



# Solarenergie

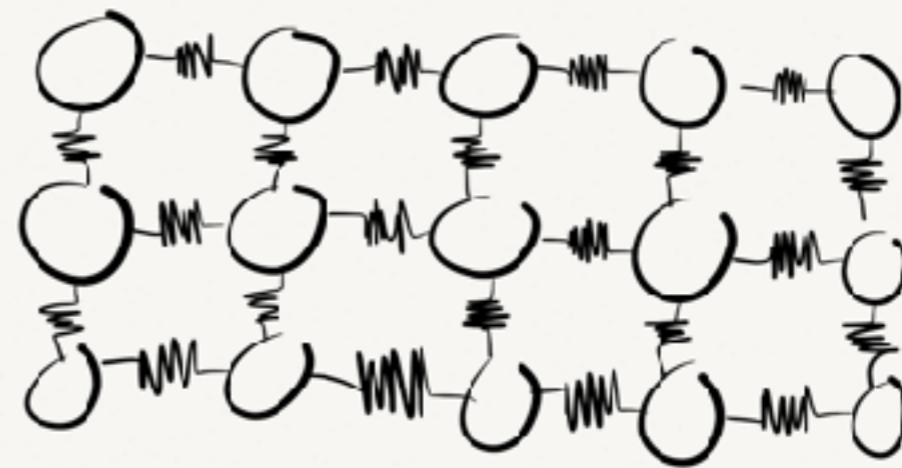
Die Sonne

# Wärmestrahlung

# Wärmestrahlung

## Lichtentstehung

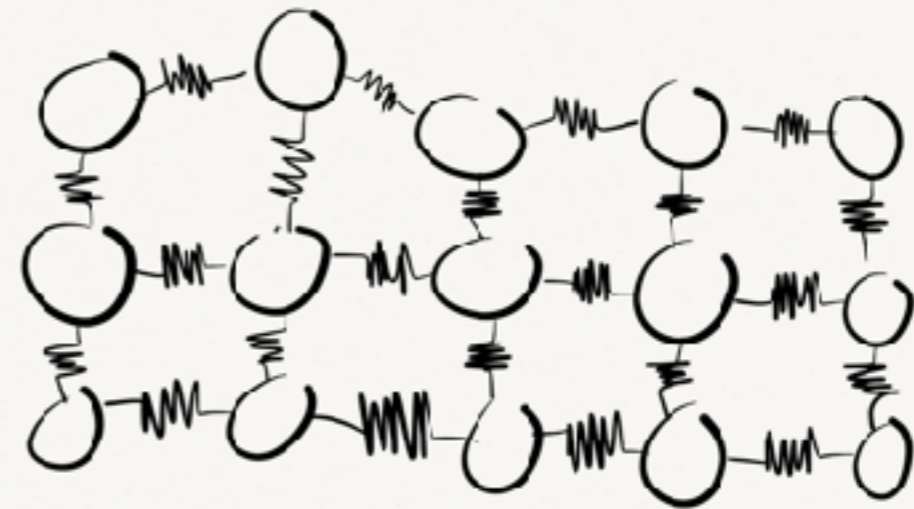
- Wärme ist Bewegung der Atome
- Im Festkörper ist die Bewegung Schwingung
- Diese Schwingungen können selber Photonen aufnehmen und abgeben



# Wärmestrahlung

## Lichtentstehung

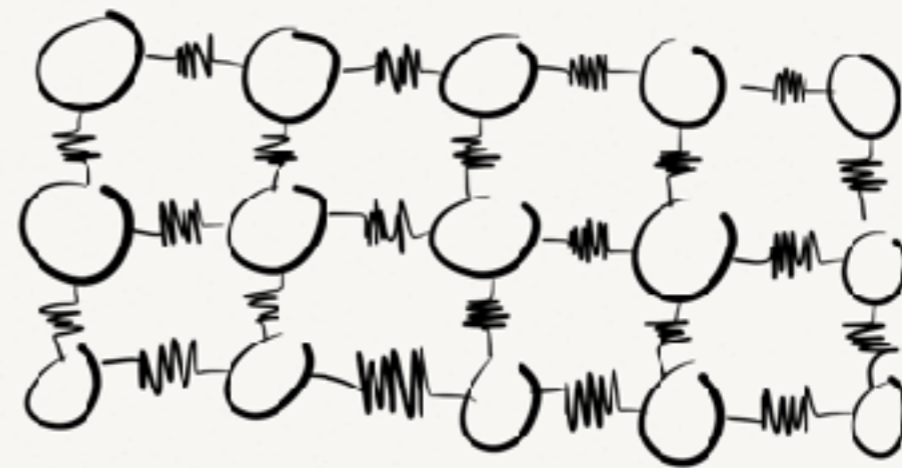
- Wärme ist Bewegung der Atome
- Im Festkörper ist die Bewegung Schwingung
- Diese Schwingungen können selber Photonen aufnehmen und abgeben



# Wärmestrahlung

## Lichtentstehung

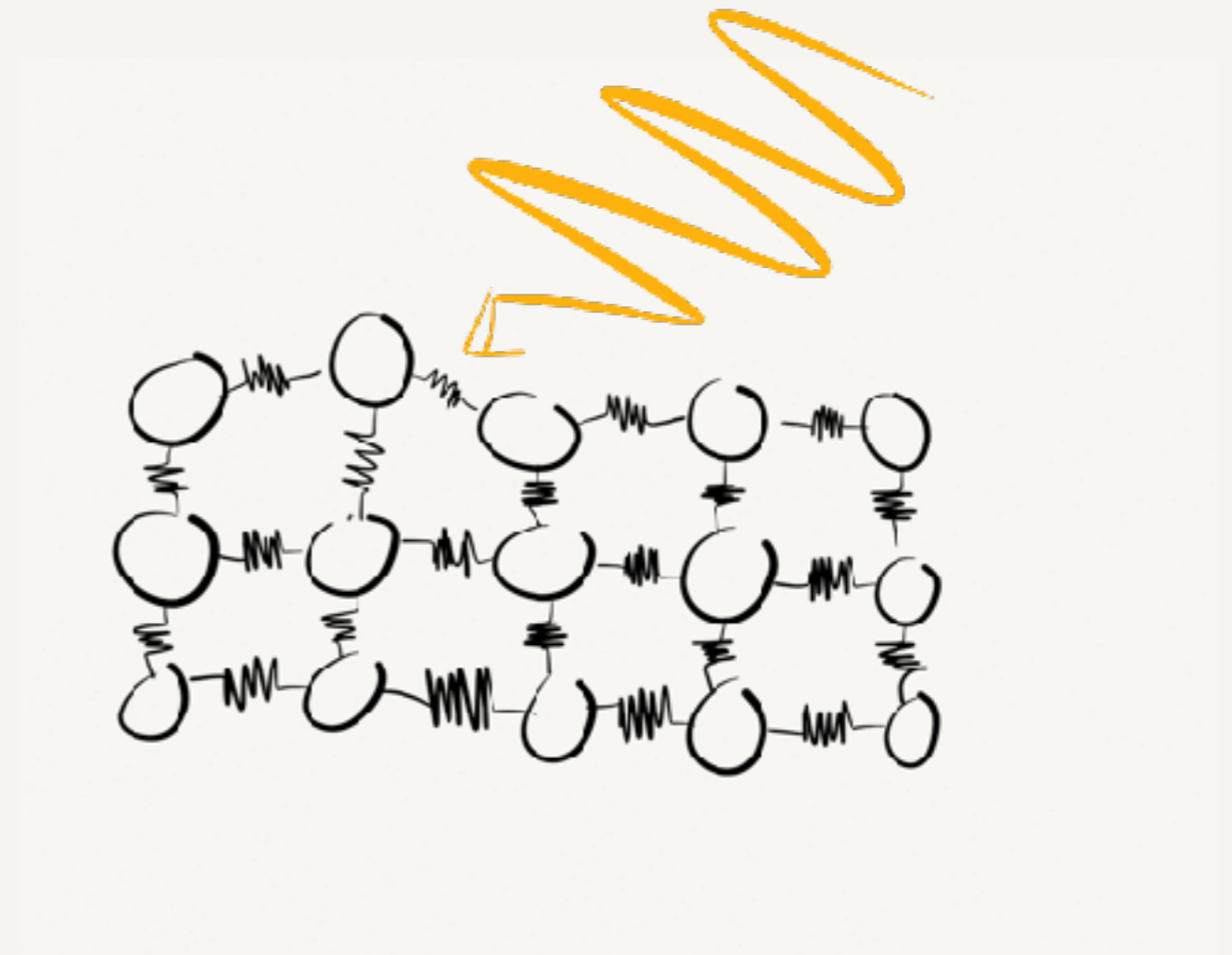
- Wärme ist Bewegung der Atome
- Im Festkörper ist die Bewegung Schwingung
- Diese Schwingungen können selber Photonen aufnehmen und abgeben



# Wärmestrahlung

## Lichtentstehung

- Wärme ist Bewegung der Atome
- Im Festkörper ist die Bewegung Schwingung
- Diese Schwingungen können selber Photonen aufnehmen und abgeben



# Wärmestrahlung

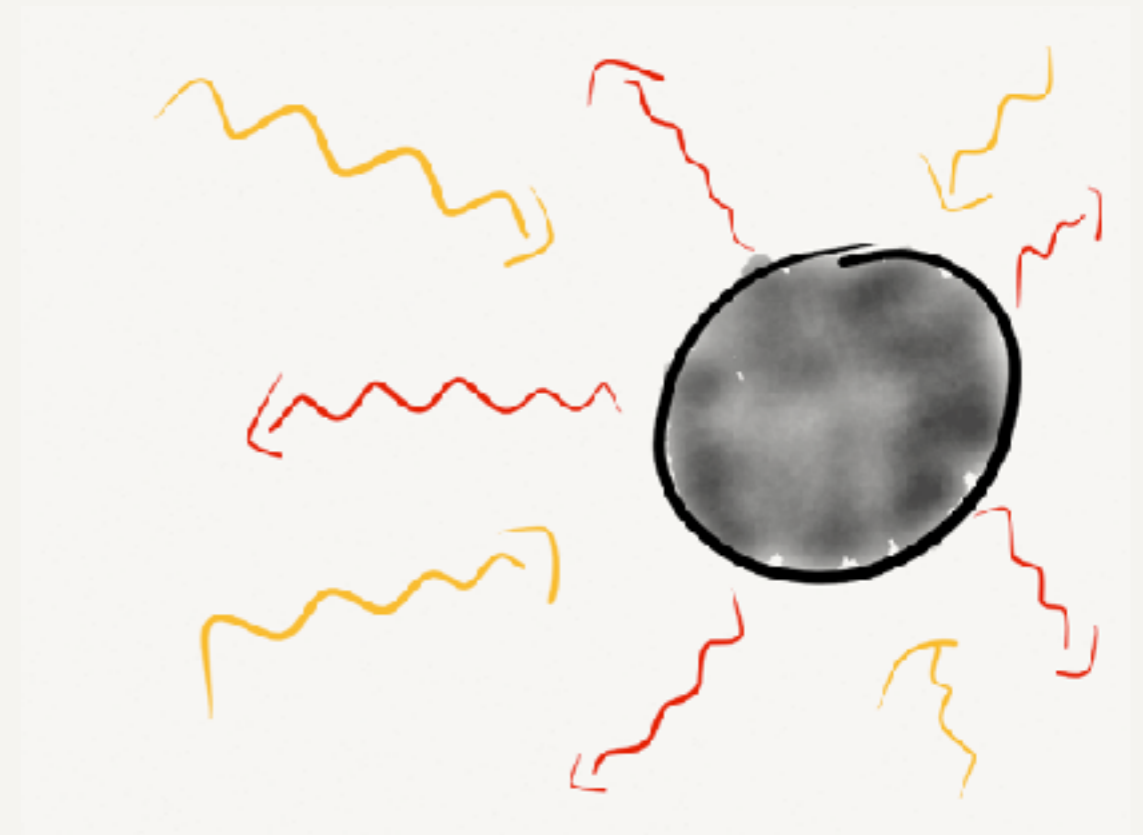
## Lichtentstehung

- Wärme ist Bewegung der Atome
- Im Festkörper ist die Bewegung Schwingung
- Diese Schwingungen können selber Photonen aufnehmen und abgeben

# Wärmestrahlung

## Schwarzer Strahler

- Idealisiertes System zur Berechnung der Eigenschaften von Wärmestrahlung.
- Ein schwarzer Strahler absorbiert *alle* eingestrahlte elektromagnetische Strahlung.
- Im thermischen Gleichgewicht strahlt er dann aber auch genau die gleiche Energie wieder ab, nur mit einem





# Wärmestrahlung

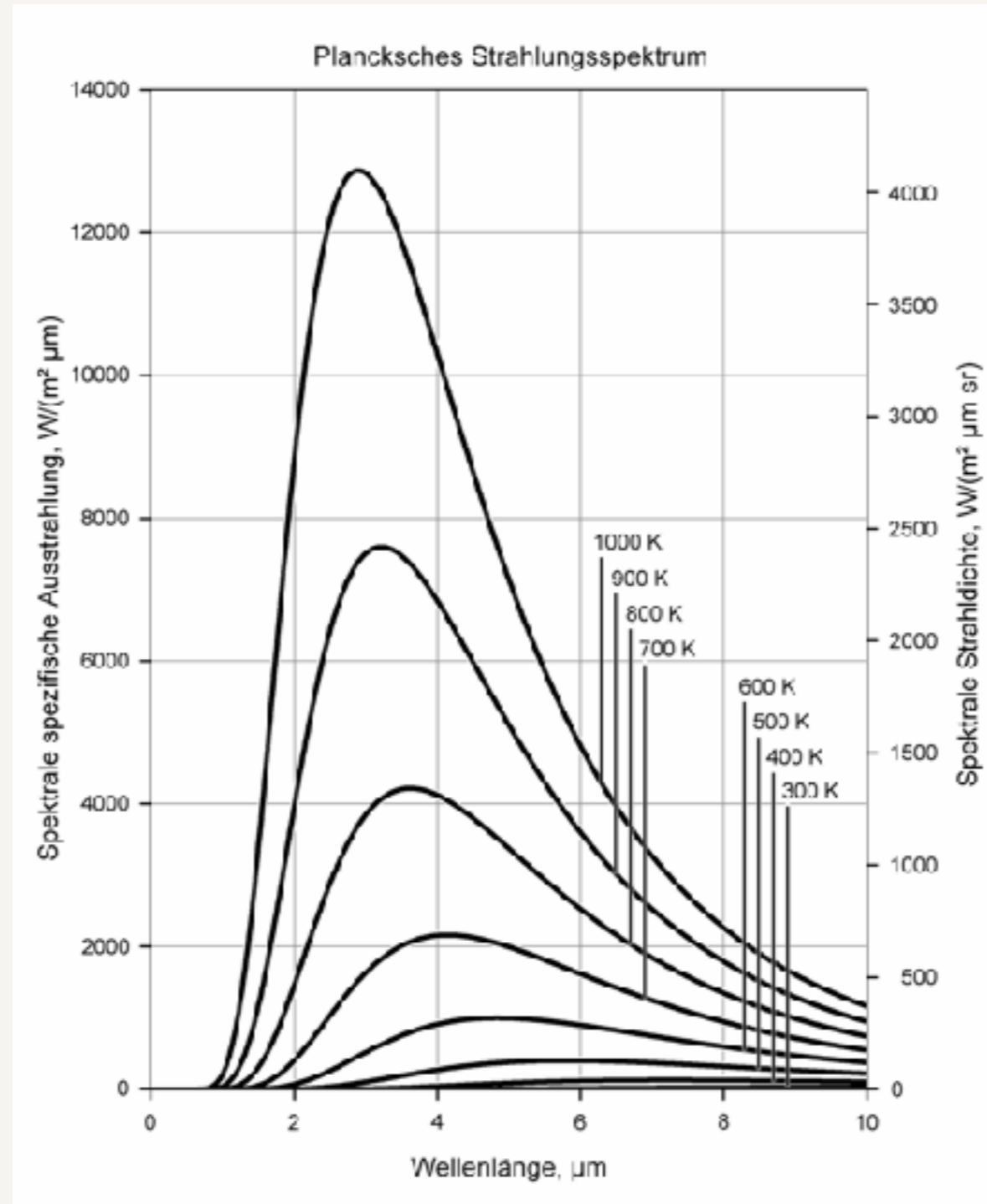
## Planck'sche Strahlungsformel

- Die Planck'sche Strahlungsformel beschreibt die spektrale Energiedichte eines schwarzen Strahlers, d.h. sein Spektrum:

$$U(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

- Das Spektrum eines schwarzen Strahlers hängt nur von dessen Temperatur ab!

