

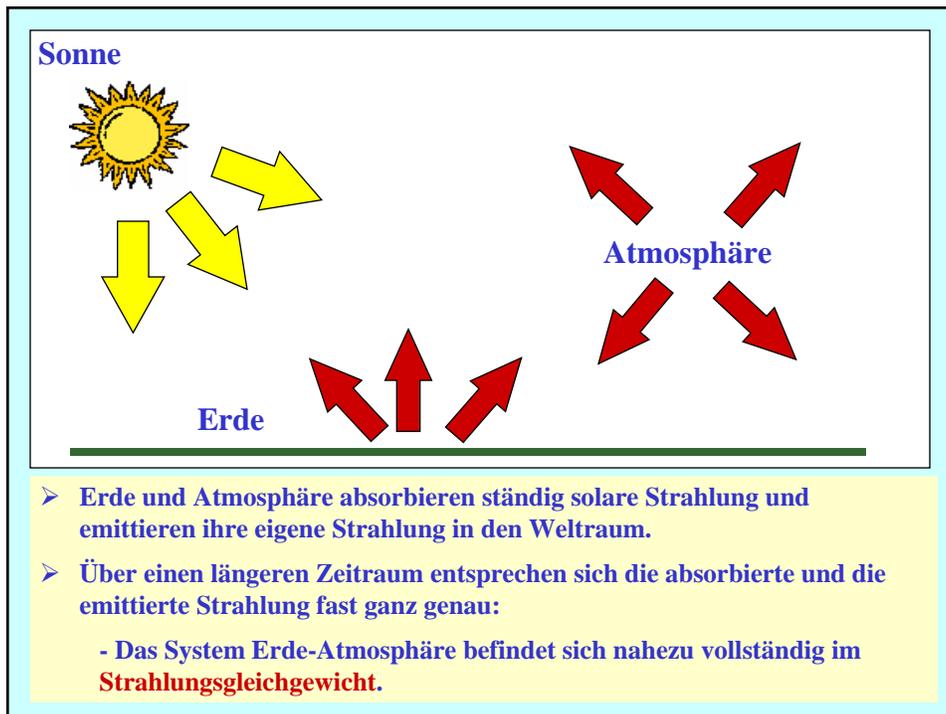
Strahlung und Strahlungsgesetze

Strahlung

- Unter Strahlung versteht man:
 - den Energietransport in Form von **elektromagnetischen Wellen** (elektromagnetische Strahlung), oder
 - den Fluß schnell bewegter Teilchen (**Teilchenstrahlung, Korpuskularstrahlung**).
- Die Teilchenstrahlung aus Ionen, Elektronen, Protonen und Neutronen ist nur in der oberen Atmosphäre (**Thermosphäre und Ionosphäre**) von Bedeutung.

Die elektromagnetische Strahlung

- Der gesamte Energieaustausch zwischen der Erde und dem Weltraum geschieht durch **die elektromagnetische Strahlung**:
 - Sie unterscheidet sich wesentlich von anderen Energietransporten, z. B. dem Transport fühlbarer Wärme,
 - Sie benötigt kein übertragendes Medium.

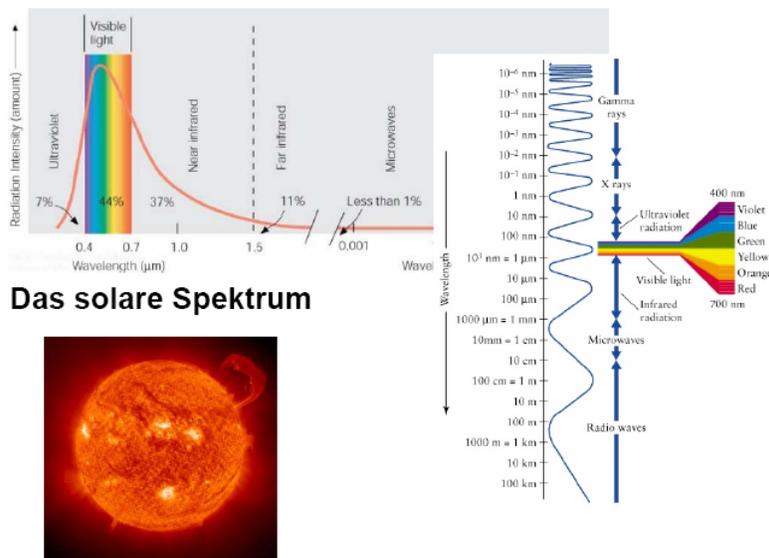


- Erde und Atmosphäre absorbieren ständig solare Strahlung und emittieren ihre eigene Strahlung in den Weltraum.
- Über einen längeren Zeitraum entsprechen sich die absorbierte und die emittierte Strahlung fast ganz genau:
 - Das System Erde-Atmosphäre befindet sich nahezu vollständig im **Strahlungsgleichgewicht**.

