^{26}\ \mathrm{W}}{4\pi \cdot (1{,}496 \cdot 10^{11}\ \mathrm{m})^2} \approx 1361 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}.$$

Doppelter Abstand bedeutet ein Viertel der Bestrahlungsstärke. Mit S_0 gilt für einen Planeten im Abstand a einfach

$$S = S_0 \cdot \left(\frac{1\ \mathrm{AE}}{a}\right)^2.$$

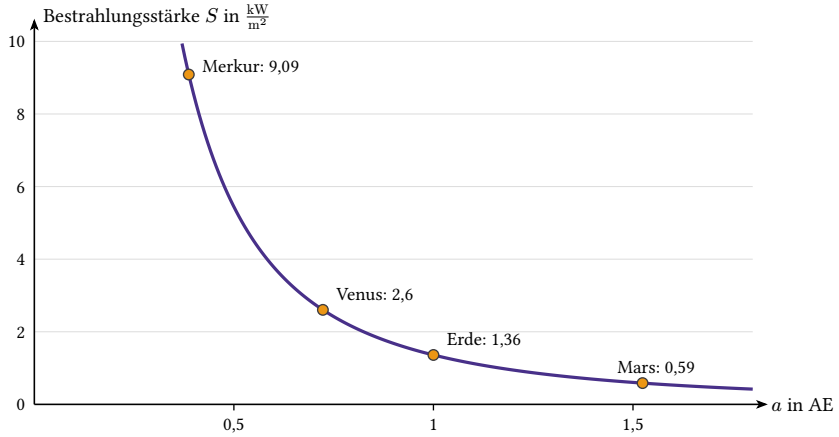


Abbildung 101: Bestrahlungsstärke der Sonne in Abhängigkeit vom Abstand, mit den Werten für die Gesteinsplaneten (in $\frac{\mathrm{kW}}{\mathrm{m}^2}$). Die Venus bekommt fast doppelt so viel Sonnenstrahlung wie die Erde, der Mars nicht einmal halb so viel.

Am Erdboden kommt weniger an als S_0, weil die Luft einen Teil der Strahlung zurückwirft und schluckt; an einem klaren Sommermittag sind es in Mitteleuropa grob $1000 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$ auf eine senkrecht zur Sonne gestellte Fläche. Wie man die Solarkonstante selbst misst und wie Solarthermie und Photovoltaik die Sonnenstrahlung nutzen, steht im Skript AS4.

1.3 Aufgenommen und abgestrahlt

IMP 9

Ein Planet bekommt ständig Energie von seinem Stern. Würde er sie nur aufnehmen, würde er immer heißer. Tatsächlich strahlt er selbst Wärmestrahlung ins All ab, und zwar umso mehr, je wärmer er ist. Nach einiger Zeit stellt sich ein **Strahlungsgleichgewicht** ein: Der Planet gibt genauso viel Leistung ab, wie er aufnimmt. Wie bei einem Topf auf der Herdplatte, dessen Temperatur nicht weiter steigt, sobald er so viel Wärme abgibt, wie die Platte liefert.

Aufnahme. Nicht alles Licht wird verschluckt. Wolken, Eis und helle Wüsten werfen einen Teil zurück. Der Anteil des zurückgeworfenen Lichts heißt **Albedo** A (lateinisch „Weißheit“): $A = 0$ heißt völlig schwarz, $A = 1$ völlig weiß. Die Erde hat $A \approx 0{,}31$. Aufgefangen wird die Sonnenstrahlung von der Querschnittsfläche des Planeten, einer Kreisscheibe mit dem Planetenradius R (Abbildung 102). Aufgenommen wird also

$$P_{\mathrm{auf}} = S \cdot \pi R^2 \cdot (1 - A).$$

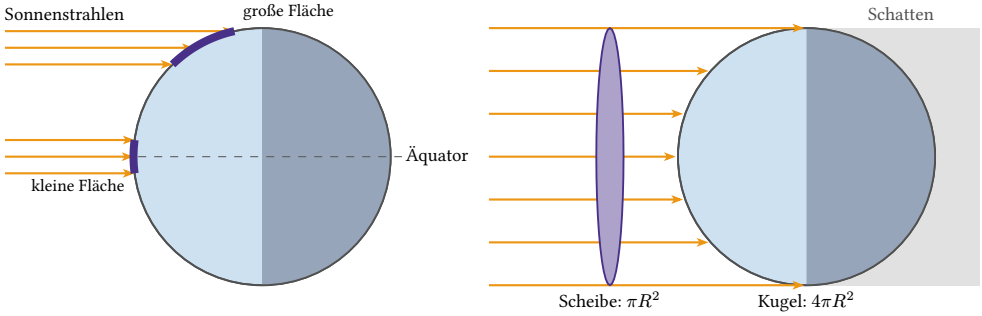


Abbildung 102: Links: Am Äquator verteilt sich ein Strahlenbündel auf eine kleinere Fläche als in hohen Breiten. Rechts: Die Erde fängt so viel Sonnenstrahlung auf wie eine Kreisscheibe mit dem Erdradius, πR^2; abstrahlen kann sie über ihre ganze Oberfläche $4\pi R^2$.

Abgabe. Abgestrahlt wird über die ganze Kugeloberfläche $4\pi R^2$, Tag- und Nachtseite. Nach dem **Stefan-Boltzmann-Gesetz** strahlt ein Körper der Temperatur T je Quadratmeter die Leistung σT^4 ab, mit $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2 K^4}}$:

$$P_{\mathrm{ab}} = 4\pi R^2 \cdot \sigma T^4 .$$

Im Gleichgewicht ist $P_{\mathrm{auf}} = P_{\mathrm{ab}}$. Der Planetenradius kürzt sich heraus:

$$S \cdot \pi R^2 \cdot (1 - A) = 4\pi R^2 \cdot \sigma T^4 \quad \Longrightarrow \quad \sigma T^4 = \frac{S(1-A)}{4}.$$

Der Faktor 4 kommt daher, dass die Strahlung auf eine Scheibe fällt, aber von einer viermal so großen Kugeloberfläche abgegeben wird. Im Mittel über Tag und Nacht und alle Breiten bekommt jeder Quadratmeter der Erdoberfläche also $\frac{S_0}{4} \approx 340\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2}}$.

Merksatz

Gleichgewichtstemperatur eines Planeten (ohne Treibhauseffekt):

$$T = \sqrt[4]{\frac{S(1-A)}{4\sigma}}.$$

Sie hängt nur von der Bestrahlungsstärke S und der Albedo A ab, nicht von der Größe des Planeten.

Beispiel 1

Erde: $S = 1361\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2}}$, $A = 0{,}306$.

$$T = \sqrt[4]{\frac{1361\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2}} \cdot 0{,}694}{4 \cdot 5{,}67 \cdot 10^{-8}\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2 K^4}}}} = \sqrt[4]{4{,}16 \cdot 10^{9}\,\mathrm{K^4}} \approx 254\ \mathrm{K} \approx -19\ ^\circ\mathrm{C}\ .$$

Ohne Lufthülle wäre die Erde im Mittel tiefgefroren. Tatsächlich beträgt die mittlere Oberflächentemperatur etwa 288 K, also 15 °C.

Typischer Fehler

Falsch: Ein Planet, der näher an der Sonne steht, ist immer wärmer.

Richtig: Die Gleichgewichtstemperatur hängt auch von der Albedo ab, die tatsächliche Temperatur zusätzlich von der Atmosphäre.

Die Venus bekommt fast doppelt so viel Sonnenstrahlung wie die Erde, wirft aber 77 % davon zurück. Ihre Gleichgewichtstemperatur ist deshalb **niedriger** als die der Erde – gemessen werden trotzdem 737 K (nächster Abschnitt und Kapitel 2).

1.4 Venus, Erde und Mars im Modell

IMP 9 Wahlfach Astronomie

Mit den Werten der NASA lässt sich die Gleichgewichtstemperatur der drei Nachbarn ausrechnen und mit den gemessenen Mittelwerten vergleichen (Tabelle 36).

Planet	Abstand	S in $\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2}}$	Albedo	T berechnet	T gemessen	Differenz
Venus	0,723 AE	2600	0,77	227 K	737 K	+510 K
Erde	1,000 AE	1361	0,306	254 K	288 K	+34 K
Mars	1,524 AE	586	0,25	210 K	210 K	≈ 0 K

Tabelle 36: Gleichgewichtstemperatur ohne Treibhauseffekt und gemessene mittlere Oberflächentemperatur (Werte: NASA Planetary Fact Sheet, gerundet).

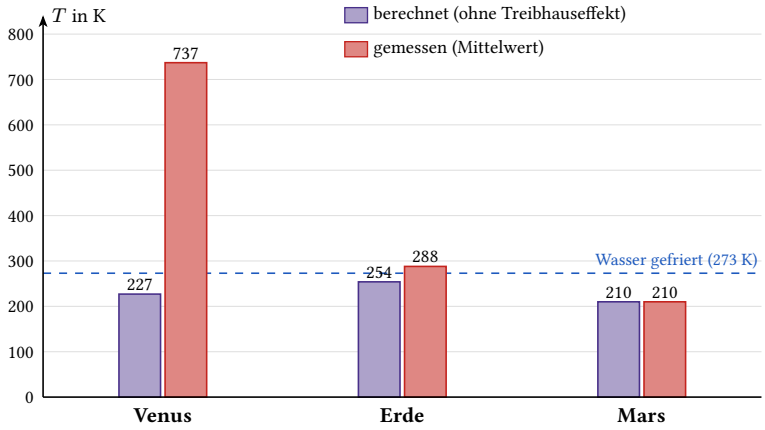


Abbildung 103: Berechnete Gleichgewichtstemperatur und gemessene mittlere Oberflächentemperatur von Venus, Erde und Mars.

Das einfache Modell passt beim Mars, liegt bei der Erde um 34 K zu tief und versagt bei der Venus völlig. Was fehlt, ist die Atmosphäre: Die Venus hat eine sehr dichte Lufthülle, die Erde eine mittlere, der Mars fast keine. Wie die Atmosphäre den Boden wärmt, zeigt Kapitel 2.

1.5 Die Strahlungsbilanz der Erde

IMP 9

Genaue Messungen von Satelliten und Bodenstationen zeigen, wie sich die $340\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$ im Mittel aufteilen (Abbildung 104). Etwa 100 werden von Wolken, Luft und Boden zurückgeworfen, das ergibt die Albedo $\frac{100}{340} \approx 0{,}29$. Etwa 240 werden aufgenommen und als Wärmestrahlung wieder ins All abgegeben. Bemerkenswert ist der Boden: Er strahlt rund $400\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$ ab, mehr als die ganze Sonnenstrahlung, die oben ankommt. Möglich ist das, weil die Atmosphäre ihm zusätzlich etwa $340\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$ Wärmestrahlung zurückschickt, die **Gegenstrahlung**.