# Wärmestrahlung Spektrum



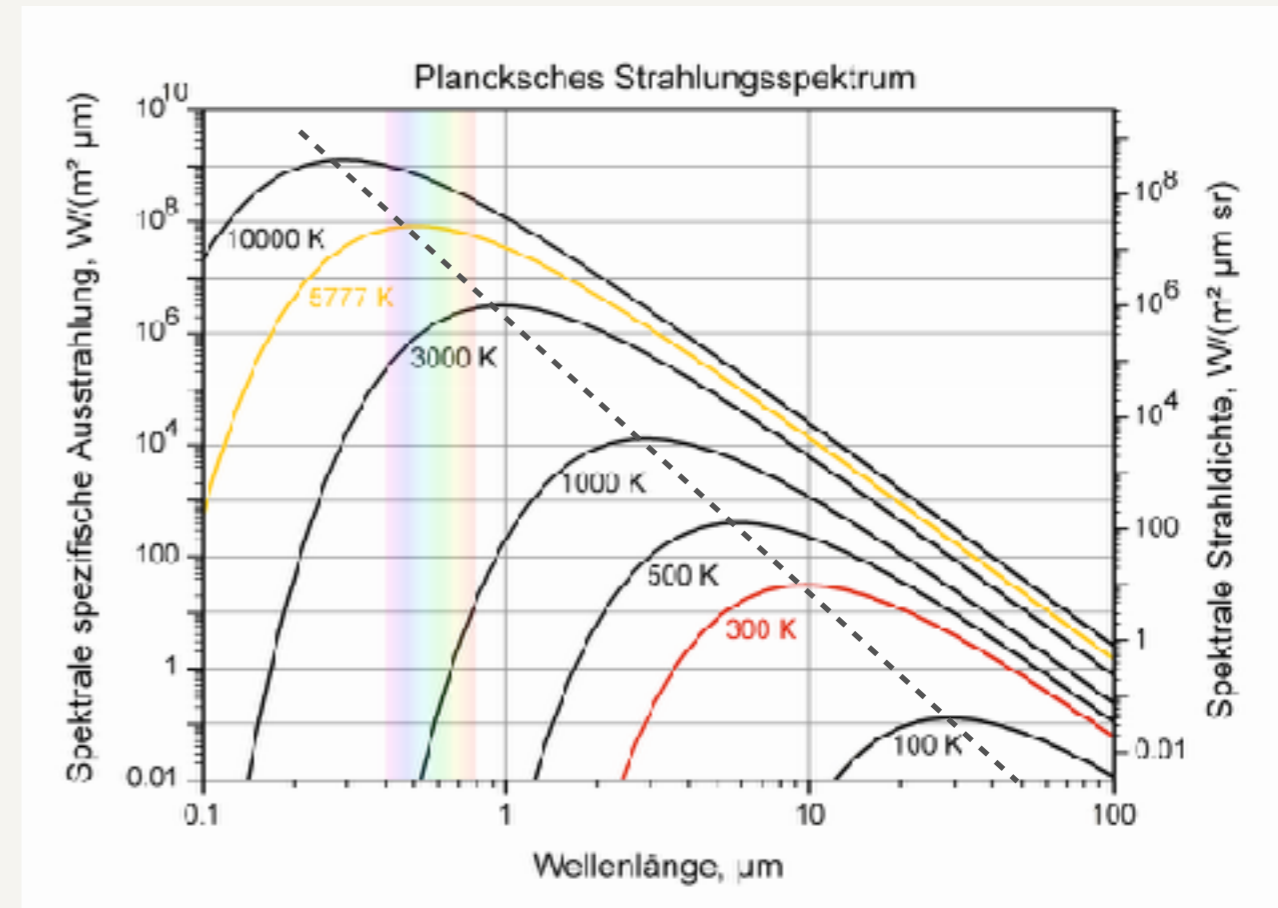
# Wärmestrahlung

## Strahlungsmaximum

- Das **Wien'sche Verschiebungsgesetz** beschreibt die Wellenlänge der Strahlungsmaximums:

$$\lambda_{max} \cdot T = \text{konst.} = 2898 \mu m K$$

- Die Wellenlänge des Strahlungsmaximums verschiebt sich mit steigender Temperatur zu kürzeren Wellenlängen.

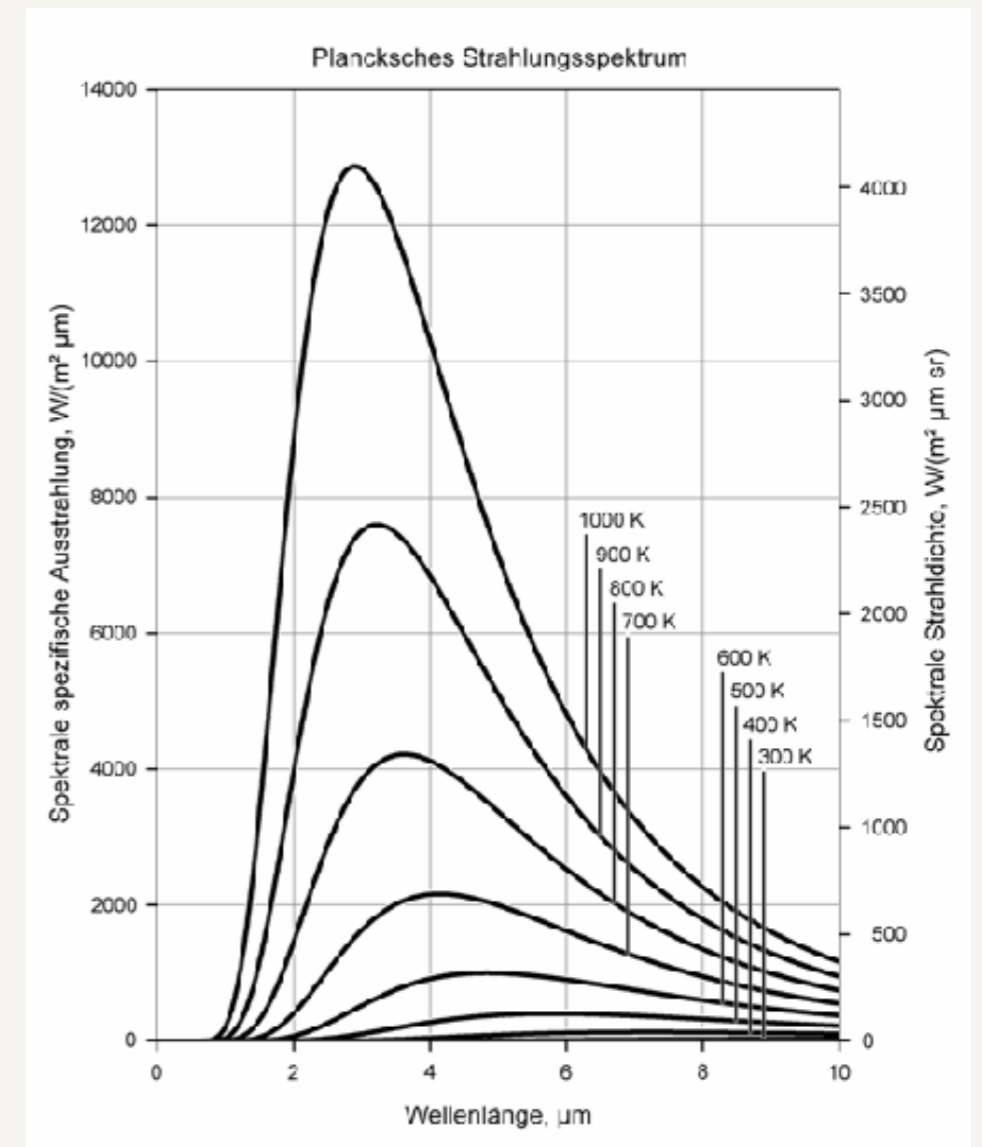


# Wärmestrahlung

## Strahlungsleistung

- Integriert man das Spektrum auf erhält man die gesamte abgestrahlte Leistung.
- Die Leistung wird durch das **Stefan-Boltzmann-Gesetz** beschrieben:

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4$$



# Aufgabe

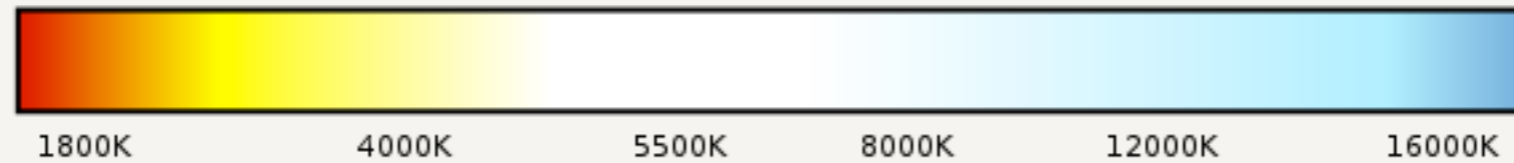
- Nehmen Sie an, Ihre Solaranlage sei selber ein Schwarzkörper-Strahler. Rechnen Sie mit Hilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetzes aus, wie viel Leistung ihre Solaranlage auf dem Dach selber als Wärmestrahlung abgibt. Berechnen Sie dies für  $20^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$  und  $80^\circ\text{C}$ . Nehmen Sie eine Fläche von  $1\text{m}^2$  an. Es gilt:

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

- Betrachten Sie die Ergebnisse als prozentualen Unterschied.

# Wärmestrahlung

## Farbtemperatur

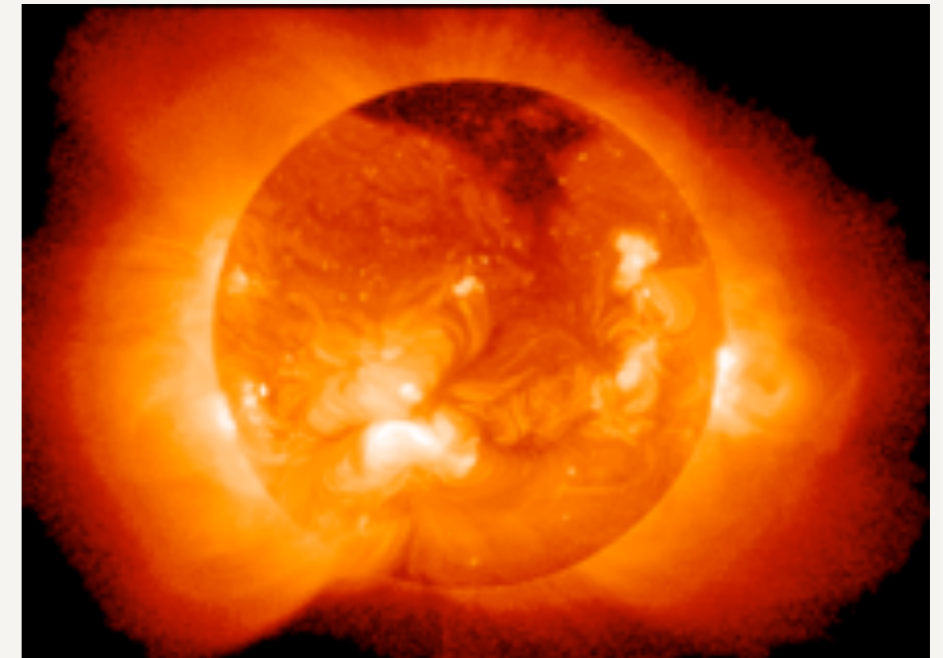


- Das Spektrum des schwarzen Strahlers wird nur über den einen Parameter Temperatur festgelegt.
- Damit kann jeder Temperatur eine Farbe zugewiesen werden, die dann Farbtemperatur heisst.