Das elektromagnetische Spektrum

- Wenn die elektromagnetische Strahlung aus einer einzigen, ganz bestimmten Wellenlänge besteht spricht man von **monochromatischer (einfarbiger) Strahlung**.
- Im Allgemeinen besteht die elektromagnetische Strahlung aus einer Summierung von verschiedenen Wellenlängen.
- Dabei kann ein ganzer Bereich von Wellenlängen kontinuierlich überdeckt sein.
- Die Gesamtheit aller möglichen monochromatischen Bestandteile der Gesamtstrahlung ergibt das **elektromagnetische (Strahlungs-) Spektrum**.

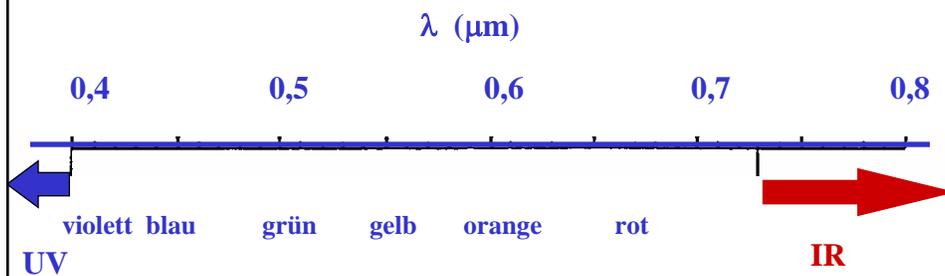
Das elektromagnetische Spektrum



Ausbreitungsgeschwindigkeit

- Die **Ausbreitungsgeschwindigkeit** beträgt für alle elektromagnetische Wellen **im Vakuum** ungefähr $300\,000\text{ km s}^{-1}$ und ist in Luft nur wenig niedriger.
- Unsere Augen reagieren nur auf einen sehr kleinen Teil des elektromagnetischen Spektrums (sichtbarer Bereich des Spektrums, Licht).
- Von diesem Teil des Spektrums kann das Auge bestimmte Wellenlängenbereiche unterscheiden (**Farben**).

Übersicht über den sichtbaren Bereich des Spektrums



Wichtigkeit der Strahlung

- **Der Energietransport durch Strahlung ist von Bedeutung für**
 - den Energieaustausch zwischen der Atmosphäre und der Erdoberfläche
 - den Energieaustausch zwischen den verschiedenen Schichten der Atmosphäre
- **Wichtige chemische Reaktionen in der Atmosphäre laufen nur ab, wenn elektromagnetische Strahlung bestimmter Wellenlänge vorhanden ist.**
 - ein Beispiel ist die Ozonbildung in der Stratosphäre
 - ein anderes Beispiel ist die Photosynthesereaktion

Optische Auswirkungen der Strahlung

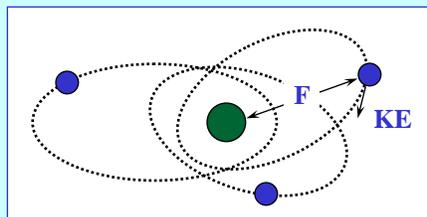
- **Im sichtbaren Bereich der elektromagnetischen Strahlung entsteht**
 - das Himmelsblau,
 - das Erscheinungsbild der Wolken,
 - die Sichtweite usw.

Fernerkundung

- Die **infrarote Strahlung** und die **Mikrowellen**, die von der Erde emittiert sind, werden von den Satelliten aufgefangen.
- Von diesen Daten lassen sich Rückschlüsse auf die Temperaturverteilung in der Atmosphäre ziehen.
- Strahlung in dem Mikrowellenbereich liefert Informationen über die Feuchteverteilung.
- Da man dadurch Informationen über die Atmosphäre erhält, ohne mit ihr in Kontakt zu kommen, spricht man in diesem Zusammenhang von **Fernerkundung (remote sensing)**.