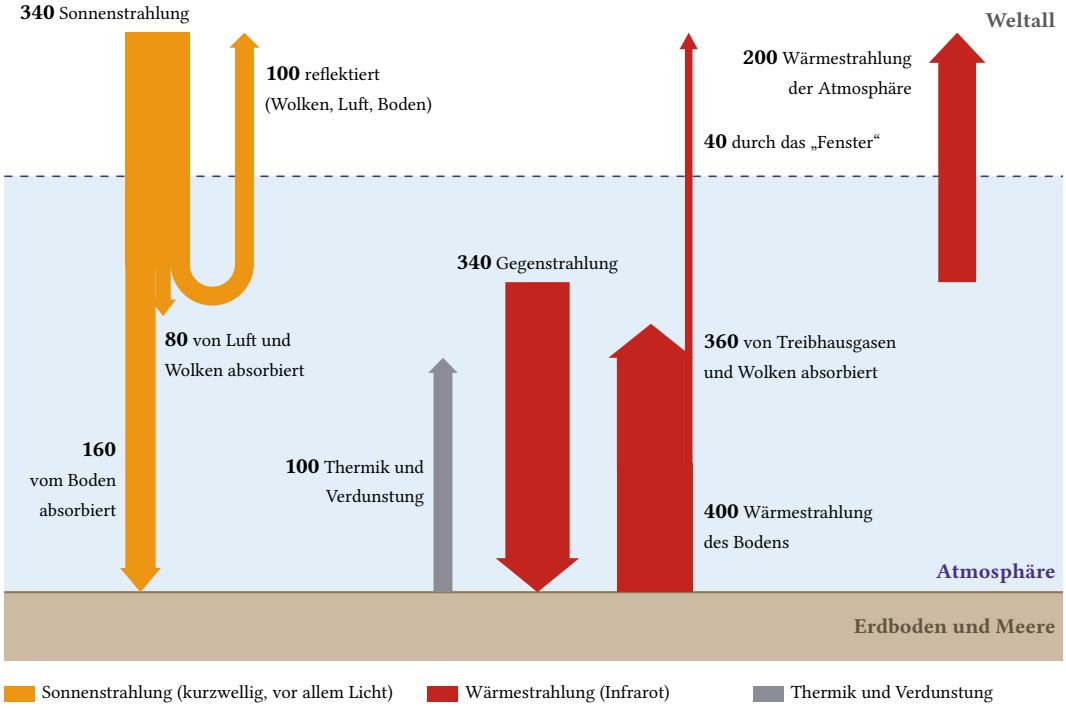


Abbildung 104: Strahlungsbilanz der Erde, global und über das Jahr gemittelt, in $\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$ (gerundet nach IPCC 2021). Die Breite der Pfeile entspricht dem Wert. In jeder Schicht – Weltall, Atmosphäre, Boden – gleichen sich Zufluss und Abfluss aus.

Ein kleines Ungleichgewicht

In der Abbildung geht jede Bilanz glatt auf. Gemessen wird aber, dass die Erde zurzeit rund $0{,}7\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$ mehr aufnimmt, als sie abstrahlt (IPCC 2021). Diese Energie erwärmt vor allem die Ozeane. Der Grund ist der zusätzliche Treibhauseffekt durch den Menschen (Kapitel 2).

Fachbegriffe: Infrarotstrahlung · Ultraviolettstrahlung · Wiensches Verschiebungsgesetz · Bestrahlungsstärke · Solarkonstante · Strahlungsgleichgewicht · Albedo · Stefan-Boltzmann-Gesetz · Gleichgewichtstemperatur · Gegenstrahlung

Üben: **noctua ↗** Ausprobieren: **Elektromagnetisches Spektrum ↗** · **Farbe und Temperatur ↗** · **Die habitable Zone ↗**



2 Treibhauseffekt bei Venus, Erde und Mars

2.1 Wie der Treibhauseffekt wirkt

IMP 9

Ein Auto, das in der Sonne steht, heizt sich innen stark auf: Licht kommt durch die Scheiben herein und erwärmt die Sitze, die warme Luft kann aber nicht entweichen. Die Erdatmosphäre wirkt ähnlich, nur auf andere Weise: Sie hält nicht die warme Luft fest, sondern einen Teil der Wärmestrahlung.

Die Hauptbestandteile der Luft, Stickstoff (N_2, 78 %) und Sauerstoff (O_2, 21 %), lassen sowohl Sonnenlicht als auch Wärmestrahlung fast ungehindert durch. Einige Gase in kleinen Mengen dagegen sind für Licht durchsichtig, verschlucken aber Infrarotstrahlung: Wasserdampf (H_2O), Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4), Lachgas (N_2O) und Ozon (O_3). Ihre Moleküle bestehen aus drei oder mehr Atomen oder aus zwei verschiedenen Atomen und können durch Infrarotstrahlung zum Schwingen angeregt werden. Man nennt sie **Treibhausgase**.

Merksatz

Treibhauseffekt

a) Sonnenlicht geht fast ungehindert durch die Atmosphäre und erwärmt den Boden.
b) Der warme Boden strahlt Wärmestrahlung (Infrarot) ab.
c) Treibhausgase und Wolken verschlucken einen großen Teil davon und erwärmen sich.
d) Sie strahlen selbst Wärmestrahlung ab, in alle Richtungen, also auch zurück zum Boden (Gegenstrahlung).
e) Der Boden bekommt dadurch mehr Energie als nur von der Sonne und wird wärmer, bis er wieder so viel abstrahlt, wie er aufnimmt.

Der **natürliche Treibhauseffekt** hebt die mittlere Temperatur der Erde von 254 K auf 288 K, also um gut 30 K. Ohne ihn gäbe es kein flüssiges Wasser an der Oberfläche und vermutlich kein Leben, wie wir es kennen. Seit Beginn der Industrialisierung steigt der Anteil der Treibhausgase durch das Verbrennen von Kohle, Öl und Gas und durch die Landwirtschaft; Kohlendioxid etwa von rund 280 ppm (Teilchen je Million Teilchen Luft) vor 1750 auf über 420 ppm heute. Das verstärkt den Treibhauseffekt: der **anthropogene** (vom Menschen gemachte) **Treibhauseffekt**.

Typischer Fehler

Falsch: Der Treibhauseffekt entsteht durch das Ozonloch: Durch das Loch kommt mehr Sonnenstrahlung herein.

Richtig: Das Ozonloch lässt mehr **UV-Strahlung** durch, die für Lebewesen schädlich ist, aber kaum Energie mitbringt. Der Treibhauseffekt beruht darauf, dass Gase die **Wärmestrahlung** des Bodens verschlucken und teilweise zurückstrahlen.

Beides sind Umweltprobleme der Atmosphäre, aber verschiedene. Die Ozonschicht erholt sich langsam, seit die verursachenden Gase (FCKW) verboten sind.

2.2 Ein einfaches Schichtmodell

IMP 9

Wie stark der Treibhauseffekt wärmen kann, zeigt ein bewusst einfaches **Modell**: Die ganze Atmosphäre wird durch eine einzige dünne Luftschicht ersetzt, die Sonnenlicht vollständig durchlässt und Wärmestrahlung vollständig verschluckt (Abbildung 105). Die Schicht hat die Temperatur T_L und strahlt nach oben und nach unten je σT_L^4 ab.

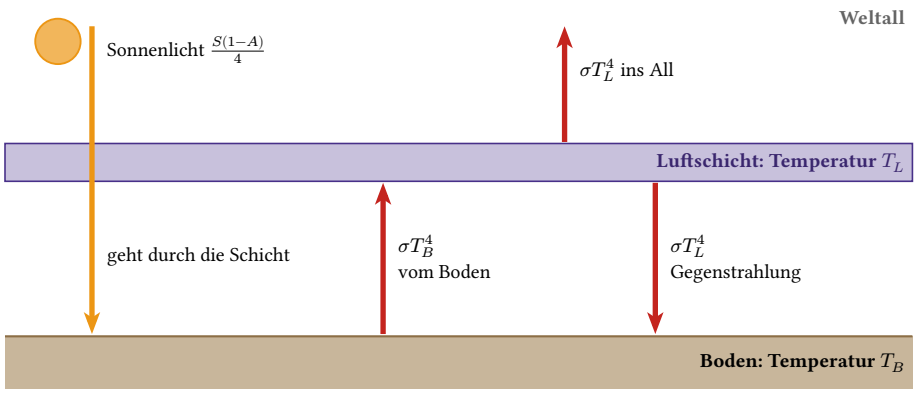


Abbildung 105: Schichtmodell des Treibhauseffekts (Modell, alle Werte je Quadratmeter und im Mittel über die Planetenoberfläche). Die Schicht ist für Sonnenlicht durchsichtig und für Wärmestrahlung undurchsichtig.

Im Gleichgewicht muss jede Bilanz aufgehen. Mit der Abkürzung $\sigma T_e^4 = \frac{S(1-A)}{4}$ (T_e: Gleichgewichtstemperatur aus Kapitel 1) gilt:

- **Oberrand:** Ins All geht nur die Strahlung der Schicht. $\sigma T_L^4 = \sigma T_e^4$, also $T_L = T_e$.
- **Schicht:** Sie nimmt die Strahlung des Bodens auf und gibt nach oben und unten je σT_L^4 ab: $\sigma T_B^4 = 2\sigma T_L^4$.
- Daraus folgt $T_B = \sqrt[4]{2} \cdot T_e \approx 1{,}19 \cdot T_e$.

Für die Erde ergibt das $T_B \approx 1{,}19 \cdot 254\ \text{K} \approx 302\ \text{K}$ – jetzt 14 K **zu warm**. Das liegt an der Annahme, die Schicht verschlucke **alle** Wärmestrahlung. In Wirklichkeit entweicht ein Teil durch das „Fenster“ zwischen etwa 8 und 13 µm (Abbildung 100). Lässt man die Schicht nur den Anteil ε (zwischen 0 und 1) der Bodenstrahlung verschlucken – und, wie es für Strahler gilt, auch nur den Anteil ε selbst abstrahlen –, ergibt die gleiche Rechnung

$$T_B = T_e \cdot \sqrt[4]{\frac{2}{2-\varepsilon}}.$$

Für $\varepsilon = 0$ (keine Treibhausgase) ist $T_B = T_e$, für $\varepsilon = 1$ wieder $T_B = \sqrt[4]{2} \cdot T_e$. Mit $\varepsilon \approx 0{,}79$ kommen genau die gemessenen 288 K heraus.