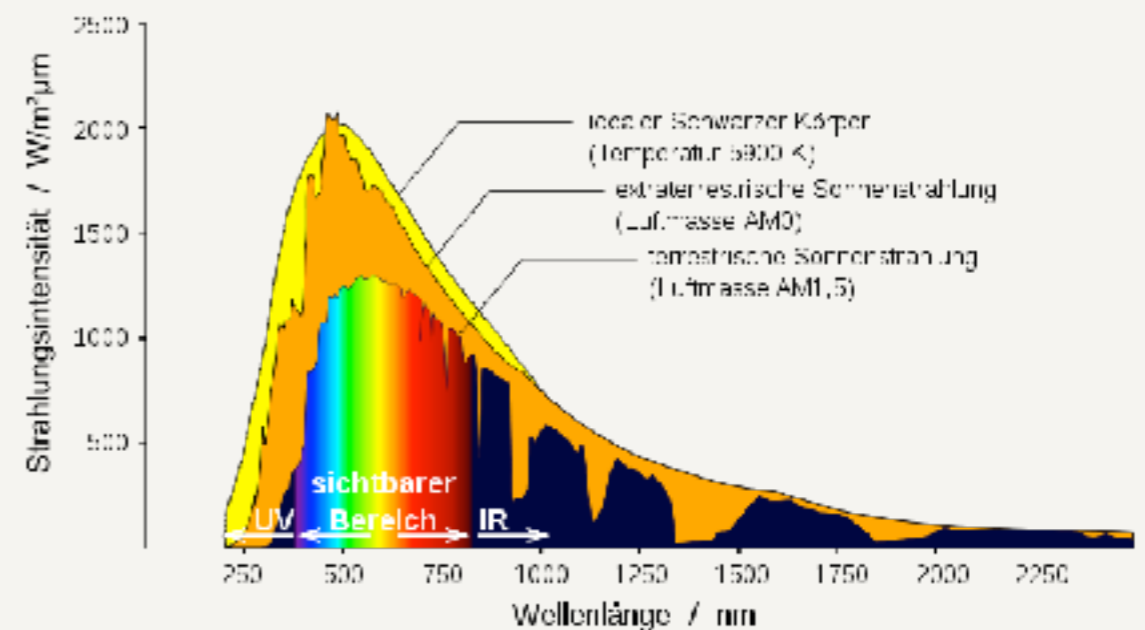
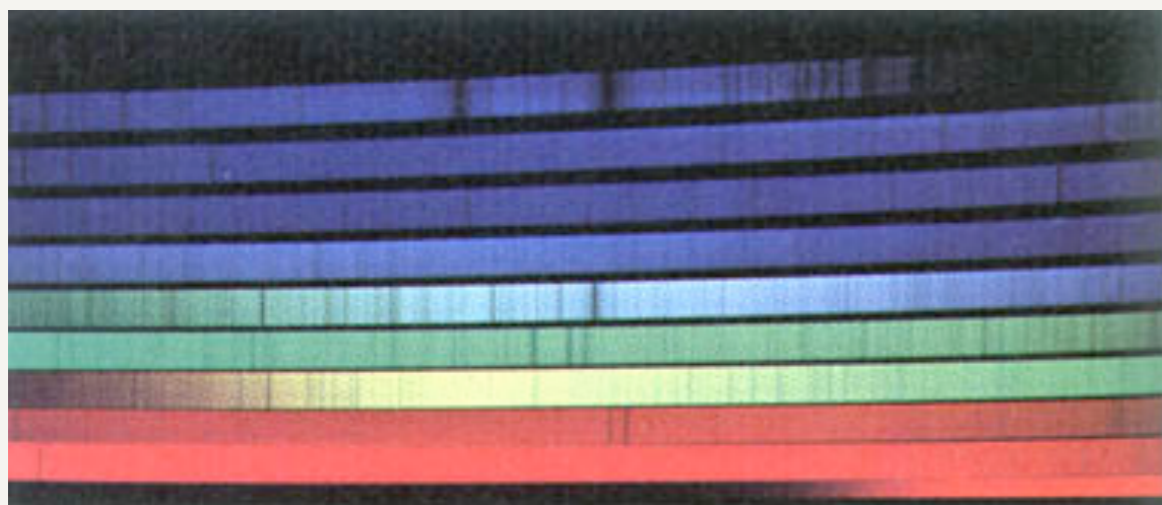


# Sonne als Wärmestrahler

# Sonne



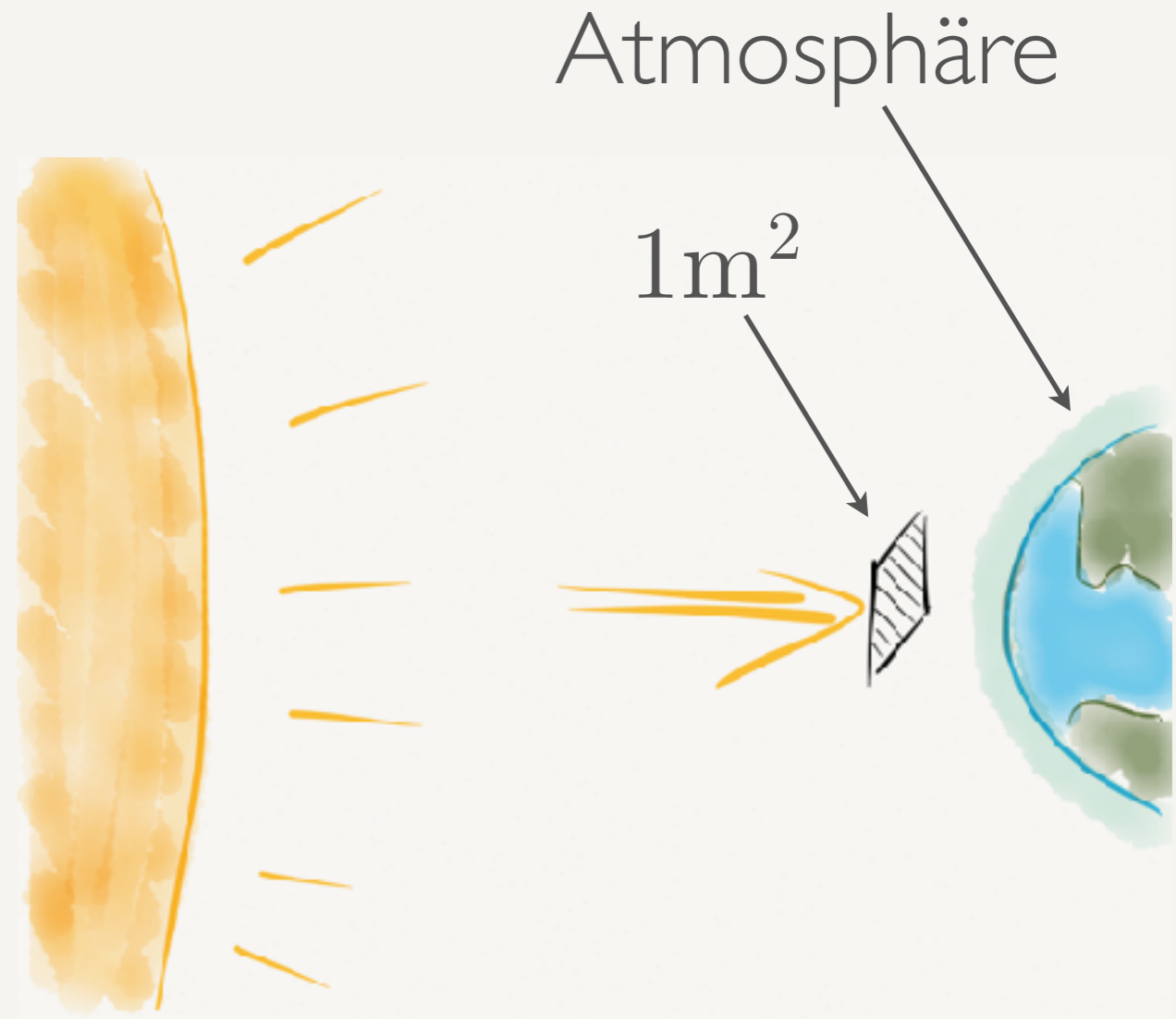
- Schwarzer Strahler mit 6000K
- Lichtleistung ca. 5000-facher Energiebedarf der Menschheit





# Solarkonstante

- Wieviel Sonnenlicht kommt auf der Erde an?
- Langjährig gemittelte Intensität der Sonnenstrahlung in  $\text{W}/\text{m}^2$
- Gemessen oberhalb der Erdatmosphäre



**1367  $\text{W}/\text{m}^2$**

# Wie heiß wird es?

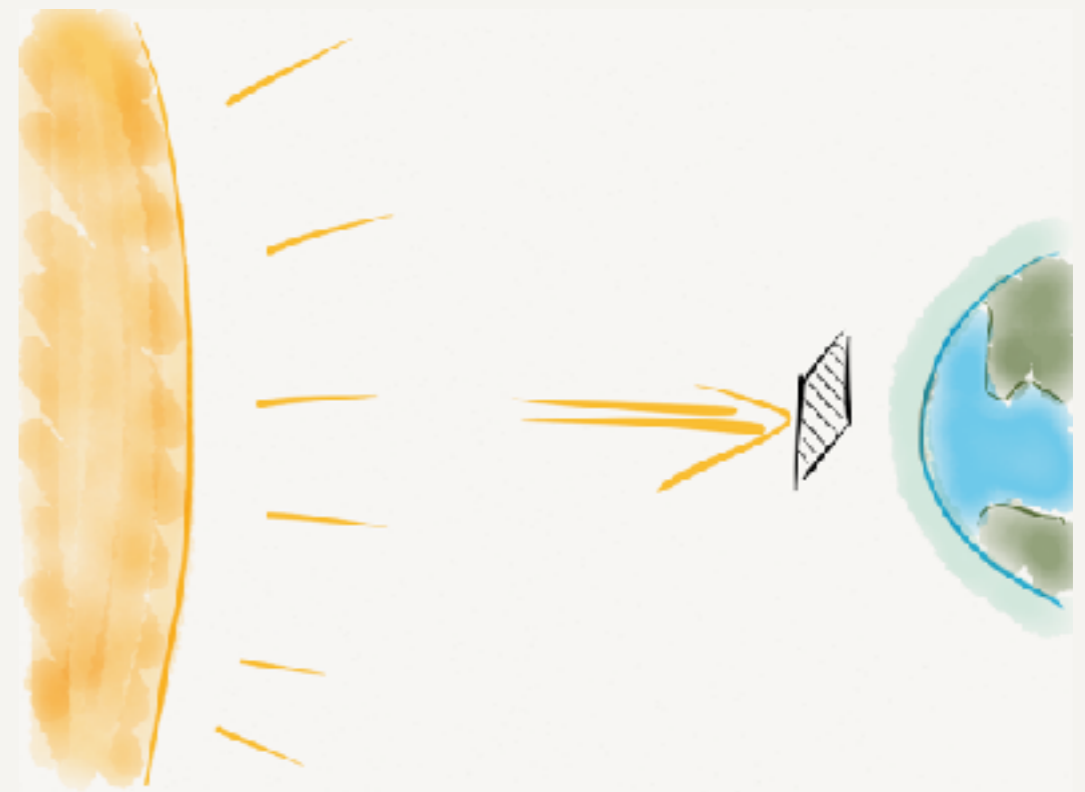
- Im Sommer können Gegenstände, die in der Sonne liegen, sehr heiß werden.
- Nehmen Sie an, Ihr Gegenstand sei ein Schwarzer Körper. Wie heiß kann er in der Sonne werden?
- Hinweis: thermodynamisches Gleichgewicht!

# Wie heiß wird es?

- Thermodynamisches Gleichgewicht: der schwarze Körper absorbiert genau so viel Energie wie er emittiert.
- Bei welcher Temperatur ist also die Verlustleistung gleich der eingestrahlten Leistung?
- In der Praxis:
  - Weniger Lichtleistung als Solarkonstante (Atmosphäre)
  - Keine perfekte Absorption / Emission

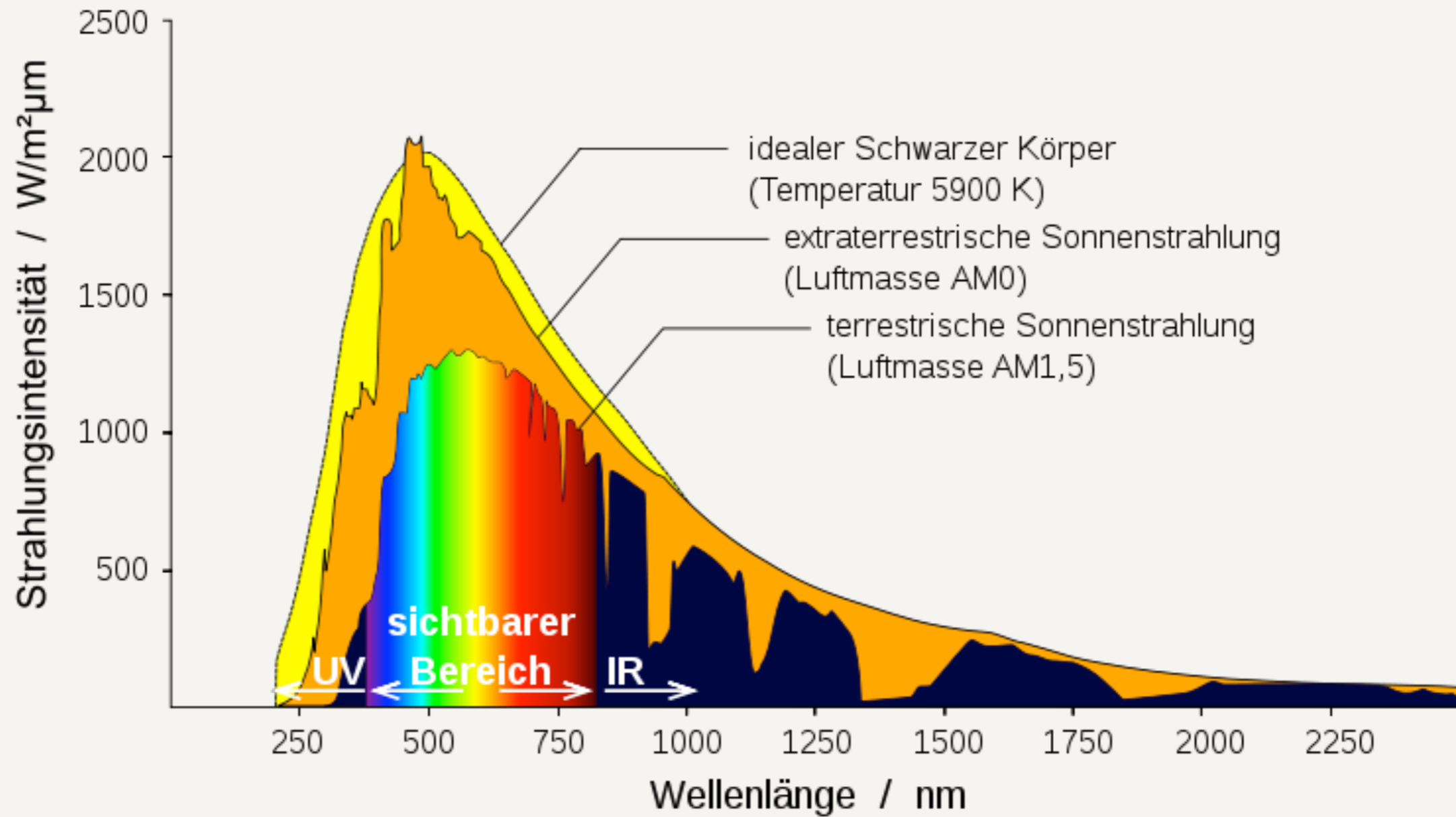
Stefan-Boltzmann-Gesetz

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4$$



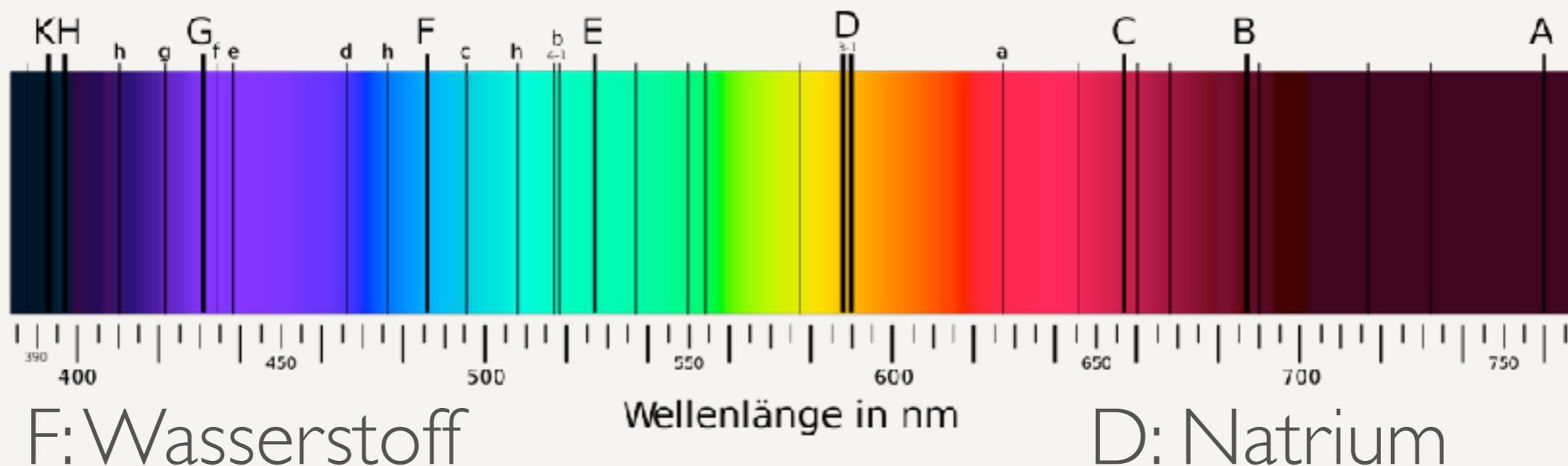
$$\sqrt{\frac{1367 \text{ W/m}^2}{5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4)}} \approx 394 \text{ K}$$
$$\approx 121 \text{ }^\circ\text{C}$$