Absorption und Emission von Strahlung durch Moleküle

- **Jedes einzelne Molekül besitzt eine bestimmte Energie**, abgesehen von der Energie, die mit der Bewegung des Moleküls verbunden ist.



- Die **kinetische und elektrostatische potentielle Energie** der Elektronen, die um die Atomkerne kreisen, hat den größten Anteil.

- **Einen geringen Beitrag** zur Gesamtenergie liefern:
 - die Schwingungen der einzelnen Atome im Molekül um deren Mittellagen, und
 - die Rotation des Moleküls um den Schwerpunkt.

- **In der Quantenmechanik** wird gezeigt, daß:
 - nur bestimmte Elektronenbahnen um die Atomkerne erlaubt sind,
 - nur bestimmte Schwingungsfrequenzen und -amplituden erlaubt sind,
 - nur bestimmte Rotationsgeschwindigkeiten für die Moleküle erlaubt sind.

Einige Ergebnisse aus der Quantenmechanik

- Jede mögliche Kombination aus Elektronenbahnen, Schwingung und Rotation kann mit einem bestimmten Energieniveau in Verbindung gebracht werden.
- Dieses Energieniveau entspricht der Summe drei Energiearten.
- Durch **Absorption** bzw. **Emission** von elektromagnetischer Strahlung kann das Molekül zu einem **höheren** bzw. **niedrigeren** Energieniveau übergehen.
- Nach der Quantenmechanik sind nur diskrete Änderungen Energie erlaubt.
- Die Energieänderungen sind bei Absorption und Emission gleich groß.

Eine weitere Aussage der Quantentheorie

- Die elektromagnetische Strahlungsenergie W wird in **diskreten Einheiten (Photonen)** übertragen, d.h.

$$W = h\nu$$

$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} =$ Planckscher Konstante

$\nu =$ Frequenz der Strahlung

- Die Frequenz entspricht der **Zahl der Wellen**, die einen bestimmten Punkt in einer Sekunde durchlaufen.

Frequenz – Wellenlänge Beziehung

- Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Strahlung ist gleich der **Lichtgeschwindigkeit** c^* .
- Die **Frequenz** ν und **Wellenlänge** λ sind durch folgende Beziehung verknüpft.

$$\nu = \frac{c^*}{\lambda}$$

$$W = h\nu \quad \longrightarrow \quad W = h \frac{c^*}{\lambda}$$

- Je kleiner die Wellenlänge der Strahlung, desto höher ist also die Energie der Photonen.

Linienspektren

- Ein einzelnes Moleküle kann nur diskrete Energiemengen absorbieren, bzw. emittieren.
- Deshalb kann es auch nur mit Strahlung bestimmter, diskreter Wellenlängen wechselwirken.
- Dabei entsteht das **Linienspektrum** eines Gases.
- Das Linienspektrum besteht aus schmalen Absorptions- oder Emissionslinien.
- Nach der **Unschärferelation von Heisenberg** ist es unmöglich, Ort und Geschwindigkeit eines Teilchens zu bestimmen.
- Die Absorptionslinien haben daher eine bestimmte Breite.
- Derartige Linienspektren haben jedoch nur einatomige Gase.

Bandspektren

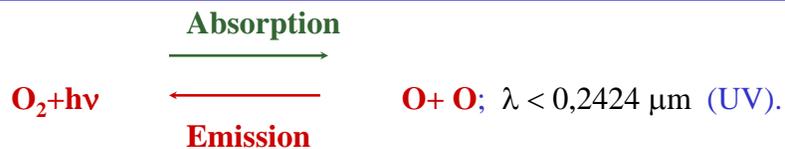
- **Flüssigkeiten und Festkörper haben Bandspektren ->**
- Absorption und Emission findet über einen kontinuierlichen Wellenlängenspektrum statt.
- Dies tritt wegen der starken Wechselwirkungen zwischen der Kräftefeldern der einzelnen Moleküle.
- Auch bei mehratomigen Gasen beobachtet man **Absorptions - bzw. Emissions-banden**, die jedoch die Wellenlängenbereiche nicht kontinuierlich überdecken, sondern eine Gruppe von sehr vielen Spektrallinien sind.