Merksatz

Schichtmodell (Modell, nicht die echte Atmosphäre):

- Eine undurchsichtige Schicht: $T_B = \sqrt[4]{2} \cdot T_e$. Mit n übereinanderliegenden undurchsichtigen Schichten: $T_B = \sqrt[4]{n+1} \cdot T_e$.
- Eine Schicht, die den Anteil ε der Wärmestrahlung verschluckt: $T_B = T_e \cdot \sqrt[4]{\frac{2}{2-\varepsilon}}$.
- Je mehr Treibhausgase, desto größer ε bzw. n, desto wärmer der Boden.

Das Modell erklärt den Kern des Treibhauseffekts. Es lässt aber vieles weg: Wolken, die Licht zurückwerfen und Wärme zurückhalten, den Wärmetransport durch Wind und Verdunstung, die Abnahme der Temperatur mit der Höhe und vor allem, dass sich Wasserdampf und Eis ändern, wenn sich die Temperatur ändert. Für Vorhersagen braucht man deshalb Klimamodelle (letzter Abschnitt des Kapitels).

2.3 Drei Nachbarn im Vergleich

IMP 9 | Wahlfach Astronomie

Die drei Gesteinsplaneten sind ungefähr zur selben Zeit aus demselben Material entstanden. Ihre Atmosphären haben sich aber völlig verschieden entwickelt (Tabelle 37).

	Venus	Erde	Mars
Radius	6052 km	6371 km	3390 km
Druck am Boden	92 bar	1 bar	0,006 bar
Hauptgase	96,5 % CO_2, 3,5 % N_2	78 % N_2, 21 % O_2, 0,04 % CO_2	95 % CO_2, 2,6 % N_2, 1,9 % Ar
Wolken	geschlossen, aus Schwefelsäure	wechselnd, aus Wasser und Eis	selten, dünn
mittlere Temperatur	737 K (464 °C)	288 K (15 °C)	210 K (−63 °C)
Treibhauseffekt	rund 500 K	gut 30 K	wenige K

Tabelle 37: Atmosphären der Gesteinsplaneten (gerundet, NASA Planetary Fact Sheet).

Venus. Auf jedem Quadratmeter Boden lastet rund hundertmal so viel Gas wie auf der Erde, fast nur Kohlendioxid. Für Wärmestrahlung ist diese Lufthülle praktisch undurchsichtig: Im Schichtmodell bräuchte man etwa hundert undurchsichtige Schichten übereinander, um von 227 K auf 737 K zu kommen. Am Boden ist es heißer als auf dem sonnennäheren Merkur, und zwar Tag und Nacht, am Äquator wie an den Polen. Vermutlich war die junge Venus wasserreicher. Als die Sonne heller wurde, verdampfte das Wasser; Wasserdampf ist selbst ein Treibhausgas, die Temperatur stieg weiter, und immer mehr Wasser verdampfte – ein **galoppierender Treibhauseffekt**. Im oberen Teil der Atmosphäre spaltete UV-Strahlung die Wassermoleküle, der leichte Wasserstoff entwich ins All. Ein Hinweis darauf: Das Verhältnis von schwerem zu normalem Wasserstoff ist auf der Venus über hundertmal so groß wie auf der Erde.

Mars. Die Marsluft besteht zwar auch fast nur aus Kohlendioxid, ist aber über hundertmal dünner als die Erdluft. Der Treibhauseffekt bringt deshalb nur wenige Kelvin. Ausgetrocknete Flusstäler, Deltas und Mineralien, die sich nur in Wasser bilden, zeigen, dass vor über drei Milliarden Jahren Wasser auf dem Mars floss; die Atmosphäre muss damals dichter gewesen sein. Der kleine Mars verlor sein globales Magnetfeld früh, und der Sonnenwind trug einen großen Teil der Atmosphäre ab. Heute schwankt die Temperatur zwischen etwa −150 °C an den Polen im Winter und gut +20 °C am Äquator zur Mittagszeit im Sommer; bei dem geringen Druck verdampft flüssiges Wasser oder friert sofort.

Erde. Bei der Erde hält ein langsamer Kreislauf das Kohlendioxid in Grenzen: Regen löst es, es reagiert mit Gestein und lagert sich als Kalk am Meeresboden ab; Vulkane setzen es wieder frei. Wird es wärmer, verwittert mehr Gestein und es wird mehr Kohlendioxid gebunden; das bremst die Erwärmung – allerdings über Hunderttausende von Jahren, viel zu langsam für den heutigen Anstieg.

Merksatz

Venus, Erde und Mars bekommen ähnlich viel Sonnenstrahlung (bis auf einen Faktor 4). Die großen Unterschiede der Oberflächentemperatur entstehen vor allem durch den Treibhauseffekt: sehr stark bei der dichten CO_2-Atmosphäre der Venus, mittel bei der Erde, schwach bei der dünnen Marsatmosphäre.

Die Erde ist damit im Sonnensystem eine Ausnahme: der einzige bekannte Ort mit flüssigem Wasser an der Oberfläche und mit Leben – ein schützenswerter Lebensraum in einer sonst lebensfeindlichen Umgebung.

2.4 Die Temperatur in kleinen Schritten simulieren

IMP 9

Bisher wurde nur das Gleichgewicht berechnet. Wie stellt es sich ein, und wie lange dauert das? Das zeigt eine kleine **Simulation** mit der Methode der kleinen Schritte. Man denkt sich die Erdoberfläche als eine Wasserschicht von etwa 70 m Tiefe (so tief durchmischt der Wind die Ozeane); je Quadratmeter braucht sie für 1 K Erwärmung die Energie $C \approx 2{,}9 \cdot 10^8 \,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m^2\,K}}$.

In jedem Zeitschritt Δt rechnet man:

a) aufgenommene Leistung je Quadratmeter: $P_{\mathrm{auf}} = \frac{S(1-A)}{4} \approx 236 \,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2}}$;

b) abgegebene Leistung je Quadratmeter: $P_{\mathrm{ab}} = \left(1 - \frac{\varepsilon}{2}\right) \cdot \sigma T^4$ (Schichtmodell mit $\varepsilon = 0{,}79$);

c) Temperaturänderung: $\Delta T = \frac{(P_{\mathrm{auf}} - P_{\mathrm{ab}}) \cdot \Delta t}{C}$;

d) neue Temperatur: $T_{\mathrm{neu}} = T + \Delta T$, dann wieder von vorn.

Mit einer Tabellenkalkulation oder einem kurzen Programm ist das schnell erledigt (Abbildung 106).

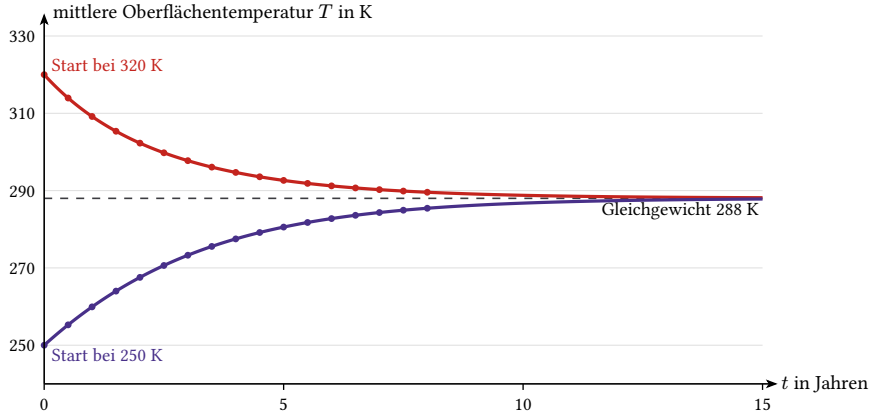


Abbildung 106: Simulation der mittleren Oberflächentemperatur mit der Methode der kleinen Schritte (Modell, Zeitschritt 0,05 Jahre; Punkte: jedes halbe Jahr). Egal, ob die Erde zu kalt oder zu warm startet, sie läuft in wenigen Jahren auf das Gleichgewicht bei 288 K zu.

Beispiel 2

Erster Schritt mit $\Delta t = 1\ \text{a} = 3{,}156 \cdot 10^7\ \text{s}$ und $T = 250\ \text{K}$: $P_{\text{ab}} = 0{,}605 \cdot 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot 250^4\,\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \approx 134\,\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. Die Erde nimmt also $236 - 134 = 102\,\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ mehr auf, als sie abgibt:

$$\Delta T = \frac{102\,\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 3{,}156 \cdot 10^7\ \text{s}}{2{,}9 \cdot 10^8\,\frac{\text{J}}{\text{m}^2\ \text{K}}} \approx 11\ \text{K}\ .$$

Nach einem Jahr ist $T \approx 261\ \text{K}$. Je näher T dem Gleichgewicht kommt, desto kleiner werden die Schritte.

Die Simulation zeigt, was die Gleichgewichtsrechnung nicht zeigen kann: Das Klima reagiert **verzögert**. Ändert man ε, weil mehr Treibhausgase in der Luft sind, wandert das Gleichgewicht, und die Temperatur folgt mit einigen Jahren Verzögerung; die tiefen Ozeane, die hier fehlen, verlängern das in Wirklichkeit auf Jahrzehnte bis Jahrhunderte.

2.5 Klimasimulationen und Szenarien

IMP 9

Echte **Klimamodelle** arbeiten nach demselben Prinzip, nur viel genauer: Sie teilen Atmosphäre, Ozeane, Eis und Land in Millionen Zellen von grob 100 km Kantenlänge und einigen Dutzend Schichten ein. Für jede Zelle berechnen sie in Zeitschritten von Minuten bis etwa einer halben Stunde aus den Gesetzen der Physik, wie sich Temperatur, Wind, Feuchte, Wolken und Meeresströmungen ändern. Geprüft werden sie, indem man das Klima der Vergangenheit nachrechnet und mit Messungen vergleicht.

Rückkopplungen. Erwärmt sich die Erde, ändern sich auch andere Größen und verstärken oder dämpfen die Erwärmung:

- Wärmere Luft nimmt mehr Wasserdampf auf, ein Treibhausgas: **verstärkend**.
- Eis und Schnee schmelzen, die dunklere Oberfläche verschluckt mehr Licht (Eis-Albedo-Rückkopplung): **verstärkend**.
- Ein wärmerer Körper strahlt nach Stefan-Boltzmann mehr ab: **dämpfend**.
- Wolken wirken in beide Richtungen; hier liegt die größte Unsicherheit der Modelle.

Wie stark sich die Erde erwärmt, wenn sich der Kohlendioxidanteil verdoppelt, heißt **Klimasensitivität**. Ohne Rückkopplungen wären es nur etwa 1 K (Aufgaben); mit ihnen liegt der beste Schätzwert bei 3 K, wahrscheinlich zwischen 2,5 K und 4 K (IPCC 2021).