# Sonne

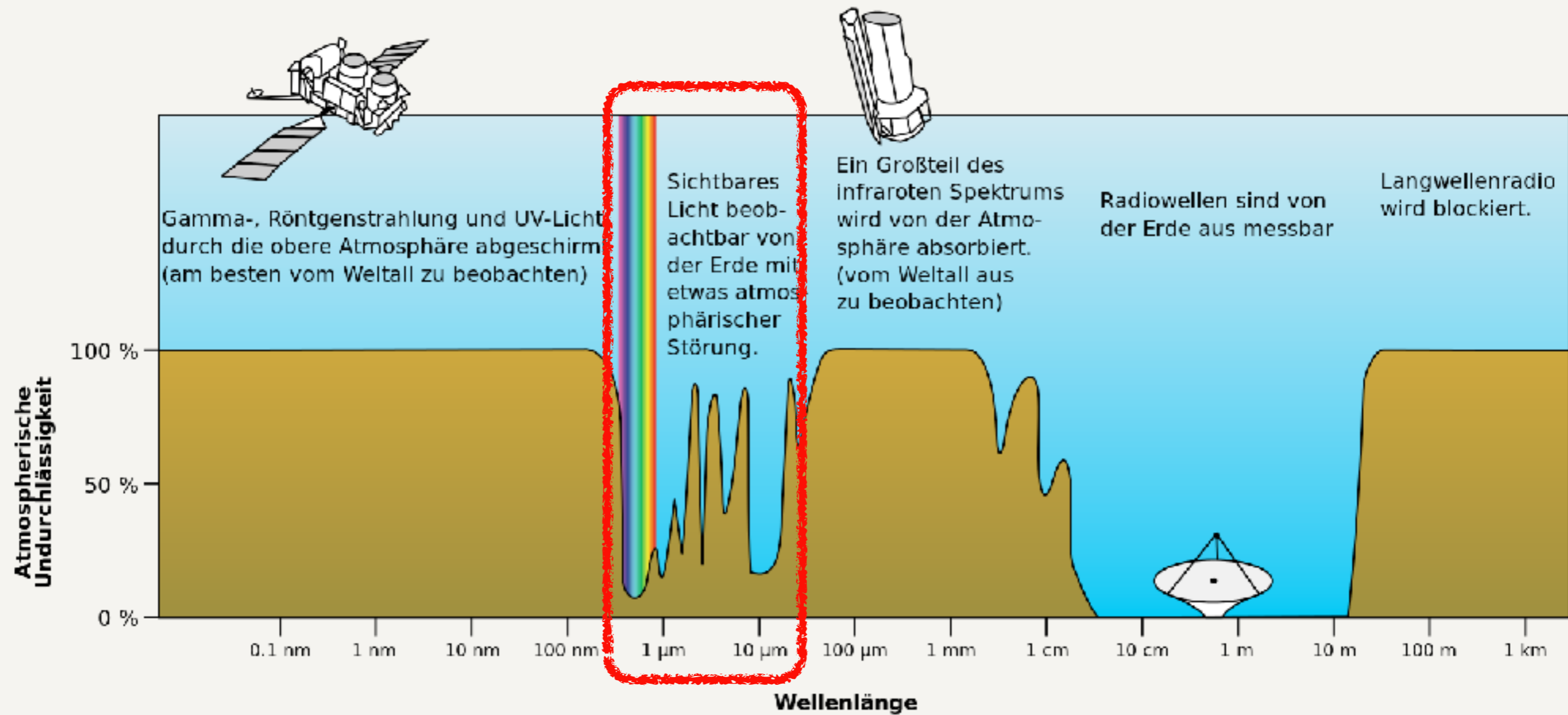



# Fraunhofer'sche Linien

- Fraunhofer wollte die Qualität von Gläsern bestimmen
- Er suchte eine Referenz, gegen die er Abweichungen des Brechungsindex vergleichen konnte
- Bei der systematischen Analyse des Sonnenspektrums in hoher Auflösung fand er viele dunkle Linien, die wir heute als Absorptionslinien chemischer Elemente erkennen.
- Die Elemente sind sowohl in der Sonnen- als auch der Erdatmosphäre.



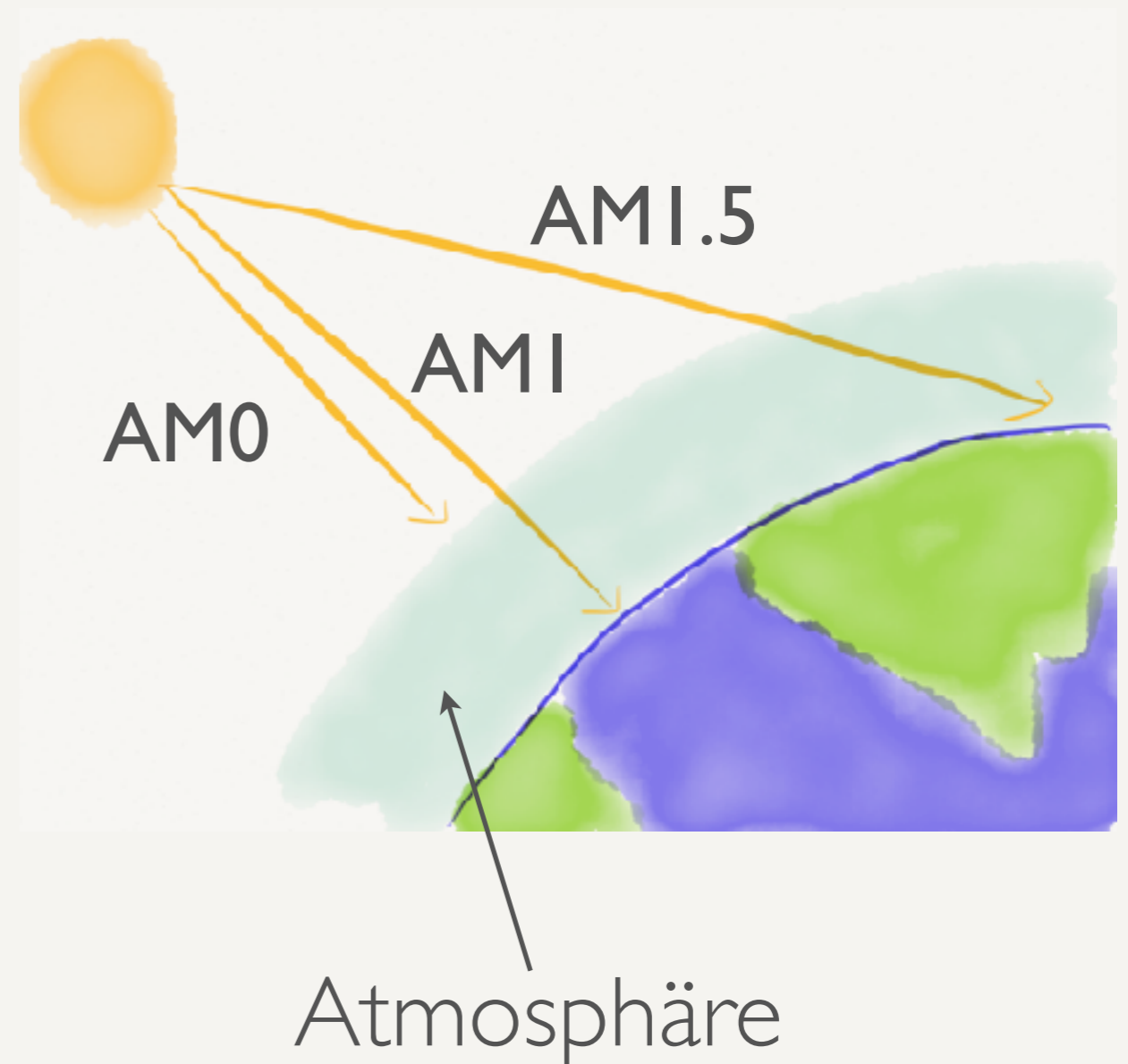
# Absorption in der Atmosphäre



Quelle: 

# Luftmasse

- Definiert die Menge Luft, durch die das Sonnenlicht hindurch muss.
- Luftmasse = ‚Air mass‘ (AM)
- Relativ zu senkrechtem Einfall gemessen:  
$$AM = \frac{l}{l_0}$$
- $AM0$  ist außerhalb der Atmosphäre gemessen
- $AM1$  ist bei senkrechtem Einfall (kürzeste Strecke)
- $AM1.5$  ist bei  $48.2^\circ$  Einfall



# Luftmasse

- Bei flachen Winkeln im Winter nimmt die Luftmasse deutlich zu.