- Im allgemeinen, sind Änderungen der Elektronenbahnen bei Absorption bzw. Emission mit Röntgenstrahlung, UV- oder sichtbaren Strahlung verknüpft
 - z. B. gelbes Licht wird beim Erhitzen von Natriumverbindungen abgestrahlt.
- Nahes IR-Strahlung ist mit Änderungen der Schwingungsfrequenz verknüpft, und
- IR bzw Mikrowellen sind mit Änderungen der Rotation verknüpft, obwohl es sich hier um nur kleine Energiemengen handelt.

- Die Energieübergänge können in **molekularen Gasen** durch beliebige Kombinationen der drei verschiedenen Energiearten zustandekommen:
 - Energieniveau der Elektronen
 - Schwingungsenergie
 - Rotationsenergie
- Für den **Strahlungshaushalt des Systems Erde-Atmosphäre** sind die Absorptions- bzw. Emissionsbanden der Gase, **CO₂**, **H₂O** und **O₃** sehr wichtig.
- Die **O₂**- und **N₂**-Moleküle können nicht auf diese Weise mit der Strahlung wechselwirken, so daß deren Bandenspektren im solaren und terrestrischen Wellenlängenbereich nur sehr wenige oder keine Linien aufweisen.

Photochemische Reaktionen

- Es gibt noch weitere Prozesse, bei denen Strahlung durch Moleküle absorbiert bzw. emittiert werden kann.
- Photochemische Reaktionen:
- Durch **Absorption von Strahlung** (entspricht Energiezufuhr) kann ein Molekül in seine atomaren Bestandteile auseinanderbrechen.
- Instabile Atome können unter Emission von Strahlung (entspricht Energiefreisetzung) ein stabileres Molekül bilden, z. B.



- Photochemische Reaktionen laufen ab, wenn die Wellenlänge λ einen bestimmten Schwellenwert unterschreitet:
- Dann haben die Photonen genügend Energie.
Dies passiert in der Atmosphäre im sichtbaren und im UV-Bereich.
- **Photoionisation:**
- Strahlung mit sehr kleinen Wellenlängen kann die Atome ionisieren
- Wellenlängen meist kleiner als $0,1 \mu\text{m}$
- Solche Photonen haben dann so große Energien, daß die äußeren Elektronen "losgelöst" werden.

Definition von Strahlungsgrößen

- Zur Beschreibung der Strahlung werden (verwirrend) viele Größen verwendet.
- Die Definitionen der Strahlungsgrößen sind in den nächsten Bildern zusammengefaßt.

Strahlungsenergie Q

- **Radiant energy**
- **Einheit** $J = Ws$
- **Menge** der emittierten, transmittierten oder absorbierten Strahlungsenergie.

Strahlungsfluß, Strahlungsleistung Φ

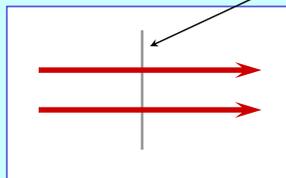
$$\Phi = \frac{dQ}{dt}$$

- **Radiant flux**
- **Einheit** W
- Pro Zeiteinheit emittierte, transmittierte oder absorbierte Strahlungsenergie.

Strahlungsflußdichte E

$$E = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{d^2Q}{dAdt}$$

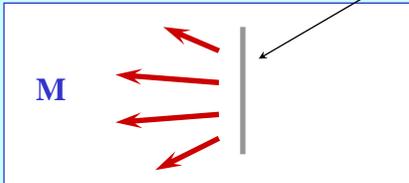
- **Radiant flux density**
- **Einheit** Wm^{-2}
- Strahlungsenergie, die pro Zeiteinheit ein Flächenelement durchquert.



(spezifische) Ausstrahlung M

$$M = \frac{d\Phi}{dA}$$

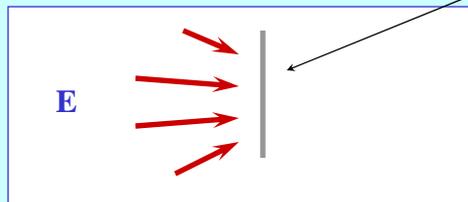
- **Radiant exitance**
- **Einheit** Wm^{-2}
- **Strahlungsenergie, die pro Zeiteinheit ein Flächenelement emittiert wird.**