Szenarien. Wie warm es im Jahr 2100 sein wird, hängt vor allem davon ab, wie viele Treibhausgase die Menschheit noch ausstößt – und das kann kein Physikmodell berechnen. Deshalb rechnen die Klimamodelle mehrere **Szenarien** durch: „Wenn-dann"-Annahmen über die Entwicklung von Bevölkerung, Wirtschaft, Energieversorgung und Klimapolitik. Der Weltklimarat (IPCC) verwendet im sechsten Sachstandsbericht (2021) fünf Hauptszenarien, benannt nach den „gemeinsamen sozioökonomischen Pfaden" (SSP); die Zahl dahinter ist die zusätzliche Strahlungsleistung im Jahr 2100 in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, mit der das Szenario rechnet.

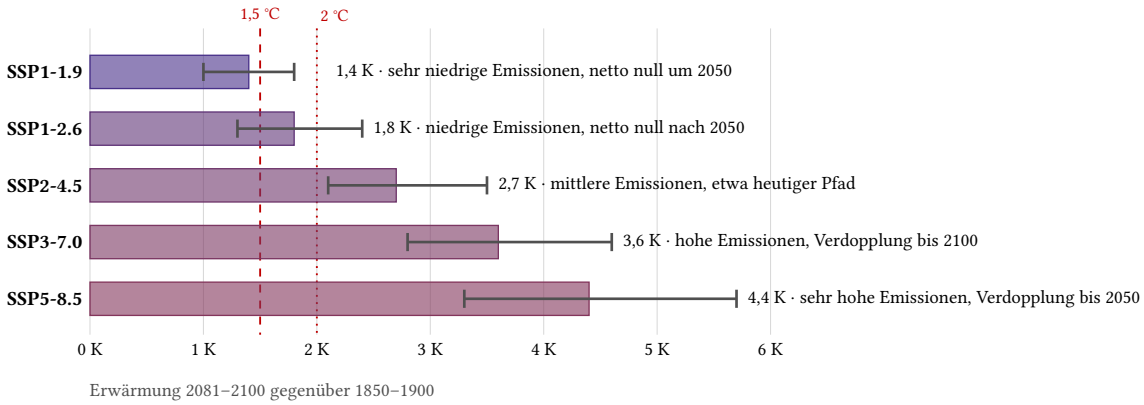


Abbildung 107: Erwärmung der Jahre 2081 bis 2100 gegenüber 1850 bis 1900 in den fünf Hauptszenarien des IPCC (2021): bester Schätzwert (Balken) und sehr wahrscheinlicher Bereich (Strich).

Merksatz

Was Klimasimulationen leisten und was nicht

- Sie liefern keine Vorhersage „der" Temperatur im Jahr 2100, sondern **Projektionen**: Für jedes Szenario eine Spanne.
- Die Spanne innerhalb eines Szenarios kommt von den Unsicherheiten der Modelle (vor allem Wolken und Klimasensitivität), der Unterschied **zwischen** den Szenarien von den Entscheidungen der Menschen.
- Bis etwa 2040 unterscheiden sich die Szenarien wenig, danach immer stärker: Was heute ausgestoßen wird, bestimmt das Klima der zweiten Jahrhunderthälfte.

Die Modelle lassen sich an der Wirklichkeit prüfen: Gemessen wurde für die Jahre 2011 bis 2020 eine Erwärmung um 1,1 K gegenüber 1850 bis 1900. Simulationen nur mit natürlichen Einflüssen (Sonne, Vulkane) zeigen fast keine Erwärmung; erst mit den Treibhausgasen des Menschen geben sie den gemessenen Verlauf wieder. Der IPCC schreibt deshalb, es sei eindeutig, dass der Mensch die Atmosphäre, die Ozeane und das Land erwärmt hat.

Typischer Fehler

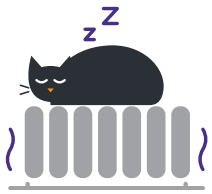
Falsch: Wenn die Modelle für 2100 eine Spanne von 1 K bis fast 6 K angeben, wissen die Forscher eigentlich gar nichts.

Richtig: Der größte Teil der Spanne kommt von den **verschiedenen Szenarien**, also davon, wie viel die Menschheit ausstößt. Für ein festes Szenario ist die Spanne viel kleiner.

Die Szenarien sind keine Unsicherheit der Physik, sondern Wahlmöglichkeiten.

Fachbegriffe: Treibhausgase · natürlicher Treibhauseffekt · anthropogener Treibhauseffekt · Modell · Schichtmodell · galoppierender Treibhauseffekt · Simulation · Klimamodell · Rückkopplung · Klimasensitivität · Szenario · Projektion

Üben: **noctua** ↗ Ausprobieren: **Einfaches Treibhausmodell** ↗ · **Absorption in der Atmosphäre** ↗ · **Infrarot-Absorption von CO_2** ↗ · **CO_2-Badewanne und Restbudget** ↗



3 Die habitable Zone

3.1 Was Leben braucht

Wahlfach Astronomie

Niemand weiß, wie Leben auf einem anderen Planeten aussehen könnte. Man geht deshalb vom einzigen bekannten Beispiel aus, dem Leben auf der Erde. Es braucht:

- **flüssiges Wasser** als Lösungsmittel, in dem chemische Reaktionen ablaufen;
- eine **Energiequelle**: Licht eines Sterns oder chemische Energie, etwa aus heißen Quellen am Meeresboden;
- die chemischen Elemente der Lebensbausteine, vor allem Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Sauerstoff, Phosphor und Schwefel;
- **Zeit** und einigermaßen stabile Bedingungen: Auf der Erde gibt es Spuren von Leben seit etwa 3,5 Milliarden Jahren, vielzellige Tiere aber erst seit rund 600 Millionen Jahren.

Von diesen Bedingungen lässt sich die erste aus der Ferne am besten abschätzen: Flüssiges Wasser gibt es nur in einem bestimmten Temperaturbereich, und die Temperatur hängt vom Abstand zum Stern ab.

3.2 Die stellare habitable Zone

IMP 9 Wahlfach Astronomie

Definition

Die **habitable Zone** (bewohnbare Zone, „Lebenszone“) eines Sterns ist der Abstandsbereich, in dem ein erdähnlicher Planet mit einer geeigneten Atmosphäre flüssiges Wasser an seiner Oberfläche haben könnte.

Innerer Rand. Ist der Planet zu nah am Stern, verdampft das Wasser, und ein galoppierender Treibhauseffekt wie bei der Venus setzt ein. **Äußerer Rand.** Ist er zu weit weg, friert das Wasser, und selbst eine dichte Kohlendioxid-Atmosphäre kann den Planeten nicht mehr warm halten. Für die Sonne liefern Klimamodelle grob 0,95 AE bis 1,7 AE; je nach Modell und Annahmen liegen die Grenzen auch etwas enger (etwa 0,95 bis 1,4 AE) oder weiter.

Andere Sterne. Wie hängt die habitable Zone von der Leuchtkraft L des Sterns ab? Die Gleichgewichtstemperatur hängt nur von der Bestrahlungsstärke $S = \frac{L}{4\pi a^2}$ ab. Ein Planet hat dieselbe Temperatur wie die Erde, wenn er dieselbe Bestrahlungsstärke bekommt:

$$\frac{L}{4\pi a^2} = \frac{L_\odot}{4\pi (1\ \mathrm{AE})^2} \quad \Longrightarrow \quad a = 1\ \mathrm{AE} \cdot \sqrt{\frac{L}{L_\odot}}.$$

Merksatz

Habitable Zone eines Sterns der Leuchtkraft L (grob):

$$a \approx 0{,}95\ \mathrm{AE} \cdot \sqrt{\frac{L}{L_\odot}} \quad \text{bis} \quad a \approx 1{,}7\ \mathrm{AE} \cdot \sqrt{\frac{L}{L_\odot}}.$$

Viermal so große Leuchtkraft: doppelter Abstand. Ein Hundertstel der Leuchtkraft: ein Zehntel des Abstands.

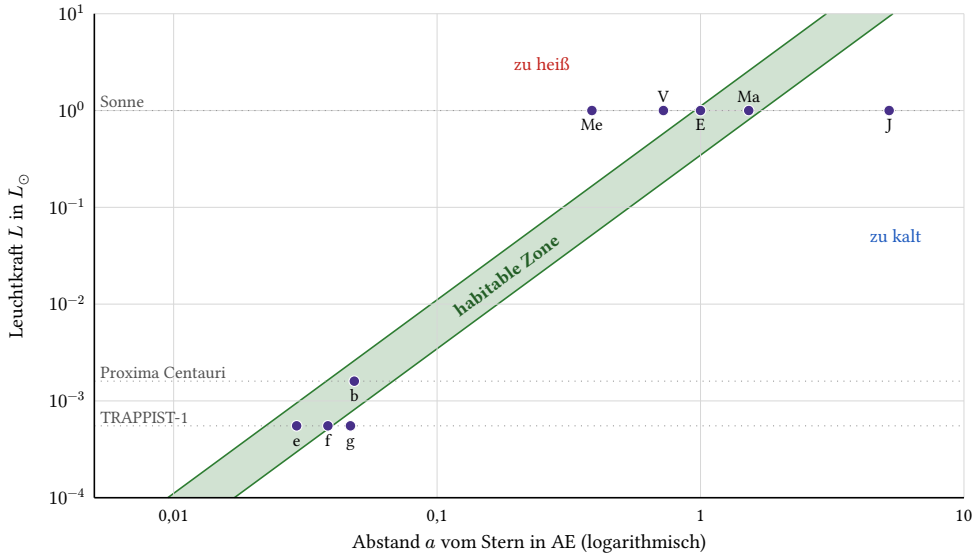


Abbildung 108: Habitable Zone (grün) für Sterne verschiedener Leuchtkraft, nach $a \sim \sqrt{L}$ mit den groben Grenzen 0,95 AE und 1,7 AE für die Sonne. Punkte: Me Merkur, V Venus, E Erde, Ma Mars, J Jupiter; b Proxima Centauri b; e, f, g Planeten von TRAPPIST-1.

Um leuchtschwache **Rote Zwerge** liegt die habitable Zone sehr nah am Stern. Proxima Centauri, der nächste Stern (4,2 Lj), hat nur etwa 0,16 % der Sonnenleuchtkraft; ihr 2016 entdeckter Planet Proxima b umläuft sie in 11,2 Tagen in nur 0,049 AE Abstand – und liegt damit in ihrer habitablen Zone. Der rote Zwerg TRAPPIST-1, 40 Lj entfernt, hat sieben etwa erdgroße Planeten; Planet e liegt mitten in der habitablen Zone, je nach Modell zählen auch f und g dazu.

Typischer Fehler

Falsch: Ein Planet in der habitablen Zone ist bewohnt oder zumindest bewohnbar.