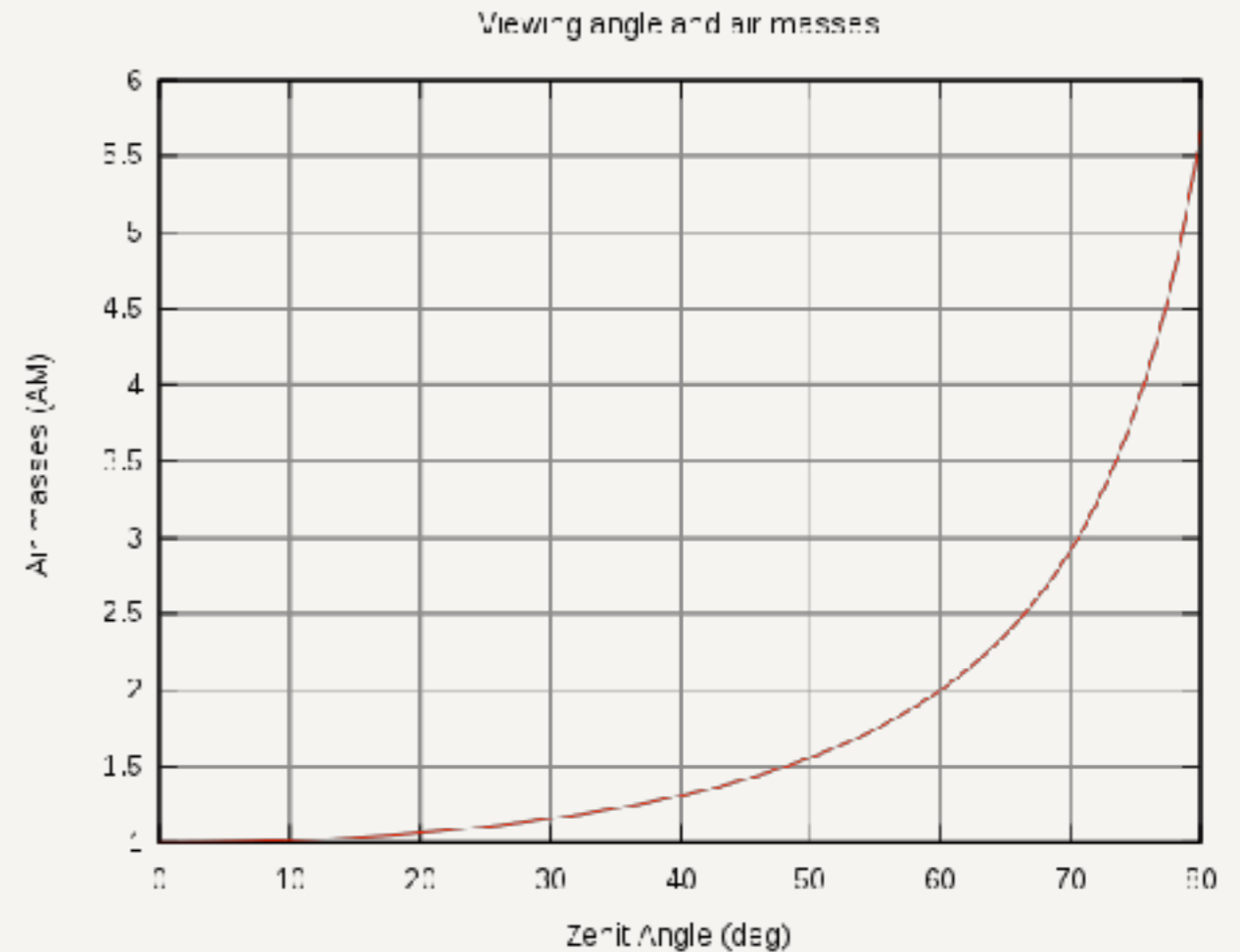
- Berlin, Winter:  $14^\circ$

$$AM = 4.13$$

- Berlin, Sommer:  $61^\circ$

$$AM = 1.14$$

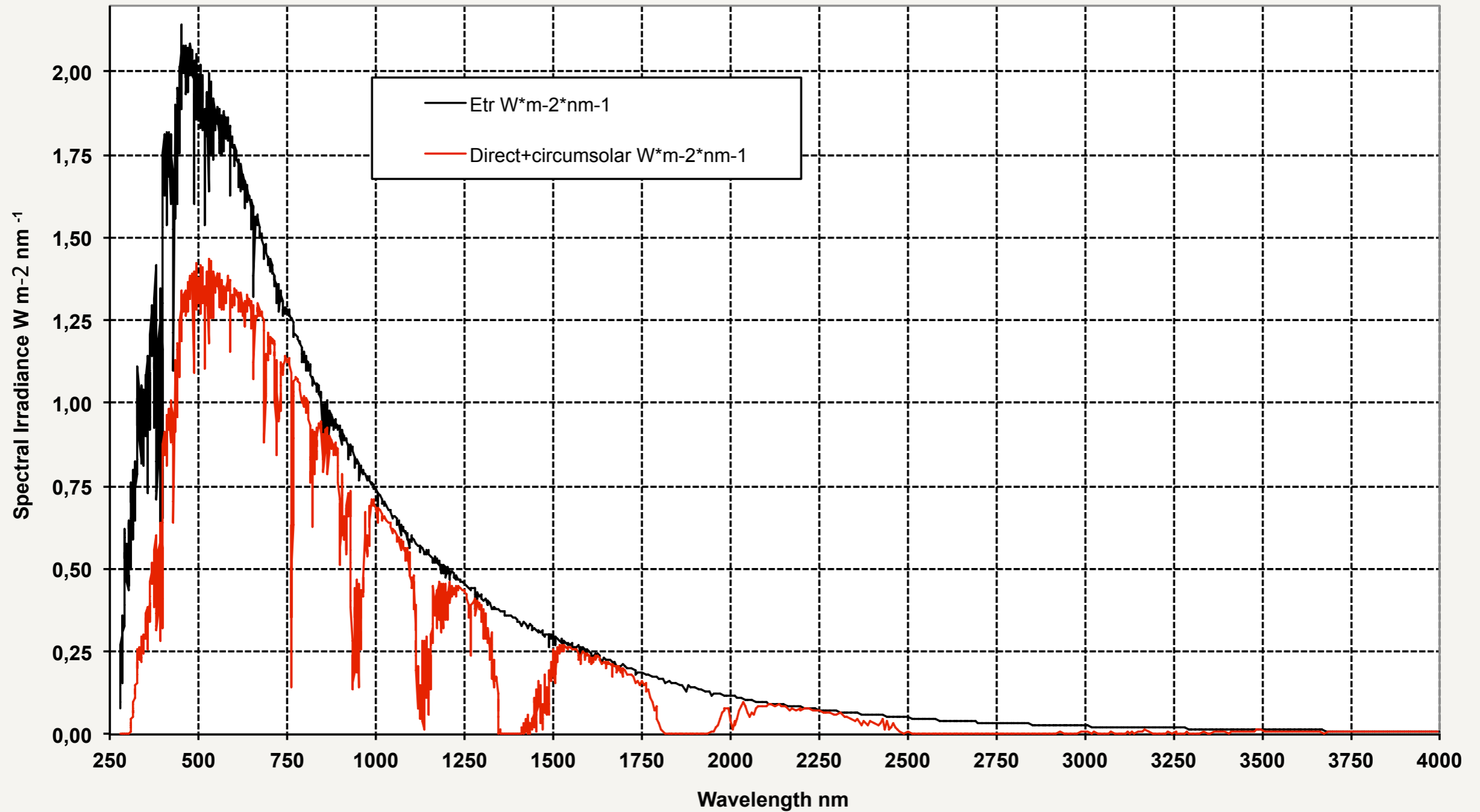
- Lambert-Beer'sches Gesetz!





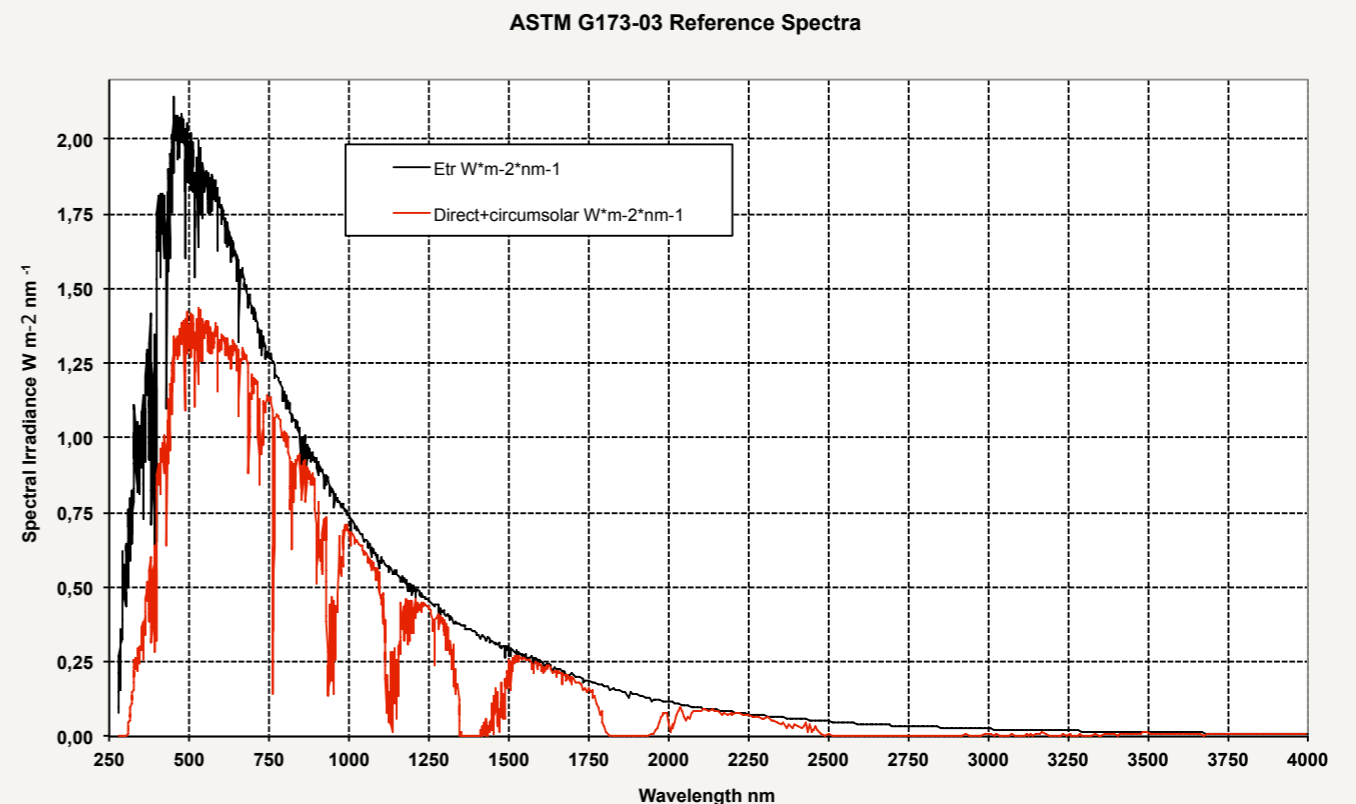
# Referenzspektrum ASTM G173

ASTM G173-03 Reference Spectra



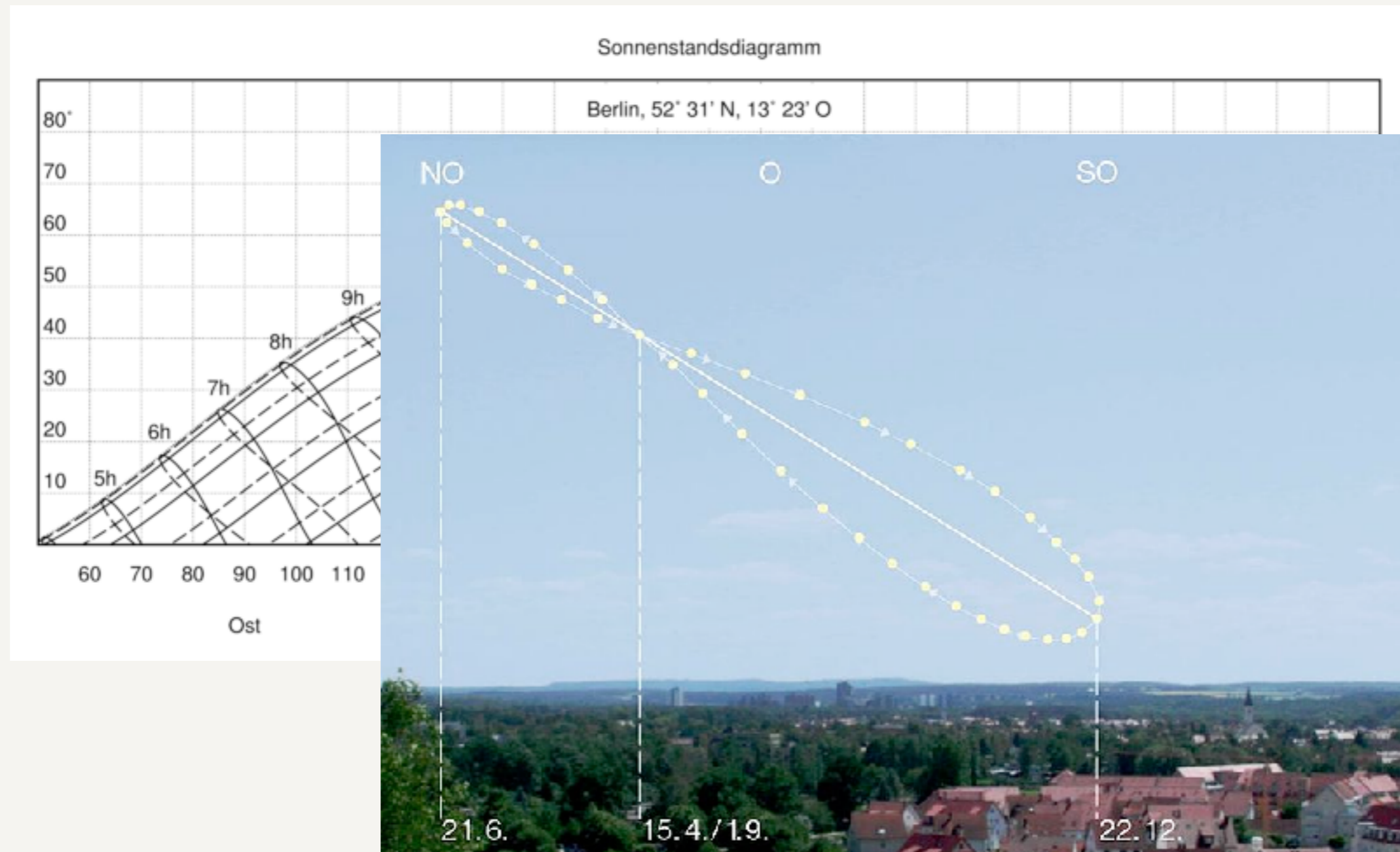
# Referenzspektrum ASTM G173

- American Society for Testing and Materials
- Definiertes Spektrum um verschiedene Solarmodule vergleichen zu können