Bestrahlungsstärke E

$$E = \frac{d\Phi}{dA}$$

- **irradiance**
- **Einheit** Wm^{-2}
- **Strahlungsenergie, die pro Zeiteinheit auf ein Flächenelement einfällt.**



Strahlungsdichte Λ

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dA \cos\theta}$$

- **radiance**
- **Einheit** $\text{Wm}^{-2} \text{Sr}^{-1}$
- **Strahlungsenergie, die pro Zeiteinheit senkrecht durch ein Flächenelement in ein Raumwinkelement geht oder von diesem kommt.**

Bestrahlung H

$$H = \frac{dQ}{dA} = \int_{t_1}^{t_2} E dt$$

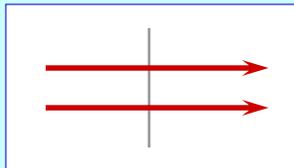
- **radiant exposure**
- **Einheit** Jm^{-2}
- **Summe der Strahlungsenergie, die in einem bestimmten Zeitraum auf ein Flächenelement einfällt.**

Strahlungsstärke, Intensität I

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

- **radiant intensity**
- **Einheit** WSr^{-1}
- **Strahlungsenergie, die pro Zeiteinheit von einer punktförmigen Quelle emittiert wird.**

- **In diesem Kurs wird am häufigsten die sogenannte "Strahlungsflußdichte" (= Strahlungsfluß pro Flächeneinheit) verwendet (Wm^{-2}).**
- **Die Strahlungsflußdichte ist die Energiemenge, die eine bestimmte Flächeneinheit (z. B. 1 m^2) in einer bestimmten Zeiteinheit (z. B. 1 s) durchsetzt.**



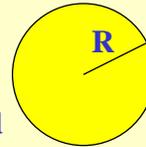
Achtung: Manche Autoren bezeichnen auch die Strahlungsflußdichte als Strahlungsfluß!

Unterschied zwischen Strahlungsfluß und Strahlungsflußdichte

- Ein Beispiel soll den Unterschied verdeutlichen:
- Der solare Strahlungsfluß beträgt ungefähr $3,90 \times 10^{26} \text{ W}$.
- Angenommen ein Sonnenradius von $R = 7 \times 10^8 \text{ m}$



Radius der sichtbaren "Sonnenscheibe"



- die emittierte Strahlungsenergie pro Zeit- und Flächeneinheit, (die solare **Strahlungsflußdichte E** bzw. für die Ausstrahlung der Sonne)

$$E = \frac{3,90 \times 10^{26} \text{ W}}{4\pi (7 \times 10^8)^2 \text{ m}^2} = 6,34 \cdot 10^7 \text{ Wm}^{-2}$$

Wellenlängenabhängigkeit

- In den Definitionen der Strahlungsgrößen wurde keine Rücksicht auf die **spektrale Verteilung** (Wellenlängenabhängigkeit) der Strahlung genommen.
- Die spektralen Größen erhält man, indem man sie auf das (differentielle) Wellenlängenintervall $d\lambda$ bezieht.
- Dem Formelzeichen wird dann der Index λ hinzugefügt.
- Es gibt zwischen der spektralen Strahlungsflußdichte E_λ und der Strahlungsflußdichte E die Beziehung

$$E_\lambda = \frac{dE}{d\lambda}$$

Umgekehrt ergibt sich durch Integration E_λ von über alle Wellenlängen wieder die gesamte Strahlungsflußdichte E :

$$E = \int_0^{\infty} E_\lambda d\lambda$$

Wenn man E_λ in Abhängigkeit von λ zeichnet, ist die Fläche unter der Kurve gleich der Strahlungsflußdichte E .

Strahlungsmessung

- Zur Messung der Strahlungsintensität gibt es mehrere Methoden:
 - **Pyrheliometern**
 - **Pyranometern**
- In **Pyrheliometern** wird die einfallende direkte Sonnenstrahlung von geschwärzten Empfangsflächen absorbiert.
- Die dabei produzierte Strahlungswärme führt zu einer Temperaturerhöhung des Strahlungsempfängers, die mit Thermoelementen gemessen wird.