Richtig: Die habitable Zone sagt nur, dass flüssiges Wasser **möglich** wäre, **wenn** der Planet eine passende Atmosphäre hat. Der Mars liegt nach den meisten Modellen in der habitablen Zone der Sonne und ist trotzdem eine kalte Wüste.

Die habitable Zone ist eine notwendige, keine hinreichende Bedingung.

3.3 Leben auf Venus und Mars?

IMP 9

Venus. Sie liegt innerhalb des inneren Randes der habitablen Zone. Bei 737 K, 92 bar und Wolken aus Schwefelsäure ist Leben an der Oberfläche ausgeschlossen. Spekuliert wurde über Mikroben in den Wolken in 50 bis 60 km Höhe, wo Druck und Temperatur erdähnlich sind. 2020 meldete eine Forschergruppe das Gas Phosphin in der Venusatmosphäre als möglichen Hinweis; spätere Auswertungen konnten den Fund nicht sicher bestätigen.

Mars. Er liegt in der habitablen Zone, ist aber zu klein, um eine dichte Atmosphäre zu halten. Heute ist die Oberfläche kalt, trocken, dem UV-Licht der Sonne und der kosmischen Strahlung ungeschützt ausgesetzt. Früher war der Mars feuchter und wärmer – vielleicht gab es damals einfaches Leben. Deshalb sucht der Rover Perseverance seit 2021 im Krater Jezero, einem ehemaligen Seebecken mit Flussdelta, nach Spuren und sammelt Gesteinsproben, die vielleicht später zur Erde gebracht werden. Ob es im Untergrund, wo Wasser als Eis vorhanden ist, heute Leben gibt, ist offen.

Eismonde. Interessant sind auch Orte weit außerhalb der habitablen Zone: Die Jupitermonde Europa und Ganymed und der Saturnmond Enceladus haben unter ihrer Eiskruste vermutlich Ozeane aus flüssigem Wasser, erwärmt durch Gezeitenkräfte ihres Planeten. Aus Spalten am Südpol von Enceladus schießen Fontänen aus Wasserdampf und Eis, durch die die Raumsonde Cassini geflogen ist. Die habitable Zone im engen Sinn erfasst solche Orte nicht.

3.4 Mehr als der richtige Abstand

Wahlfach Astronomie

Ob auf einem Planeten in der habitablen Zone tatsächlich Leben entstehen und sich halten kann, hängt von vielen weiteren Bedingungen ab, die alle gleichzeitig erfüllt sein müssen:

- **Lebensdauer des Sterns.** Massereiche Sterne leben nur kurz: ein Stern mit doppelter Sonnenmasse etwa 1 bis 2 Milliarden Jahre, einer mit zehnfacher Sonnenmasse nur einige zehn Millionen Jahre (Skript AS9). Auf der Erde hat es Milliarden Jahre gedauert, bis komplexes Leben entstand.
- **Sternaktivität.** Rote Zwerge leben sehr lange, sind aber oft aktiv: Starke Strahlungsausbrüche (Flares) können die Atmosphäre eines nahen Planeten abtragen. Außerdem dreht sich ein so naher Planet durch die Gezeiten meist **gebunden**: Er wendet dem Stern immer dieselbe Seite zu, wie der Mond der Erde. Eine Seite ist dann ständig hell, die andere ständig dunkel.
- **Masse des Planeten.** Ist er zu klein, entweicht die Atmosphäre (Mars); ist er zu groß, hält er Wasserstoff und Helium fest und wird zum Gasplaneten.
- **Magnetfeld und Plattentektonik.** Ein Magnetfeld schützt die Atmosphäre vor dem Sternwind. Plattentektonik und Vulkanismus halten den Kohlenstoffkreislauf in Gang, der das Klima der Erde über Jahrmillionen stabilisiert hat.
- **Stabilität über die Zeit.** Sterne werden im Lauf ihres Lebens heller; die Sonne leuchtete vor 4,6 Milliarden Jahren nur mit etwa 70 % ihrer heutigen Leuchtkraft. Die habitable Zone wandert deshalb langsam nach außen. Nach Modellrechnungen wird es auf der Erde in grob einer Milliarde Jahren zu heiß für flüssige Ozeane.

3.5 Die galaktische habitable Zone

Wahlfach Astronomie

Auch der Ort in der Milchstraße spielt eine Rolle. Die schweren Elemente, aus denen Gesteinsplaneten und Lebewesen bestehen, sind in früheren Sterngenerationen entstanden (Skript AS9). Im Außenbereich der Milchstraße gibt es davon wenig; dort bilden sich vermutlich seltener erdähnliche Planeten. Im dichten Innenbereich explodieren dagegen häufiger Supernovae in der Nähe, deren Strahlung die Ozonschicht eines Planeten zerstören könnte, und nahe vorbeiziehende Sterne stören die Bahnen der Planeten und Kometen.

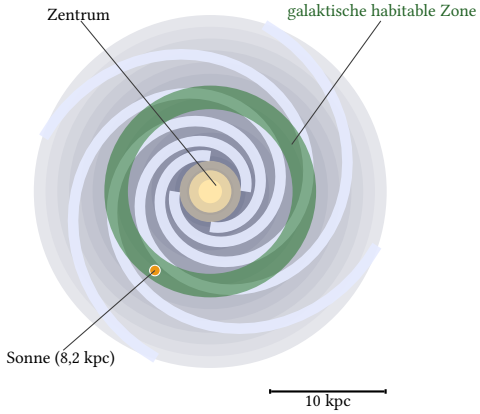


Abbildung 109: Galaktische habitable Zone der Milchstraße (schematisch, Draufsicht) nach einem Modell von 2004.

Definition

Die **galaktische habitable Zone** ist der Bereich einer Galaxie, in dem genug schwere Elemente für Gesteinsplaneten vorhanden sind und tödliche Ereignisse wie nahe Supernovae selten genug sind, damit sich komplexes Leben entwickeln kann.

Ein bekanntes Modell (Lineweaver und Kollegen, 2004) sieht sie als Ring etwa 7 bis 9 kpc vom Zentrum – dort, wo auch die Sonne steht (8,2 kpc). Die Grenzen sind sehr unsicher und umstritten; manche Forscher halten fast die ganze Scheibe für geeignet.

Fachbegriffe: habitable Zone · Roter Zwerg · gebundene Rotation · Lebensdauer des Sterns · Sternaktivität · Eismond · galaktische habitable Zone

Üben: **noctua** ↗ Ausprobieren: **Die habitable Zone** ↗



4 Wie Planetensysteme entstehen

4.1 Hinweise aus dem Sonnensystem

Wahlfach Astronomie

Das Sonnensystem ist erstaunlich ordentlich gebaut:

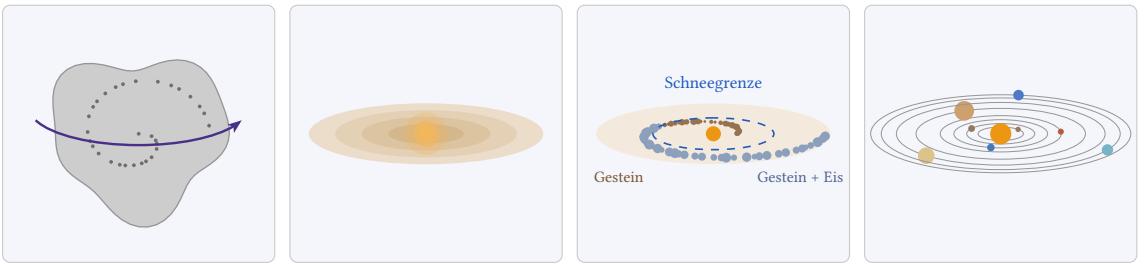
- Alle Planeten umlaufen die Sonne in derselben Richtung, in der sich auch die Sonne dreht.
- Ihre Bahnen liegen fast in einer Ebene und sind fast kreisförmig.
- Innen kreisen kleine Gesteinsplaneten, außen große Gas- und Eisplaneten.
- Die ältesten Meteoriten sind rund 4,6 Milliarden Jahre alt, praktisch so alt wie die Sonne.

Schon Immanuel Kant (1755) und Pierre-Simon Laplace (1796) schlossen daraus, dass Sonne und Planeten gemeinsam aus einer sich drehenden Wolke entstanden sind (**Nebularhypothese**). Heute lässt sich die Entstehung bei jungen Sternen direkt beobachten.

4.2 Von der Wolke zur Scheibe

Wahlfach Astronomie

Sterne entstehen in kalten Wolken aus Gas und Staub, wenn ein dichter Bereich unter seiner eigenen Schwerkraft zusammenstürzt (Skript AS9). Jede solche Wolke dreht sich ein wenig. Beim Zusammenziehen dreht sie sich immer schneller – wie eine Eiskunstläuferin, die bei einer Pirouette die Arme anzieht (Erhaltung des **Drehimpulses**). Senkrecht zur Drehachse kann das Gas nicht beliebig nah an die Mitte fallen, entlang der Achse schon. So entsteht um den jungen Stern eine flache, rotierende Scheibe aus Gas und Staub, die **protoplanetare Scheibe** (Abbildung 110).



1 · Eine Gaswolke zieht sich zusammen und dreht sich schneller

2 · Junger Stern mit protoplanetarer Scheibe

3 · Staub verklumpt zu Planetesimalen

4 · Planetensystem: innen Gesteins-, außen Gasplaneten

Abbildung 110: Entstehung eines Planetensystems (schematisch, nicht maßstäblich). Die Schneegrenze trennt den warmen inneren Bereich, in dem nur Gestein und Metall fest sind, vom kalten äußeren, in dem auch Wassereis fest ist.

Mit Radioteleskopen wie ALMA in Chile sieht man solche Scheiben um junge Sterne, oft mit dunklen Ringen und Lücken, in denen vermutlich Planeten entstehen; bei dem jungen Stern PDS 70 wurden zwei solche entstehenden Planeten sogar direkt abgebildet. Das Hubble-Weltraumteleskop zeigte im Orionnebel zahlreiche Scheiben um junge Sterne als dunkle Schatten vor dem leuchtenden Gas.

4.3 Vom Staub zum Planeten

Wahlfach Astronomie

In der Scheibe stoßen die winzigen Staubkörner (Bruchteile eines Millimeters) zusammen und bleiben aneinander haften, ähnlich wie Staubflocken unter einem Schrank. Durch diese **Verklumpung** wachsen sie zu Körnern, Kieseln und Brocken. Wie aus metergroßen Brocken kilometergroße Körper werden, ist noch nicht ganz verstanden; vermutlich sammeln Wirbel im Gas viele Kiesel an einer Stelle, die dann unter ihrer eigenen Schwerkraft zusammenstürzen.