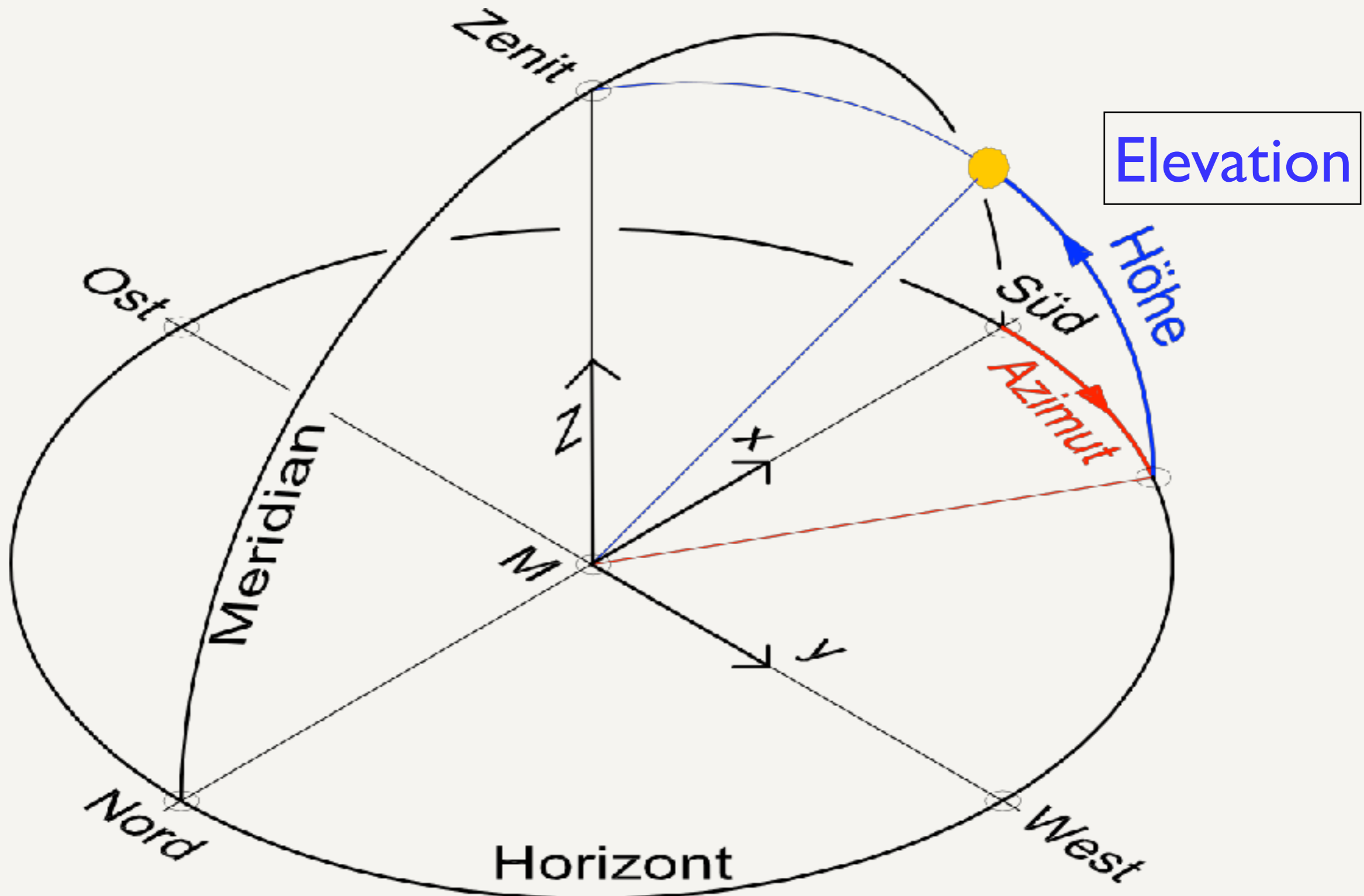


# Sonnenstand

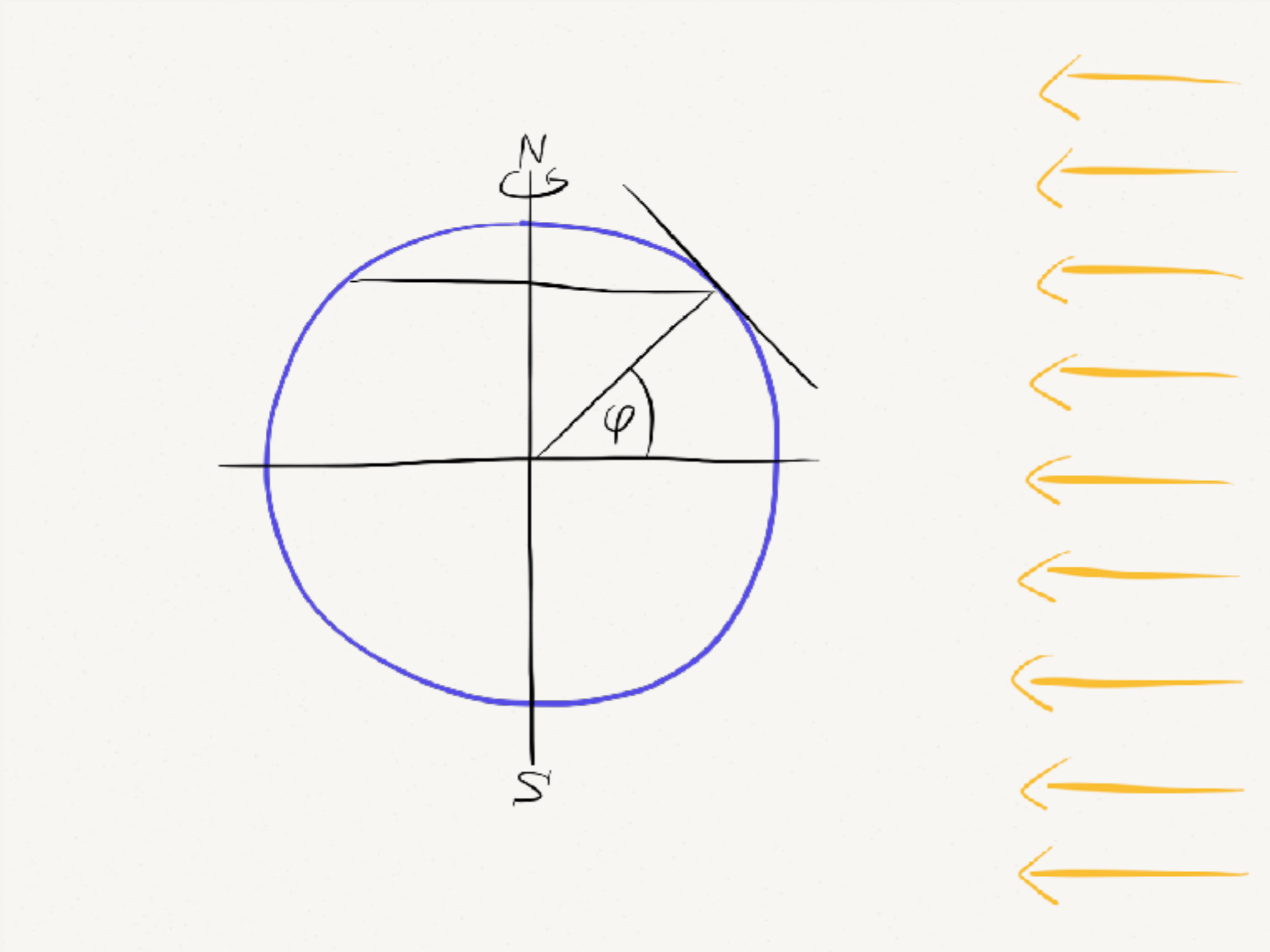
# Sonnenstand im Laufe des Tages und des Jahres