- Das **Pyranometer** zur Messung der Globalstrahlung (Summe aus direkter, gestreuter und an der Erdoberfläche reflektierter Sonnenstrahlung) besteht aus einer geschwärzten Säule mit hintereinander geschalteten Thermoelementen.
- Die geschwärzten Empfangsflächen der aktivierten Lötstellen absorbieren die einfallende Strahlung und erwärmen sich gegenüber den "kalten" Lötstellen.
- Die Temperaturdifferenzen erzeugen Thermospannungen, die ein Maß für die empfangene Strahlung sind.
- Eine halbkugelförmige Glashaube schützt die Meßfühler gegen Witterungseinflüsse.

Schwarzkörperstrahlung

- Ein **schwarzer Körper** ist ein **hypothetischer Körper**, der **aus Molekülen besteht**, die in allen Teilen des elektromagnetischen Spektrums Strahlung absorbieren und emittieren, so daß:
 - alle einfallende Strahlung vollständig absorbiert wird (daher die Bezeichnung "schwarz") und
 - für alle Wellenlängen und in alle Richtungen die größtmögliche Emission erreicht wird.

Der Planck'schen Gesetz

- Die Menge der Strahlung, die von einem schwarzen Körper emittiert wird, hängt allein von der Temperatur des schwarzen Körpers ab.
- Das Gesetz besagt, daß für die spektrale Ausstrahlung (Emission) eines schwarzen Körpers der Temperatur T gilt

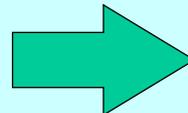
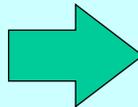
$$E_{\lambda}^* = \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2 / \lambda T) - 1]}$$

$c_1 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ Wm}^2$

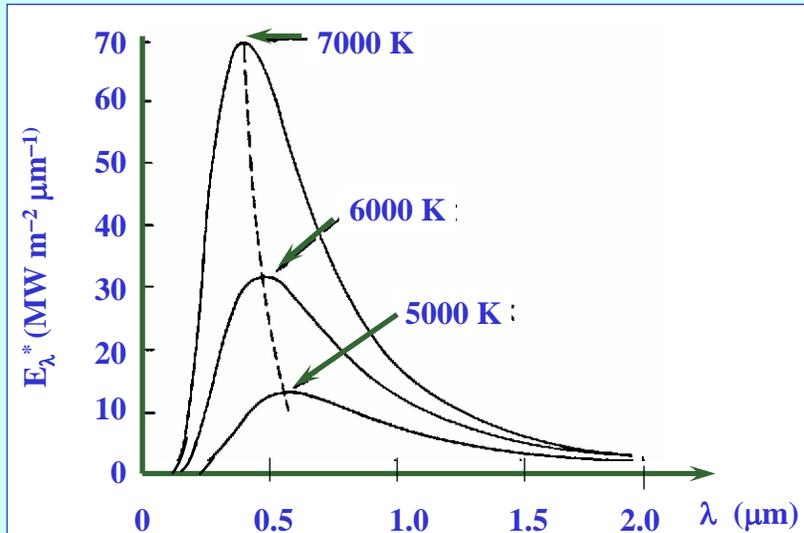
$T \text{ in } ^\circ\text{K}$

$c_2 = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ mK}$

- Schwarzkörperstrahlung ist isotrop, d.h. die Strahlung ist unabhängig von der Richtung.
- Das nächste Bild zeigt E_{λ}^* als Funktion von λ für verschiedene Temperaturen:



Emissionsspektren für Schwarzkörper mit den angegebenen Temperaturen



Wien'sches Verschiebungsgesetz

Der Exponentialterm in $E_{\lambda}^* = \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2 / \lambda T) - 1]}$

ist bei fast allen Wellenlängen (abgesehen vom langwelligen Ende der Kurven) wesentlich größer als 1:

$$\rightarrow E_{\lambda}^* \approx c_1 \lambda^{-5} \exp(-c_2 / \lambda T)$$

$$\rightarrow \frac{dE_{\lambda}^*}{d\lambda} \approx c_1 \lambda^{-5} \exp(-c_2 / \lambda T) [-6\lambda^{-1} + c_2 / \lambda^2 T]$$

$$\rightarrow \lambda_m = \frac{2897}{T}$$

die Wellenlänge λ_m , bei der die Emission eines schwarzen Körpers der Temperatur T maximal ist (λ_m in μm und T in $^{\circ}\text{K}$)