Merksatz

Vom Staub zum Planeten

a) Staubkörner verklumpen zu Kieseln und Brocken.
b) Daraus entstehen kilometergroße **Planetesimale** („Planetenbausteine“).
c) Ab dieser Größe zieht die Schwerkraft weitere Planetesimale an: Die größten wachsen am schnellsten zu mond- bis marsgroßen **Protoplaneten**.
d) Protoplaneten stoßen zusammen und verschmelzen zu Planeten. Ein solcher Riesenzusammenstoß hat vermutlich auch den Erdmond hervorgebracht.

Übrig gebliebene Planetesimale gibt es noch heute: Asteroiden, Kometen und die Körper des Kuipergürtels (Skript AS3). Ihre Krater auf Mond, Merkur und Mars erzählen von der Zeit, als noch viele solche Körper unterwegs waren.

4.4 Die Schneegrenze: Gesteins- und Gasplaneten

Wahlfach Astronomie

Nah am jungen Stern ist es in der Scheibe heiß. Fest bleiben dort nur Stoffe mit hohem Schmelzpunkt: Gestein und Metalle. Weiter draußen, jenseits der **Schneegrenze** (beim jungen Sonnensystem grob 3 AE), ist es so kalt, dass auch Wasser, Methan und Ammoniak zu Eis gefrieren. Dort steht viel mehr festes Material zur Verfügung.

Deshalb wachsen jenseits der Schneegrenze schnell große Kerne. Hat ein Kern etwa zehn Erdmassen erreicht, zieht er das umgebende Gas (vor allem Wasserstoff und Helium) an und wächst rasant zu einem **Gasplaneten** wie Jupiter und Saturn. Das muss schnell gehen: Nach einigen Millionen Jahren hat der junge Stern das restliche Gas der Scheibe weggeblasen. Innen entstanden aus dem wenigen Gestein nur kleine **Gesteinsplaneten**, ohne Gashülle aus Wasserstoff; ihr Wachstum dauerte bis zu etwa hundert Millionen Jahre.

Typischer Fehler

Falsch: Die Planeten wurden von der Sonne abgespalten oder später eingefangen.
Richtig: Sonne und Planeten entstanden gemeinsam aus derselben rotierenden Wolke; die Planeten bildeten sich in der Scheibe um die junge Sonne.

Dafür sprechen die gemeinsame Drehrichtung, die gemeinsame Bahnebene und das gleiche Alter von Sonne und Meteoriten.

4.5 Andere Systeme sind anders

Wahlfach Astronomie

Lange kannte man nur ein Planetensystem und hielt seinen Aufbau für den Normalfall. Die Exoplaneten (Kapitel 5) zeigten eine viel größere Vielfalt:

- **Heiße Jupiter:** Gasriesen, die ihren Stern in wenigen Tagen umkreisen, viel näher als Merkur die Sonne. Dort, so nah am Stern, können sie nicht entstanden sein. Man erklärt sie durch **Wanderung** (Migration): Die Wechselwirkung mit dem Gas der Scheibe hat sie nach innen gezogen.
- **Supererden und Mini-Neptune:** Planeten zwischen Erd- und Neptungröße sind nach heutigem Wissen die häufigsten – im Sonnensystem gibt es keinen einzigen.
- Planeten auf stark elliptischen Bahnen, Planeten um Doppelsterne, Systeme mit vielen dicht gepackten Planeten wie TRAPPIST-1.

Merksatz

Planetensysteme entstehen als Nebenprodukt der Sternentstehung. Sterne mit Planeten sind nicht die Ausnahme, sondern die Regel: Nach den Statistiken der Exoplanetensuche hat die Mehrzahl der Sterne Planeten.

Fachbegriffe: Nebularhypothese · Drehimpuls · protoplanetare Scheibe · Verklumpung · Planetesimal · Protoplanet · Schneegrenze · Gasplanet · Gesteinsplanet · heißer Jupiter · Migration

Üben: **noctua** ↗



5 Exoplaneten finden

5.1 Warum Exoplaneten schwer zu sehen sind

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Planeten anderer Sterne heißen **Exoplaneten** (extrasolare Planeten). Sie zu finden ist schwierig: Ein Planet leuchtet nicht selbst, sondern wirft nur ein wenig Sternlicht zurück. Die Erde ist im sichtbaren Licht etwa zehn Milliarden Mal lichtschwächer als die Sonne. Und von weit weg gesehen steht der Planet winzig nah neben seinem Stern: Aus 10 pc Entfernung erscheint der Abstand Erde–Sonne unter einem Winkel von nur $0{,}1''$.

Lange war deshalb unklar, ob andere Sterne überhaupt Planeten haben. 1992 fand man Planeten um einen Pulsar, einen Sternrest. 1995 entdeckten Michel Mayor und Didier Queloz den ersten Planeten um einen sonnenähnlichen Stern, 51 Pegasi b – einen Gasriesen, der seinen Stern in nur 4,2 Tagen umrundet (Nobelpreis 2019). Inzwischen sind über 6000 Exoplaneten bestätigt (Stand 2026, NASA Exoplanet Archive). Fast alle wurden **indirekt** gefunden: Man sieht nicht den Planeten, sondern seine Wirkung auf den Stern.

5.2 Die Transitmethode

IMP 10 | Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Liegt die Bahn eines Planeten so, dass wir genau auf ihre Kante blicken, zieht er bei jedem Umlauf vor seinem Stern vorbei – ein **Transit**. Dabei deckt er einen kleinen Teil der Sternscheibe ab, und die gemessene Helligkeit sinkt für einige Stunden ein wenig (Abbildung 111). Im Sonnensystem kann man das bei Merkur und Venus beobachten, die gelegentlich vor der Sonne vorbeiziehen.

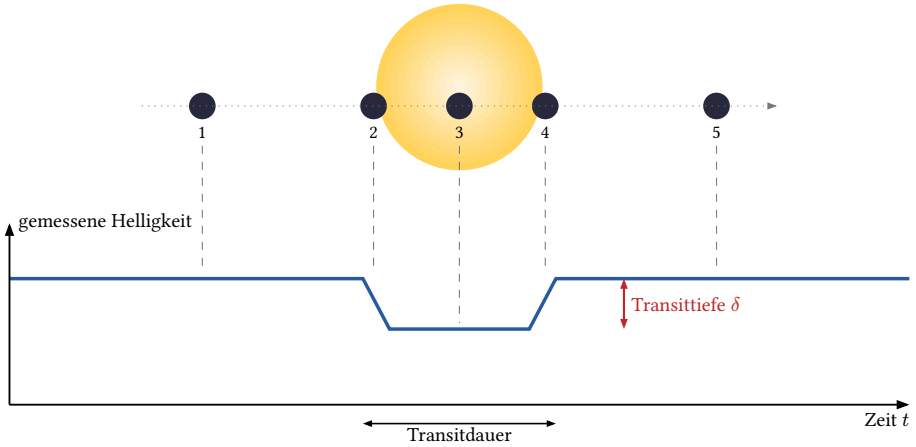


Abbildung 111: Transit: Der Planet (1 bis 5) zieht vor dem Stern vorbei. Solange er vor der Sternscheibe steht (2 bis 4), ist die gemessene Helligkeit um die Transittiefe δ kleiner. Nicht maßstäblich.

Die abgedeckte Fläche verhält sich zur Sternscheibe wie die Kreisflächen πR_P^2 und πR_S^2 (Planet und Stern). So viel Licht fehlt:

Merksatz

Transittiefe:

$$\delta = \frac{\Delta E}{E} = \left(\frac{R_P}{R_S}\right)^2 \quad \Longleftrightarrow \quad R_P = R_S \cdot \sqrt{\delta}.$$

Kennt man den Sternradius (aus Leuchtkraft und Temperatur, Skript AS8), liefert die Transittiefe den Planetenradius.

Ein Jupiter vor der Sonne verdunkelt sie um etwa 1 %, eine Erde nur um 0,008 % – als ob eine Mücke vor einem Autoscheinwerfer vorbeifliegt. Solche Helligkeitsänderungen misst man nur vom Weltraum aus zuverlässig: mit den Satelliten **Kepler** (2009–2018) und **TESS** (seit 2018); die europäische Mission **PLATO** soll gezielt nach erdähnlichen Planeten um sonnenähnliche Sterne suchen.

Mehr verrät die Lichtkurve noch:

- Der Abstand zweier Transits ist die **Umlaufzeit** T des Planeten. Mit dem dritten Keplerschen Gesetz $\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM_S}$ (Skript AS5) folgt der **Bahnradius** $a = \sqrt[3]{\frac{GM_S T^2}{4\pi^2}}$. Die Masse M_S des Sterns kennt man aus seiner Lage auf der Hauptreihe. In Einheiten von AE, Jahren und Sonnenmassen gilt einfacher $a^3 = M_S \cdot T^2$.
- Ein Transit ist nur zu sehen, wenn die Bahn fast genau von der Kante erscheint. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist etwa $\frac{R_S}{a}$ – für eine zweite Erde um eine zweite Sonne nur 0,5 %. Deshalb beobachten die Satelliten Zehn- bis Hunderttausende Sterne gleichzeitig.
- Die **Transitdauer** ist für einen Transit quer durch die Mitte etwa $t_T \approx \frac{T}{\pi} \cdot \frac{R_S}{a}$ (der Planet legt den Sterndurchmesser $2R_S$ auf seiner Bahn der Länge $2\pi a$ zurück).

Typischer Fehler

Falsch: Die Transittiefe beträgt 1 %, also hat der Planet 1 % des Sternradius.

Richtig: Es fehlt 1 % der **Fläche**: $\left(\frac{R_P}{R_S}\right)^2 = 0{,}01$, also $R_P = \sqrt{0{,}01} \cdot R_S = 0{,}1 \cdot R_S$ – etwa ein Jupiter vor der Sonne.

Die Transitmethode liefert Radius, Umlaufzeit und Bahnradius, aber nicht die Masse des Planeten.

Mit der Transitmethode wurden rund drei Viertel aller bekannten Exoplaneten gefunden.

5.3 Die Radialgeschwindigkeitsmethode

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Nicht nur der Planet umkreist den Stern: Beide umkreisen ihren gemeinsamen **Schwerpunkt**. Weil der Stern viel schwerer ist, liegt der Schwerpunkt nah am Sternmittelpunkt, oft sogar im Stern; der Stern beschreibt eine kleine Bahn und „wackelt“ im Takt des Planetenumlaufs. Bewegt er sich dabei auf uns zu, sind seine Spektrallinien zum Blauen verschoben, entfernt er sich, zum Roten (**Doppler-Effekt**, Skript AS6). Gemessen wird so die Geschwindigkeit in Blickrichtung, die **Radialgeschwindigkeit**.