# Elevation und Azimuth



# Deklination



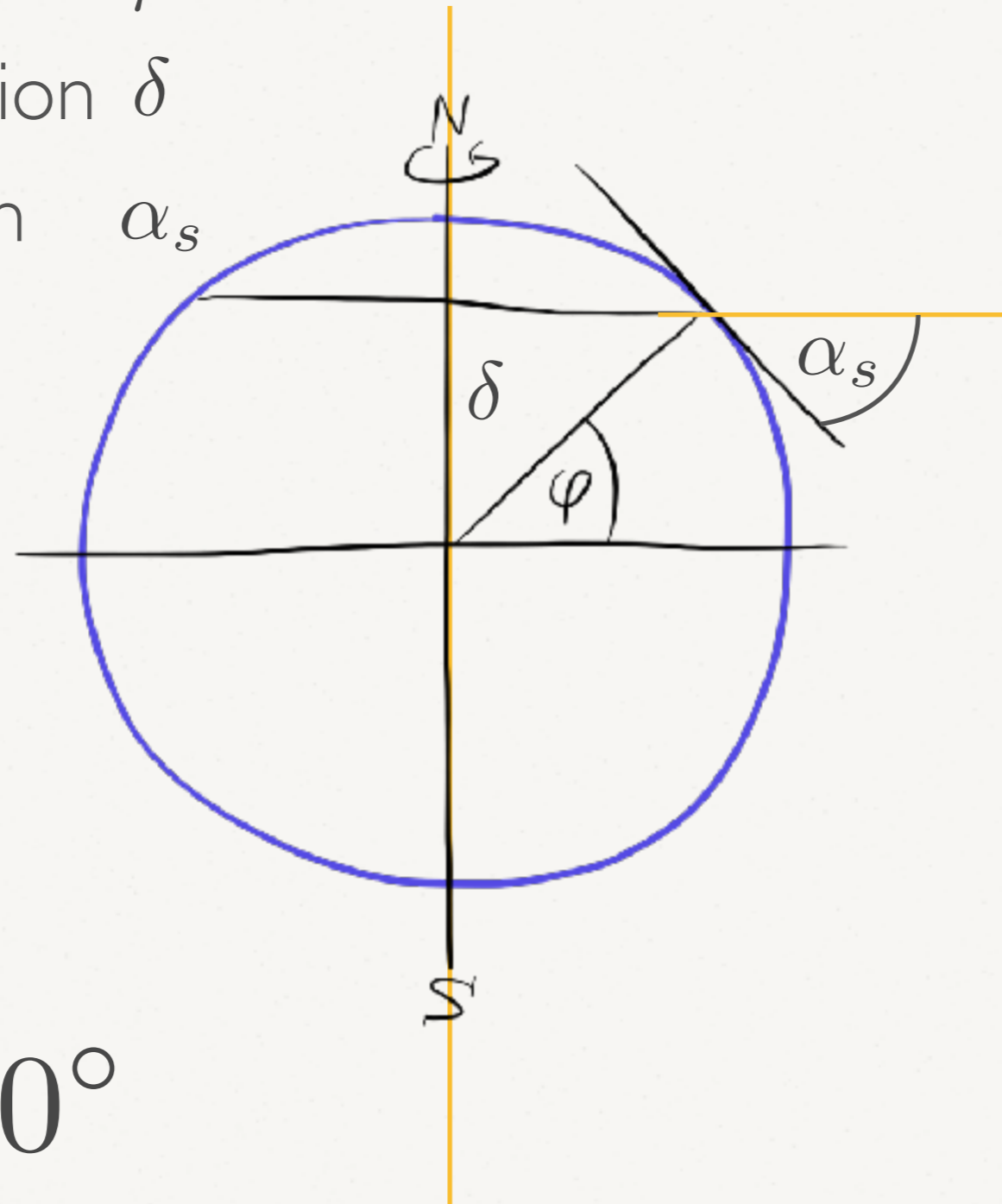


# Deklination

Breitengrad  $\varphi$

Deklination  $\delta$

Elevation  $\alpha_s$



$$\delta = 0^\circ$$

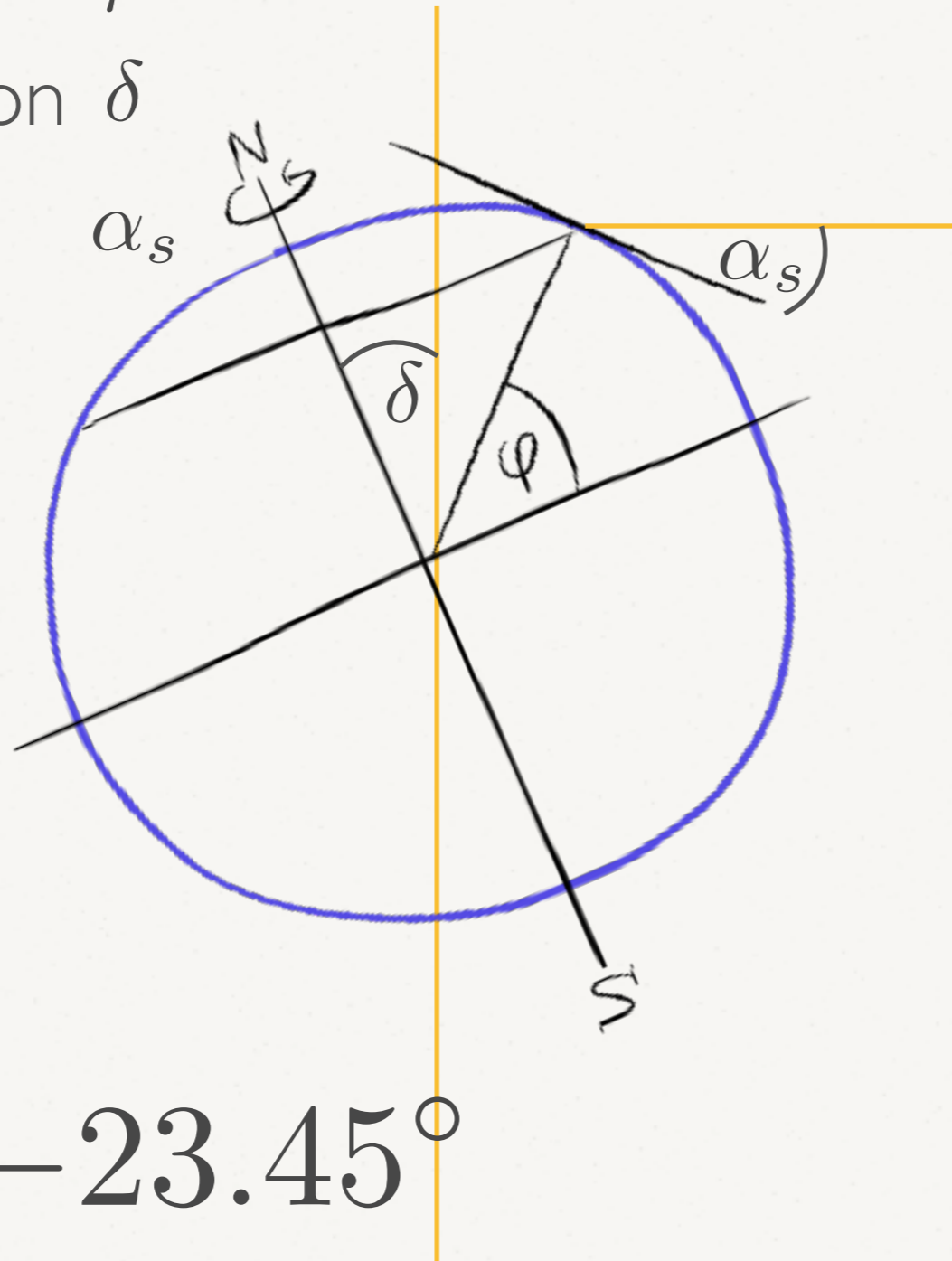


# Deklination

Breitengrad  $\varphi$

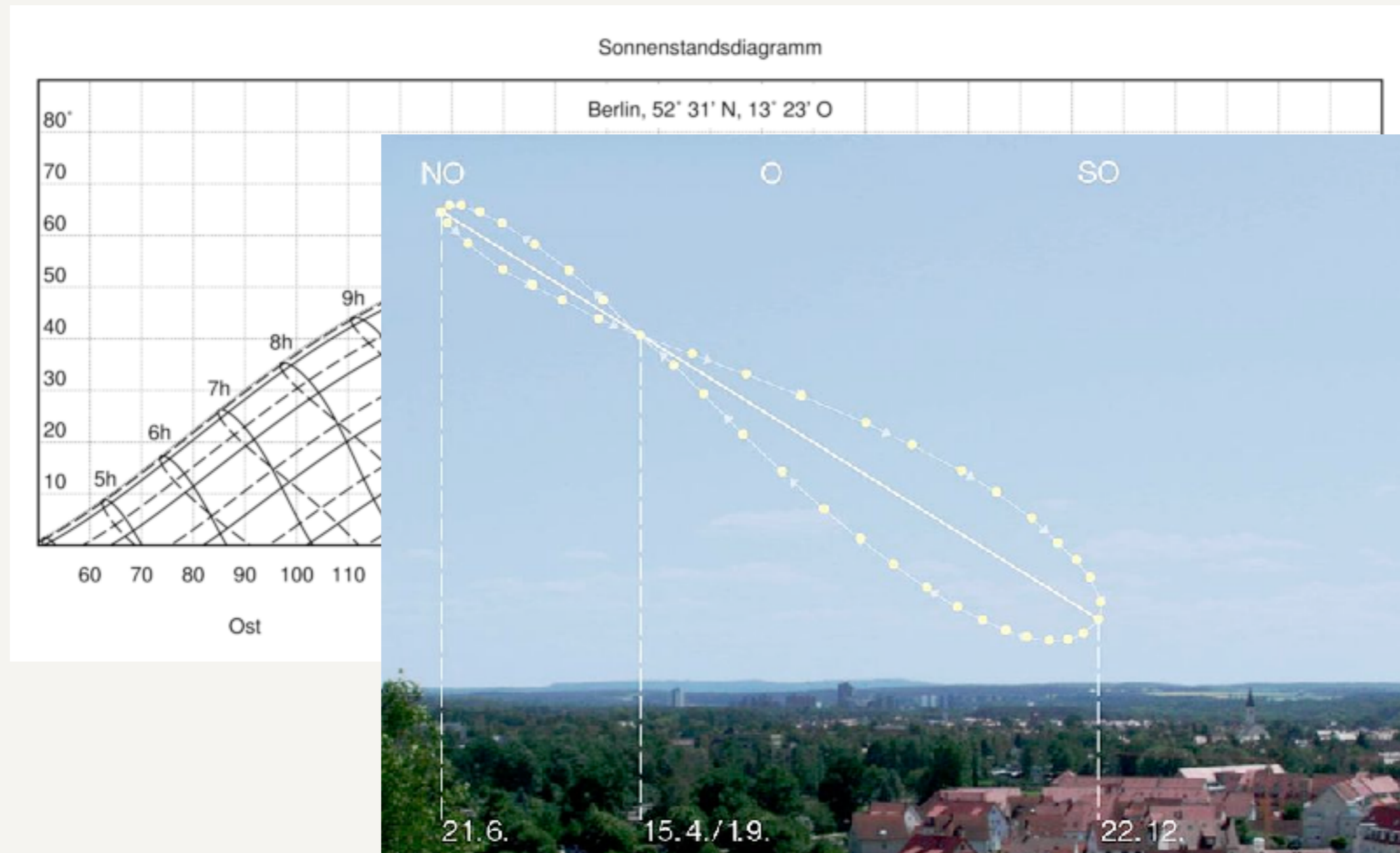
Deklination  $\delta$

Elevation  $\alpha_s$



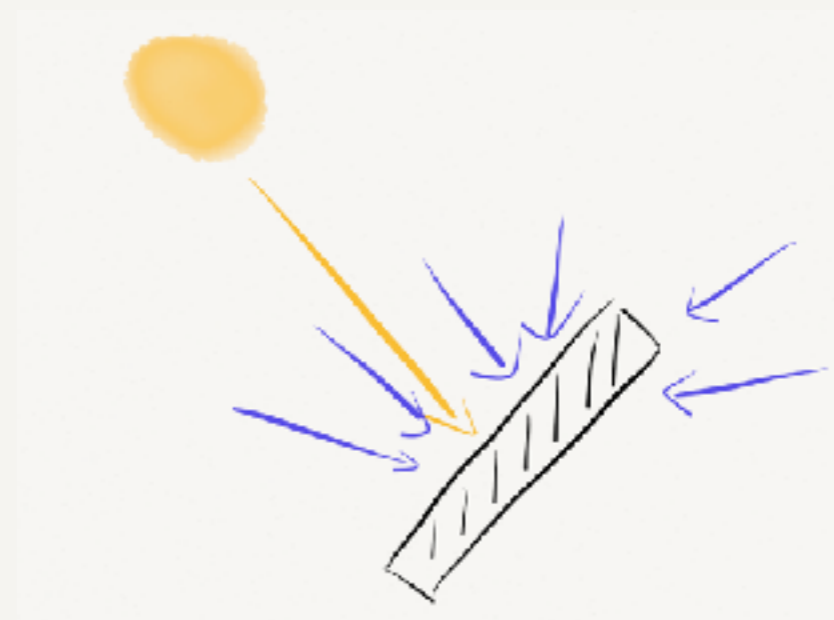
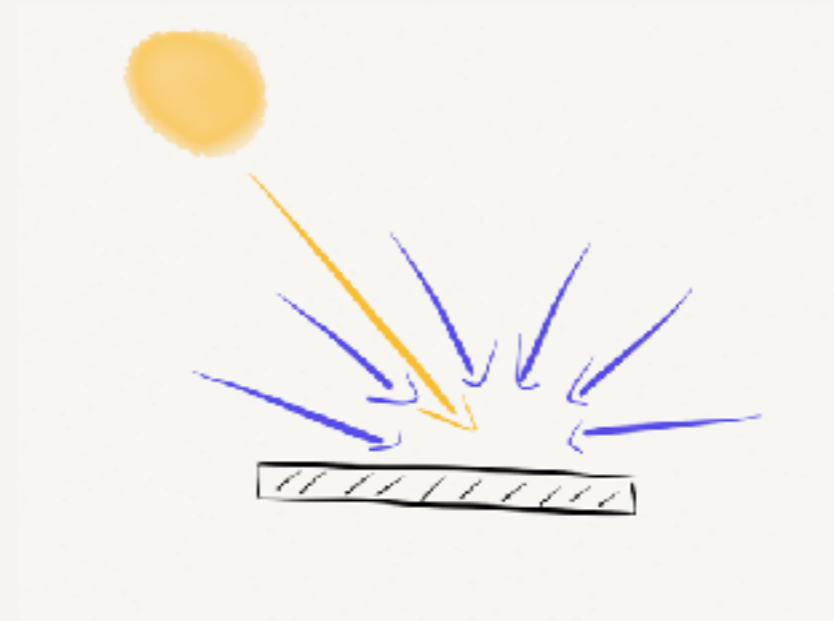
$$\delta = -23.45^\circ$$

# Sonnenstand im Laufe des Tages und des Jahres



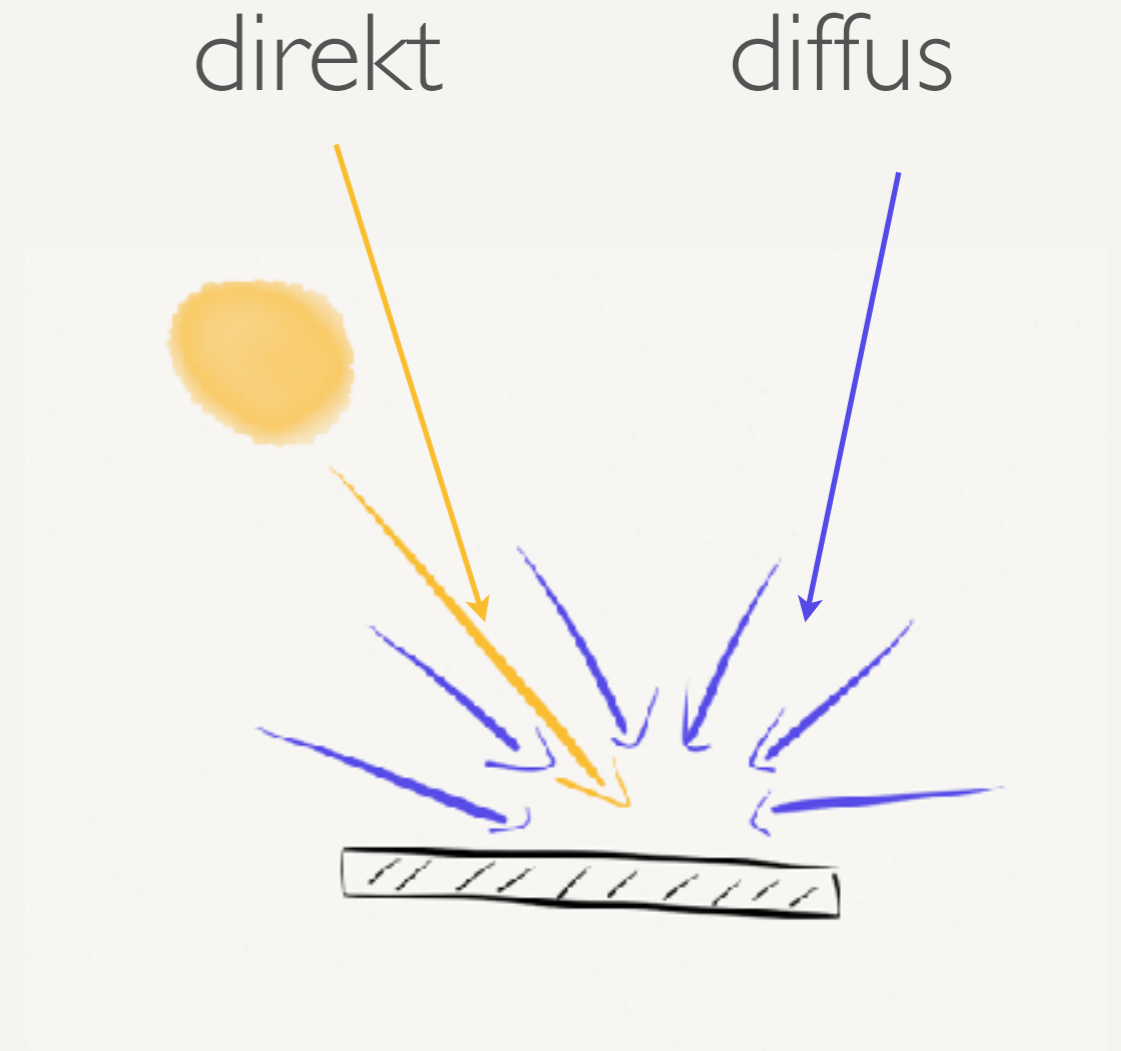
# Messung des Sonnenlichts

- Sonnenlicht-Komponenten
  - Direkt (*Direct normal incidence, DNI*)
  - Diffus
- Detektor
  - Ebener Detektor
  - Aufgestellter Detektor



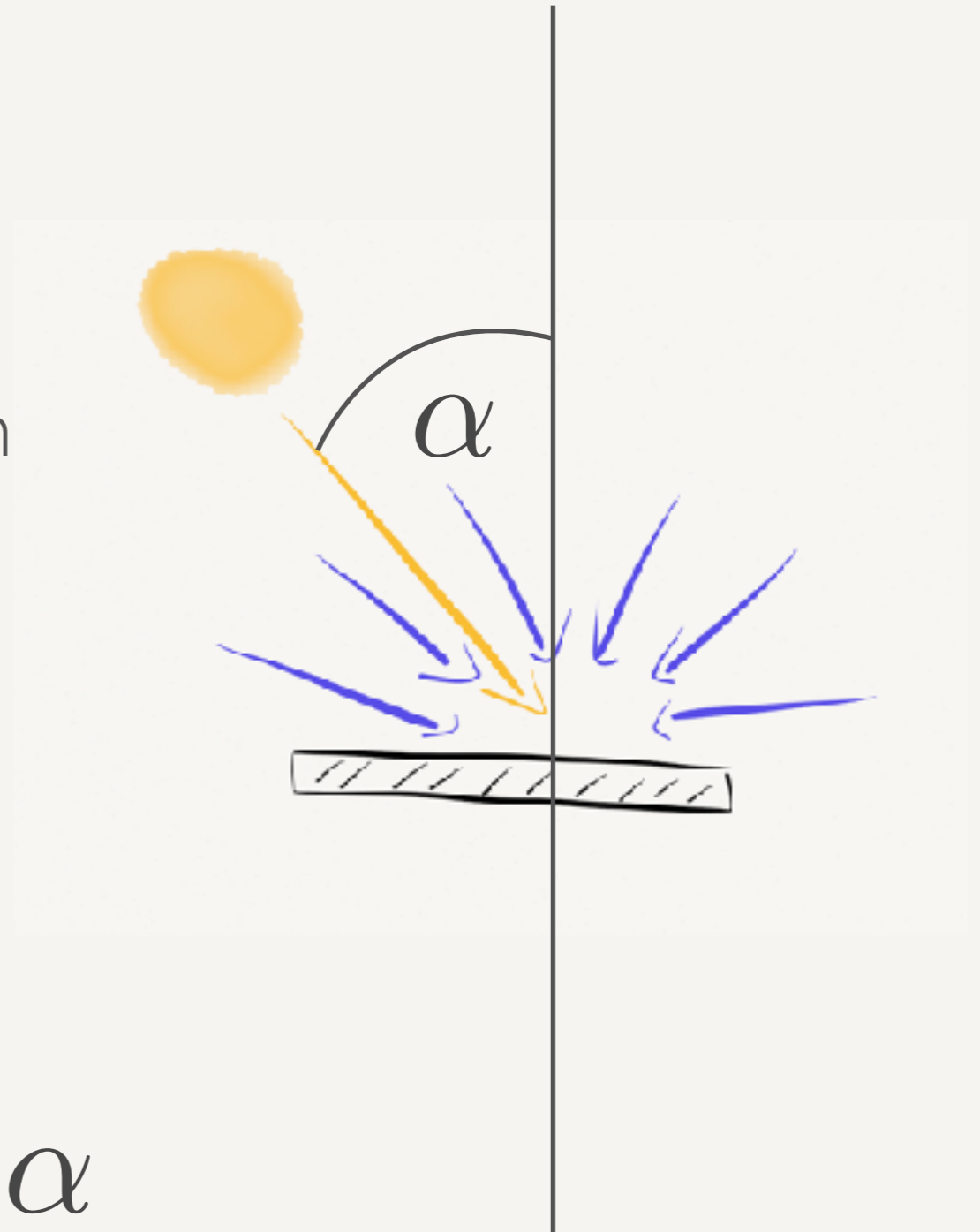
# Messung des Sonnenlichts

- Bei blauem Himmel kommt Licht aus allen Himmelsrichtungen.
- Die Intensität ist in guter Näherung unabhängig von der Blickrichtung.
- Bei Sonnenlichtmessungen wird deswegen in den direkten Anteil und den diffusen Hintergrund unterschieden:
  - Direkt
  - Diffus



# Messung des Sonnenlichts

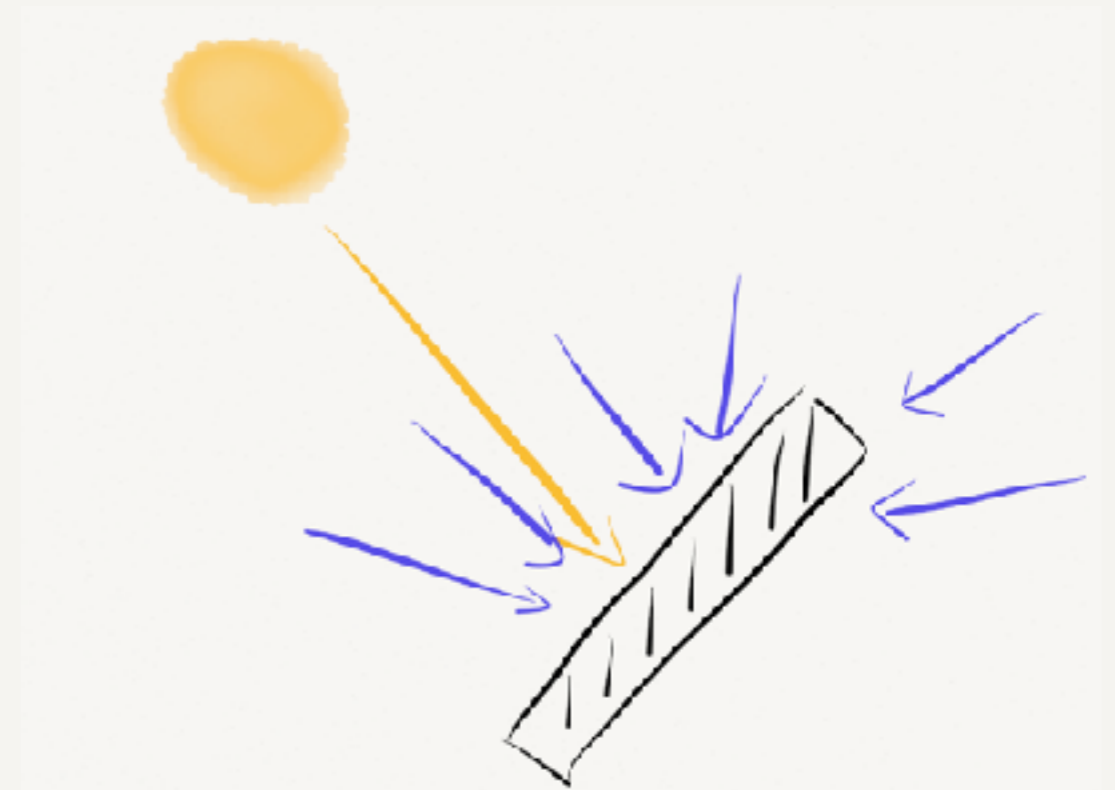
- Bei einem horizontalen Detektor muss der Winkel zwischen der Sonnenrichtung und der Normalen des Detektors berücksichtigt werden.
- Die Komponente der eingestrahlten Leistung wird *Direct Normal Incidence* (DNI) genannt.