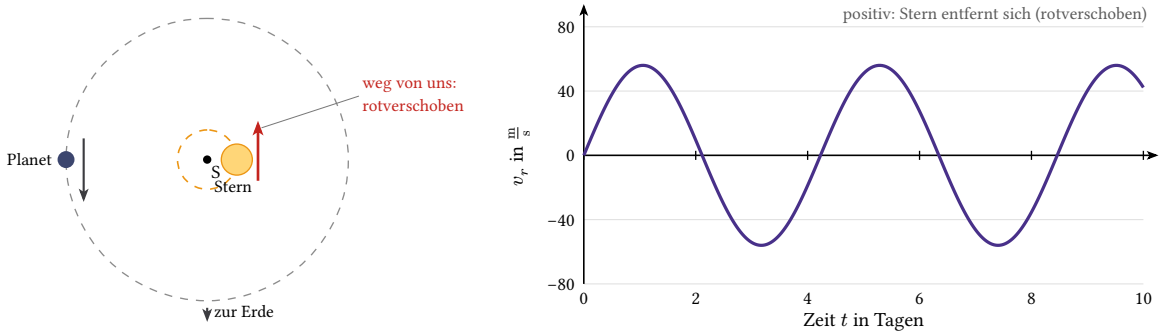


Abbildung 112: Radialgeschwindigkeitsmethode. Links: Stern und Planet umlaufen den Schwerpunkt S (nicht maßstäblich). Rechts: gemessene Radialgeschwindigkeit des Sterns nach dem Vorbild von 51 Pegasi (Amplitude $56\frac{m}{s}$, Periode 4,23 Tage; Kreisbahn angenommen).

Aus der Kurve liest man die Periode T und die größte Geschwindigkeit K des Sterns ab. Für eine Kreisbahn und einen Planeten, der viel leichter ist als der Stern, gilt:

a) Bahnradius des Planeten aus dem dritten Keplerschen Gesetz: $a = \sqrt[3]{\frac{GM_S T^2}{4\pi^2}}$.

b) Bahngeschwindigkeit des Planeten: $v_P = \frac{2\pi a}{T}$.

c) Beide umlaufen den Schwerpunkt mit derselben Umlaufzeit; der Impuls ist ausgeglichen, $M_S \cdot K = M_P \cdot v_P$. Also

$$M_P = M_S \cdot \frac{K}{v_P}.$$

Beispiel 3

51 Pegasi: $M_S \approx 1{,}11 M_\odot$, $T = 4{,}23$ d, $K \approx 56\frac{m}{s}$. Das dritte Keplersche Gesetz liefert $a \approx 7{,}9 \cdot 10^9$ m $\approx 0{,}053$ AE, daraus $v_P = \frac{2\pi a}{T} \approx 136\frac{km}{s}$ und

$$M_P \approx 1{,}11 \cdot 1{,}99 \cdot 10^{30}\ \text{kg} \cdot \frac{56\frac{m}{s}}{136\,000\frac{m}{s}} \approx 9 \cdot 10^{26}\ \text{kg} \approx 0{,}48 M_{\text{Jupiter}}.$$

Ein Gasriese, achtmal näher an seinem Stern als Merkur an der Sonne: der erste „heiße Jupiter“.

Weil man nur die Bewegung in Blickrichtung misst, erhält man genau genommen nicht M_P, sondern eine **Mindestmasse**: Ist die Bahn gegen die Blickrichtung geneigt, ist der Planet schwerer. Die besten Spektrografen messen

heute Geschwindigkeiten unter $1\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$, etwa Schrittgeschwindigkeit. Jupiter bringt die Sonne mit rund $12{,}5\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ ins Wackeln, die Erde nur mit $9\,\frac{\mathrm{cm}}{\mathrm{s}}$ – für eine „zweite Erde“ reicht die Messgenauigkeit noch nicht, zumal die Oberfläche der Sterne selbst brodelt und die Messung stört.

Merksatz

Transit und Radialgeschwindigkeit ergänzen sich: Der Transit liefert den Radius, die Radialgeschwindigkeit die Masse (und die Bahnneigung ist beim Transit bekannt). Zusammen ergeben sie die **mittlere Dichte** des Planeten – und damit, ob er aus Gestein oder vor allem aus Gas besteht.

5.4 Astrometrie

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Das Wackeln des Sterns kann man auch **sehen**, statt es über den Doppler-Effekt zu messen: Der Stern beschreibt am Himmel eine winzige Schleife vor den Hintergrundsternen. Diese genaue Positionsmessung heißt **Astrometrie**. Am Beispiel der Sonne: Jupiter und Saturn lassen ihren Mittelpunkt um den Schwerpunkt des Sonnensystems kreisen, mit Abständen von etwa einem Sonnenradius (Abbildung 113).

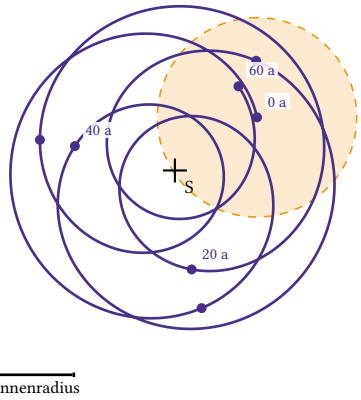


Abbildung 113: Bahn des Sonnenmittelpunkts um den Schwerpunkt S des Sonnensystems über 60 Jahre, berechnet nur mit Jupiter und Saturn auf Kreisbahnen (Modell). Gestrichelt: die Sonnenscheibe zu Beginn. Der Schwerpunkt liegt zeitweise außerhalb der Sonne.

Aus 10 pc Entfernung erschiene der Ausschlag der Sonne durch Jupiter (0,005 AE) unter einem Winkel von nur $0{,}0005''$. Das ist am Rand dessen, was der Satellit Gaia messen kann (Skript AS8). Von der vollständigen Auswertung der Gaia-Daten erwartet man trotzdem Tausende Riesenplaneten auf weiten Bahnen. Die Astrometrie bevorzugt schwere Planeten mit großen Bahnen um nahe Sterne – genau die, die bei den anderen Methoden schlecht abschneiden.

5.5 Der Mikrolinseneffekt

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie lenkt Masse Licht ab. Zieht ein Stern (die „Linse“) von uns aus gesehen genau vor einem weit entfernten Hintergrundstern vorbei, bündelt er dessen Licht wie eine Sammellinse: Der Hintergrundstern wird für einige Tage bis Wochen heller und dann wieder schwächer, ganz gleichmäßig. Hat der Linsenstern einen Planeten, kann dieser für Stunden bis Tage eine zusätzliche kleine Spitze in die Lichtkurve setzen (Abbildung 114). Man nennt das den **Mikrogravitationslinseneffekt**, kurz Mikrolinseneffekt.

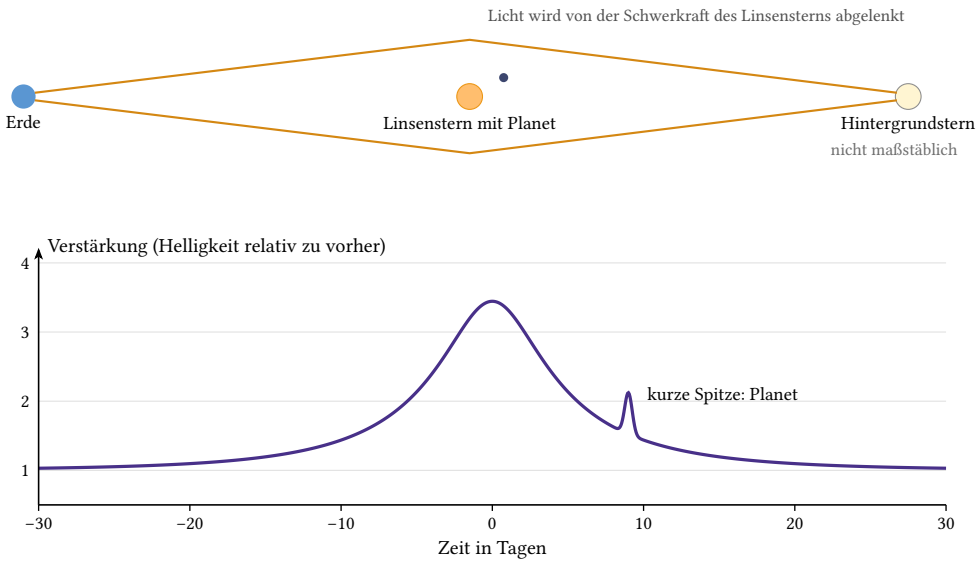


Abbildung 114: Mikrolinseneffekt. Oben die Anordnung (schematisch), unten die Lichtkurve des Hintergrundsterns (Modell): gleichmäßiger Anstieg und Abfall durch den Linsenstern, dazu eine kurze Spitze durch seinen Planeten.

Die Methode findet auch kleine Planeten in großem Abstand von ihrem Stern und Planeten um Sterne, die Tausende Lichtjahre entfernt und zu leuchtschwach für andere Methoden sind. Ihr Nachteil: Jedes Ereignis ist einmalig. Dieselbe Anordnung kommt nie wieder, der Planet lässt sich nicht nachbeobachten. Deshalb überwachen Teleskope Hunderte Millionen Sterne in Richtung des dicht besetzten Milchstraßenzentrums.

5.6 Direkte Abbildung

Wahlfach Astronomie Basisfach Astrophysik

Am anschaulichsten ist ein echtes Bild des Planeten. Dazu muss man das grelle Sternlicht abdecken, etwa mit einer kleinen Scheibe im Teleskop (**Koronograf**, wie eine künstliche Sonnenfinsternis), und die Unruhe der Luft mit verformbaren Spiegeln ausgleichen (adaptive Optik). Man beobachtet im Infraroten: Dort ist der Kontrast zwischen Stern und Planet viel kleiner, bei der Erde etwa ein Zehnmillionstel statt eines Zehnmilliardstels.

Am besten gelingt das bei **jungen**, großen Planeten weit entfernt von ihrem Stern: Sie sind von ihrer Entstehung noch heiß und leuchten selbst im Infraroten. Berühmt ist der Stern HR 8799, bei dem man 2008 drei und später einen vierten Riesenplaneten direkt abbilden konnte; über Jahre aufgenommen, sieht man sie sogar um den Stern wandern.

5.7 Die Methoden im Vergleich

Wahlfach Astronomie Basisfach Astrophysik

Methode	Was man misst	Was man erfährt	Bevorzugt findet man
Transit	Helligkeitseinbruch des Sterns	Radius, Umlaufzeit, Bahnradius	große Planeten auf engen Bahnen; Bahn muss von der Kante zu sehen sein
Radialgeschwindigkeit	periodische Doppler-Verschiebung der Spektrallinien	Mindestmasse, Umlaufzeit, Bahnradius	schwere Planeten auf engen Bahnen um helle Sterne
Astrometrie	Schleife des Sterns am Himmel	Masse, Bahn	schwere Planeten auf weiten Bahnen um nahe Sterne
Mikrolinse	kurze Aufhellung eines Hintergrundsterns	Massenverhältnis Planet zu Stern, Abstand	Planeten auf weiten Bahnen, auch sehr ferne Systeme; einmalig
direkte Abbildung	Licht des Planeten selbst	Bahn, Temperatur, Spektrum	junge, heiße Riesenplaneten weit vom Stern

Tabelle 38: Methoden zum Nachweis von Exoplaneten.