$$\text{DNI} = I_0 \cdot \cos \alpha$$

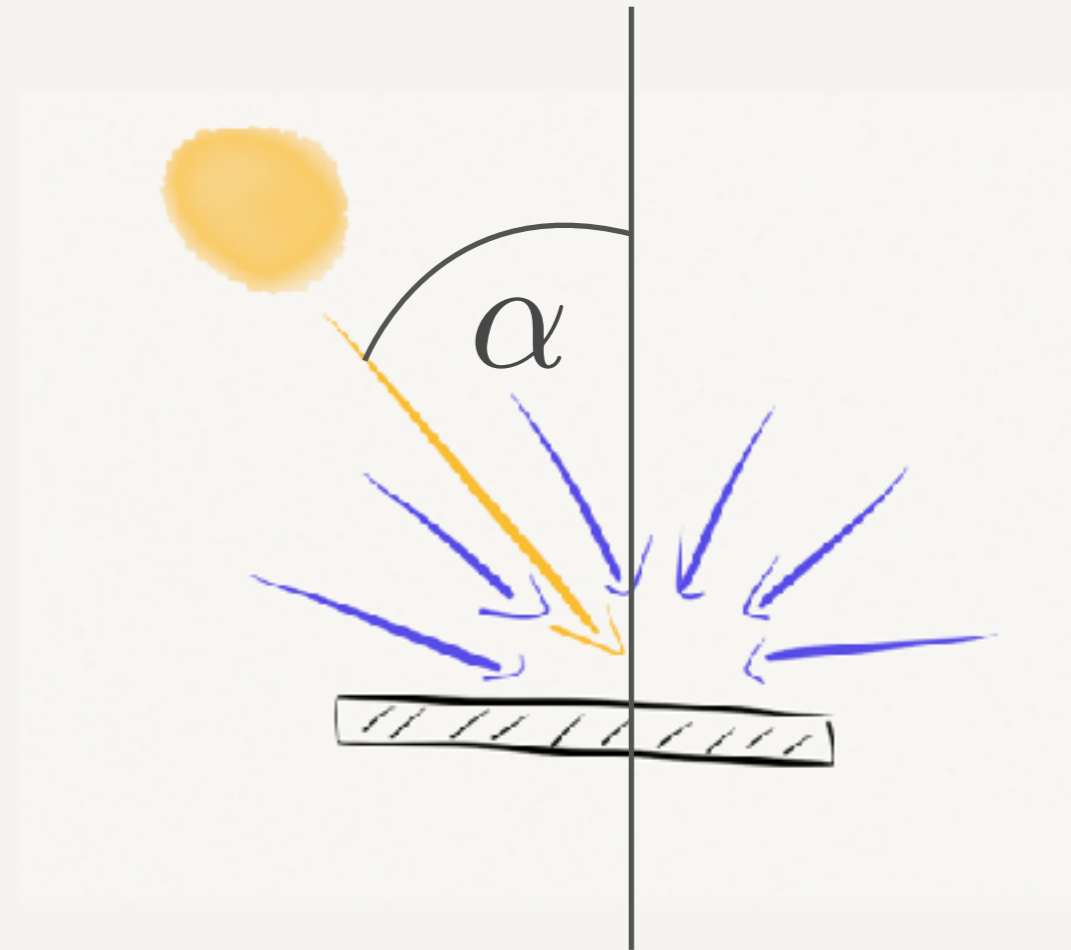
# Messung des Sonnenlichts

- Um die DNI zu erhöhen kann der Detektor angestellt werden.
- Dies erhöht vor allem die Leistung im Winter.
- Dadurch reduziert sich der Anteil der diffusen Strahlung, da ein Teil des Himmels durch das Modul selber verdeckt wird.



# Aufgabe

- Im Sommer steht die Sonne bei uns ca.  $76^\circ$  hoch, im Winter nur noch  $29^\circ$ . Berechnen Sie, wie stark die DNI über das Kosinus-Gesetz reduziert ist.
- Nehmen Sie zwei Fälle an:
  - für eine horizontale Solaranlage und
  - für eine Solaranlage, die auf einem Dach mit einer Neigung von  $30^\circ$  montiert ist.
- Gehen Sie von  $I_0 = 1000 \text{ W/m}^2$  einfallender Sonnenstrahlung aus, und ignorieren Sie die Air mass.



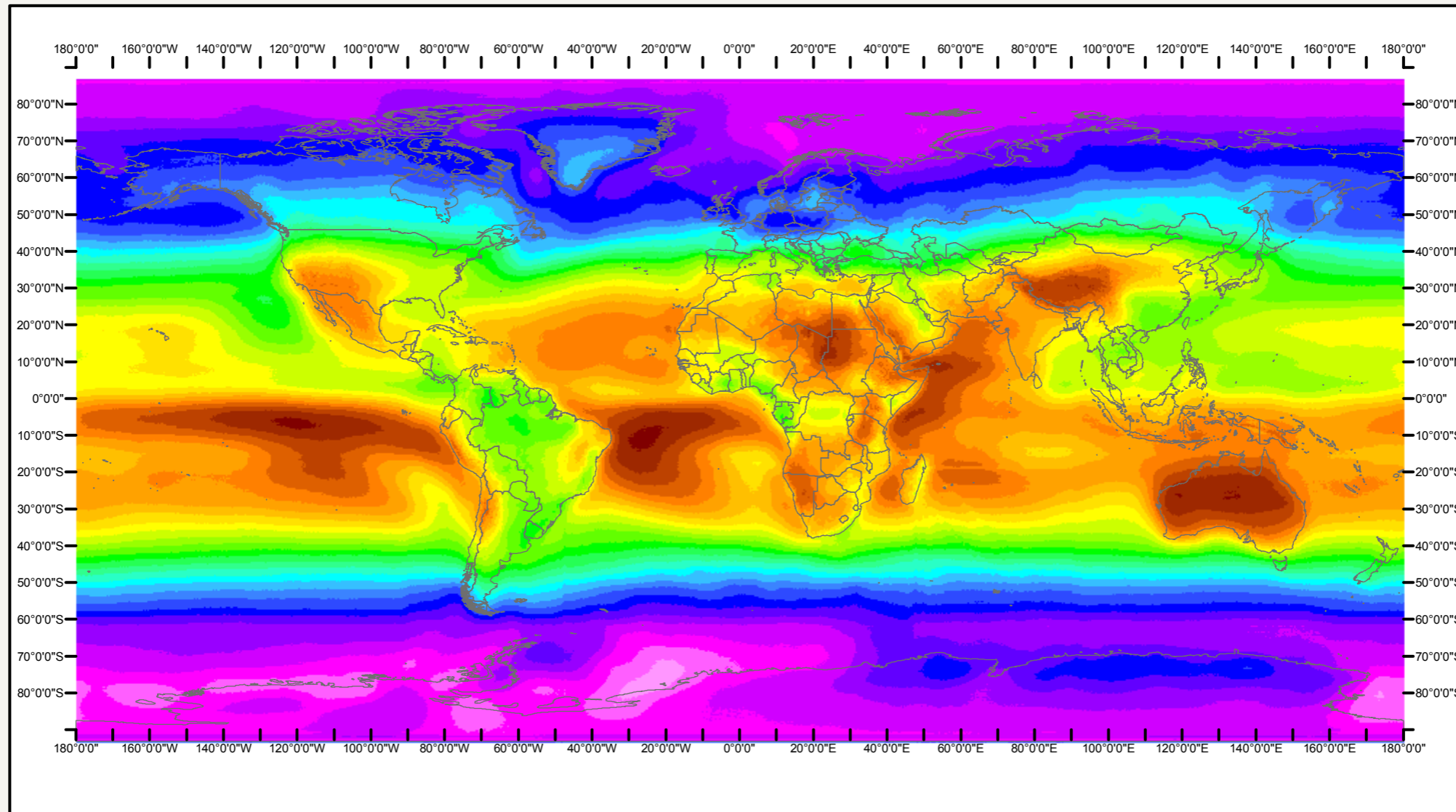
$$\text{DNI} = I_0 \cdot \cos \alpha$$

# Zahlen und Fakten



# Eingestrahlte Leistung

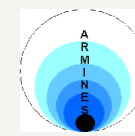
Averaged Solar Radiation 1990-2004



Yearly Mean of Irradiance in W/m<sup>2</sup>



W / m<sup>2</sup>



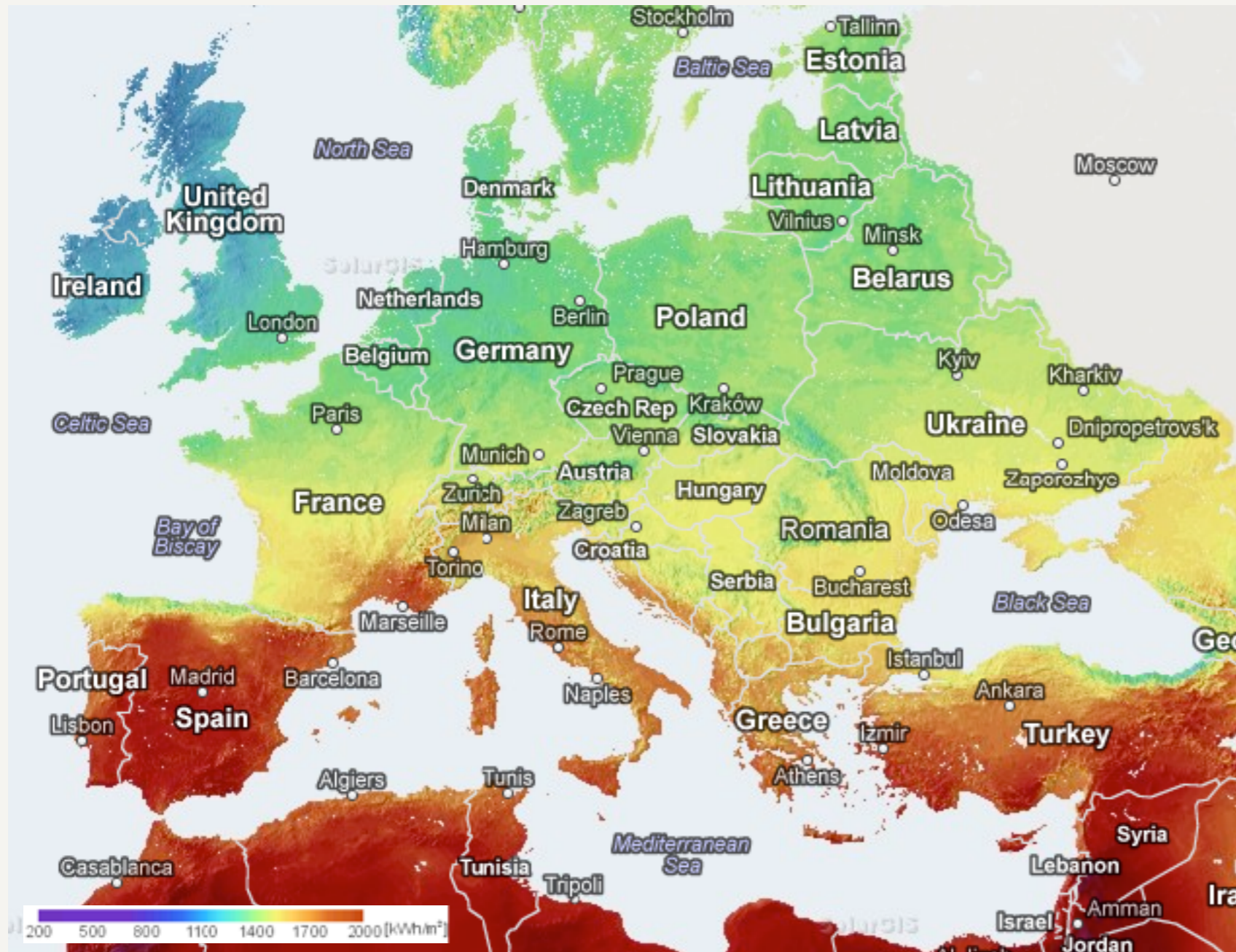
Realized by Michel Albuissou, Mireille Lefèvre, Lucien Wald.  
Edited and produced by Thierry Ranchin. Date of production: 23 November 2006  
Centre for Energy and Processes, Ecole des Mines de Paris / Armines / CNRS  
Copyright: Ecole des Mines de Paris / Armines 2006. All rights reserved.

[http://www.soda-is.com/eng/map/maps\\_for\\_free.html](http://www.soda-is.com/eng/map/maps_for_free.html)

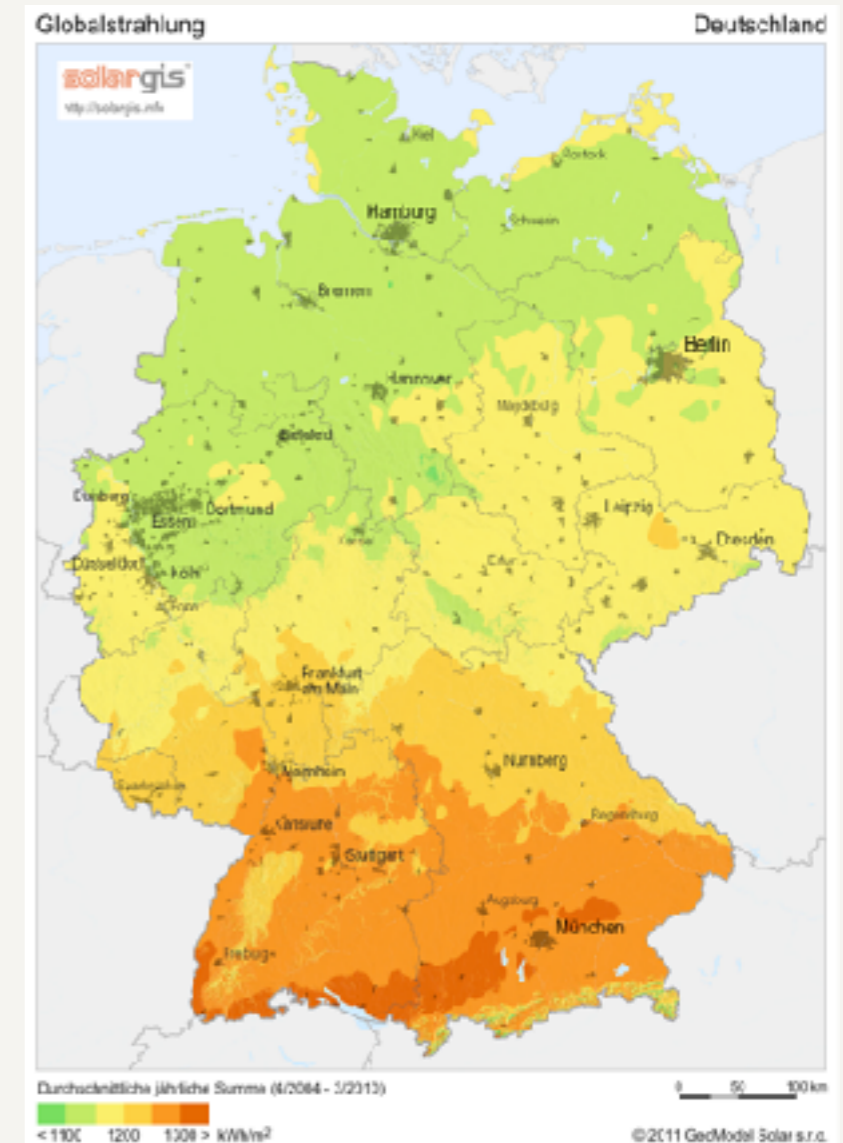
# US Daten

[http://rredc.nrel.gov/solar/old\\_data/nsrdb/1961-1990/  
redbook/atlas/](http://rredc.nrel.gov/solar/old_data/nsrdb/1961-1990/redbook/atlas/)

# Sonnenstrahlung und -Energie



Quelle: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>



Durchschnittliche ‚geerntete‘ Energie  
pro Jahr