Jede Methode hat ihre **Auswahleffekte**: Sie findet bestimmte Planeten leichter als andere. Dass anfangs so viele heiße Jupiter gefunden wurden, liegt nicht daran, dass sie häufig wären, sondern daran, dass sie mit Transit und Radialgeschwindigkeit am leichtesten zu finden sind. Erdähnliche Planeten in der habitablen Zone sonnenähnlicher Sterne sind mit allen heutigen Methoden noch an der Grenze des Messbaren.

Fachbegriffe: Exoplanet · Transit · Transittiefe · Transitdauer · Schwerpunkt · Doppler-Effekt · Radialgeschwindigkeit · Mindestmasse · Astrometrie · Mikrolinseneffekt · Koronograf · direkte Abbildung · Auswahleffekt

Üben: **noctua** ↗ Ausprobieren: **Radialgeschwindigkeit aus dem Spektrum** ↗ · **Transitmethode** ↗ · **Doppler-Effekt** ↗ · **Keplersche Gesetze** ↗



6 Atmosphären untersuchen und Leben suchen

6.1 Transmissionsspektroskopie

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Zieht ein Planet mit Atmosphäre vor seinem Stern vorbei, läuft ein kleiner Teil des Sternlichts durch den Rand seiner Atmosphäre zu uns. Die Gase darin verschlucken bestimmte Wellenlängen, jedes Gas seine eigenen (Skript AS8, Spektrallinien). Bei diesen Wellenlängen ist die Atmosphäre undurchsichtig, der Planet wirkt etwas größer, und die Transittiefe ist etwas größer. Misst man die Transittiefe bei vielen Wellenlängen, erhält man das **Transmissionsspektrum** der Atmosphäre (Abbildung 115).

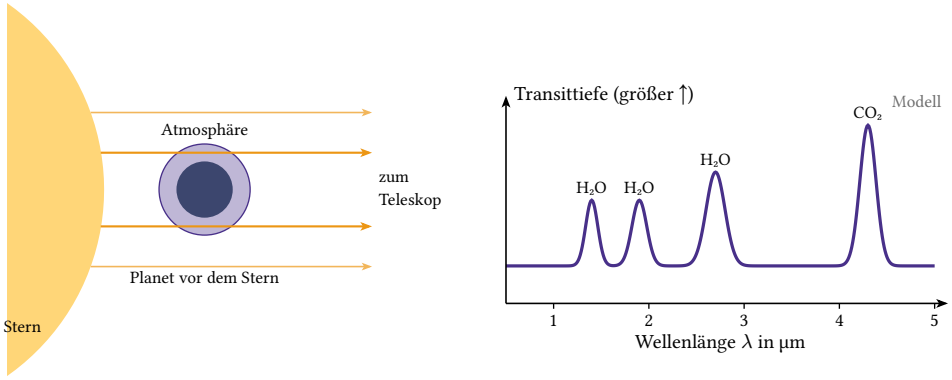


Abbildung 115: Transmissionsspektroskopie. Links: Beim Transit läuft Sternlicht durch den Rand der Planetenatmosphäre (schematisch). Rechts: Modellspektrum eines Planeten mit Wasserdampf und Kohlendioxid; wo ein Gas absorbiert, ist die Transittiefe größer.

Die Unterschiede sind winzig, bei einem heißen Jupiter Bruchteile eines Promilles des Sternlichts. 2002 wies man so mit dem Hubble-Weltraumteleskop erstmals Natrium in der Atmosphäre eines Exoplaneten nach. Das James-Webb-Weltraumteleskop (seit 2022 im Einsatz) misst im Infraroten viel genauer; beim heißen Gasplaneten WASP-39 b fand es 2022 erstmals eindeutig Kohlendioxid in der Atmosphäre eines Exoplaneten.

Temperatur aus dem Licht des Planeten. Verschwindet der Planet auf der anderen Seite **hinter** dem Stern, fehlt für kurze Zeit seine eigene Wärmestrahlung: Die Gesamthelligkeit sinkt im Infraroten ein klein wenig. Aus der Tiefe dieses zweiten Einbruchs folgt, wie stark der Planet selbst strahlt, und mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz seine Temperatur. Verfolgt man die Helligkeit über einen ganzen Umlauf, sieht man abwechselnd mehr von der Tag- und mehr von der Nachtseite und erhält so den Temperaturunterschied zwischen beiden. Die Lage der Spektrallinien und Banden verrät, welche Moleküle bei welcher Temperatur vorhanden sind. So lassen sich **Temperatur** und **chemische Zusammensetzung** einer Atmosphäre aus Lichtjahren Entfernung bestimmen.

6.2 Biosignaturen

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Woran könnte man Leben aus der Ferne erkennen? Gesucht sind **Biosignaturen**: Merkmale im Licht eines Planeten, die sich am einfachsten durch Lebewesen erklären lassen.

- **Sauerstoff und Ozon.** Der Sauerstoff der Erdluft stammt fast vollständig aus der Fotosynthese von Pflanzen und Bakterien. Ohne Leben würde er in einigen Millionen Jahren durch Reaktionen mit Gestein und Vulkangasen verschwinden. Ozon (O_3) entsteht aus Sauerstoff und hat eine kräftige Bande im Infraroten.
- **Methan neben Sauerstoff.** Methan und Sauerstoff reagieren miteinander. Findet man beide gleichzeitig in größeren Mengen, muss sie etwas ständig nachliefern. Ein solches **chemisches Ungleichgewicht** ist ein starker Hinweis auf Leben.
- **Die „rote Kante“.** Grüne Pflanzen werfen nahes Infrarot (ab etwa 700 nm) viel stärker zurück als rotes Licht. Ein bewachsener Planet hätte im Spektrum eine Stufe an dieser Stelle.

1990 flog die Raumsonde Galileo auf dem Weg zum Jupiter an der Erde vorbei. Forscher um Carl Sagan prüften, ob man mit ihren Messgeräten Leben auf der Erde erkennen könnte, als wüsste man nichts davon. Ergebnis: viel Sauerstoff, dazu

Methan weit über dem chemischen Gleichgewicht, die rote Kante über Landflächen und künstliche Radiosignale – alles Hinweise auf Leben.

Typischer Fehler

Falsch: Findet man Sauerstoff in der Atmosphäre eines Planeten, gibt es dort Leben.

Richtig: Sauerstoff kann auch ohne Leben entstehen, etwa wenn UV-Strahlung Wassermoleküle spaltet und der Wasserstoff ins All entweicht. Erst mehrere Hinweise zusammen und der Ausschluss anderer Erklärungen machen eine Biosignatur glaubwürdig.

Man spricht von „falsch positiven" Biosignaturen.

Wie vorsichtig man sein muss, zeigt K2-18 b, ein Mini-Neptun in der habitablen Zone eines roten Zwergs: Das James-Webb-Teleskop fand Methan und Kohlendioxid; eine Forschergruppe meldete zusätzlich mögliche Spuren von Dimethylsulfid, das auf der Erde vor allem von Meeresalgen stammt. Andere Gruppen fanden in denselben Daten kein gesichertes Signal.

6.3 Suche nach Leben im Sonnensystem

Wahlfach Astronomie

Im Sonnensystem kann man Raumsonden schicken und vor Ort suchen:

- **Mars:** Der Rover Perseverance sammelt im Krater Jezero Proben aus einem ehemaligen See (Kapitel 3).
- **Europa:** Die NASA-Sonde Europa Clipper (Start 2024) soll ab 2030 den Eismond Europa aus nächster Nähe untersuchen; die ESA-Sonde JUICE (Start 2023) die Jupitermonde Ganymed, Kallisto und Europa.
- **Enceladus:** Cassini fand in den Fontänen Wasser, Salze und organische Moleküle; eine Sonde, die die Fontänen gezielt untersucht, ist im Gespräch.
- **Titan:** Der Saturnmond hat eine dichte Stickstoffatmosphäre und Seen aus flüssigem Methan und Ethan – ein Labor für eine ganz andere Chemie. Eine Drohne der NASA (Dragonfly) soll ihn erkunden.

Bisher wurde nirgends außerhalb der Erde Leben nachgewiesen.

6.4 Kontakt mit Außerirdischen?

Zusatz

Seit 1960, als Frank Drake ein Radioteleskop auf zwei nahe sonnenähnliche Sterne richtete, lauschen Radioastronomen nach künstlichen Signalen fremder Zivilisationen (SETI, englisch für „Suche nach außerirdischer Intelligenz"). Ein Signal, das sich nicht natürlich oder irdisch erklären ließ, wurde bisher nicht gefunden.

Die **Drake-Gleichung** (1961) zerlegt die Frage, wie viele sendende Zivilisationen es in der Milchstraße geben könnte, in Faktoren: wie viele Sterne pro Jahr entstehen, welcher Anteil Planeten hat, wie viele davon in der habitablen Zone liegen, auf welchem Anteil Leben entsteht, auf welchem Anteil davon Intelligenz und Technik, und wie lange eine solche Zivilisation sendet. Die ersten Faktoren kennt man inzwischen aus der Exoplanetenforschung recht gut, die letzten überhaupt nicht – das Ergebnis kann zwischen „wir sind allein" und „Millionen" liegen. Sie ist eher eine geordnete Liste dessen, was man wissen müsste, als eine Rechenformel.

Eine harte Grenze setzt die Lichtgeschwindigkeit. Radiosignale der Erde sind seit etwa hundert Jahren unterwegs und haben bis heute eine Kugel von rund hundert Lichtjahren Radius erreicht – bei einem Durchmesser der Milchstraße von etwa hunderttausend Lichtjahren ein winziger Bruchteil. Eine Frage an den nächsten Stern, Proxima Centauri, wäre mit Antwort mindestens 8,5 Jahre unterwegs. 1974 sendete das Radioteleskop Arecibo eine Botschaft zum Kugelsternhaufen M13; sie wird ihn in rund 25 000 Jahren erreichen.

Fachbegriffe: Transmissionsspektrum · Biosignatur · chemisches Ungleichgewicht · rote Kante · falsch positive Biosignatur · SETI · Drake-Gleichung

Üben: **noctua** ↗ Ausprobieren: **Linienspektren und Energieniveaus** ↗ · **Absorption in der Atmosphäre** ↗