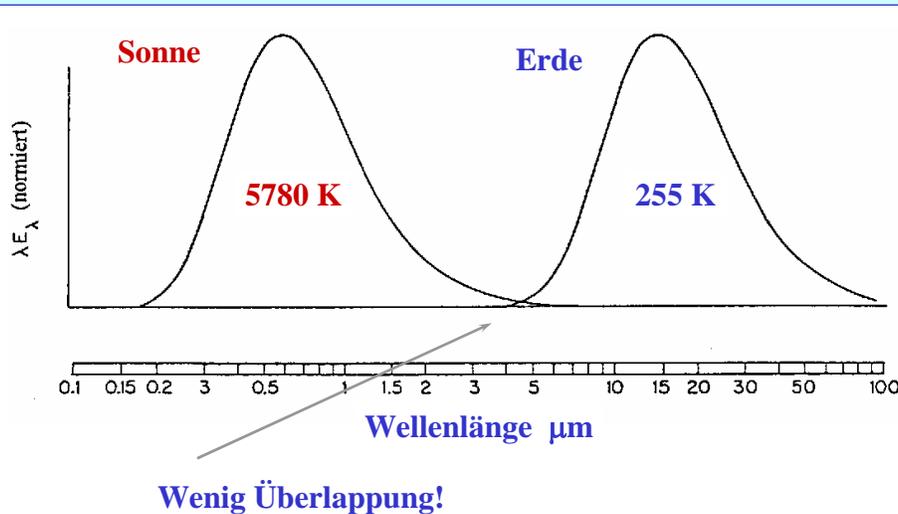
das Wien'sche Verschiebungsgesetz

$$\lambda_m = \frac{2897}{T} \quad \rightarrow$$

- Das Maximum der Emissionsenergie verschiebt sich mit steigender Temperatur zu kürzeren Wellenlängen, (gestrichelte Linie im letzten Diagramm).
- Mit Hilfe des Wien'schen Verschiebungsgesetzes läßt sich die Temperatur einer Strahlungsquelle abschätzen, wenn ihr Emissionsspektrum bekannt ist.
- **Beispiel:**
- Aus $\lambda_{m, \text{Sonne}} = 0,475 \mu\text{m}$ (entspricht blauem Licht) folgt $T_{\text{Sonne}} = 6100 \text{ K}$.

- Die Sonne erscheint wegen der Asymmetrie des Schwarzkörperspektrums nicht blau sondern gelb - >
- mehr Strahlung wird bei größeren Wellenlängen emittiert!
- Sterne, die kälter als die Sonne sind, emittieren die maximale Strahlung bei größeren Wellenlängen (d.h. sie erscheinen rötlicher) und umgekehrt.
- Es folgt aus dem Wien'schen Verschiebungsgesetz, daß sich die solare Strahlung auf den **ultravioletten, sichtbaren und nahen infraroten** Bereich beschränkt.
- Die Erde und Atmosphäre emittieren fast ausschließlich im **infraroten** Bereich.
- Diese Trennung wird im nächsten Bild deutlich, wo die normierten Schwarzkörperkurven für $T = 5780 \text{ K}$ und $T = 255 \text{ K}$ aufgetragen sind.

Normierte Schwarzkörperspektren für die Sonne und die Erde



Stefan-Boltzmannsches Gesetz

Wenn man man $E_\lambda^* = \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2 / \lambda T) - 1]}$

integriert über alle Wellenlängen, erhält man die von einem schwarzen Körper pro Zeit- und Flächeneinheit emittierte Strahlungsenergie

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

Stefan-Boltzmannsches Gesetz

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

Stefan-Boltzmann-Konstante

Effektive Strahlungstemperatur der Sonne

- Wir haben schon die Strahlungsenergie berechnet, die pro Zeit- und Flächeneinheit die äußerste Schicht der Sonne durchsetzt: $E = 6,34 \times 10^7 \text{ Wm}^{-2}$.
- Daraus läßt sich die **effektive Strahlungstemperatur** T_E dieser Schicht berechnen:
- d.h. die Temperatur, die ein schwarzer Körper haben müßte, um die gleiche Strahlungsenergie emittieren zu können:

$$T_E = \left(\frac{E}{\sigma}\right)^{1/4} = \left(\frac{6,34 \times 10^7}{5,67 \times 10^{-8}}\right)^{1/4} \text{ K} = 5780 \text{ K}$$

Thermische (Infrarote) Strahlung



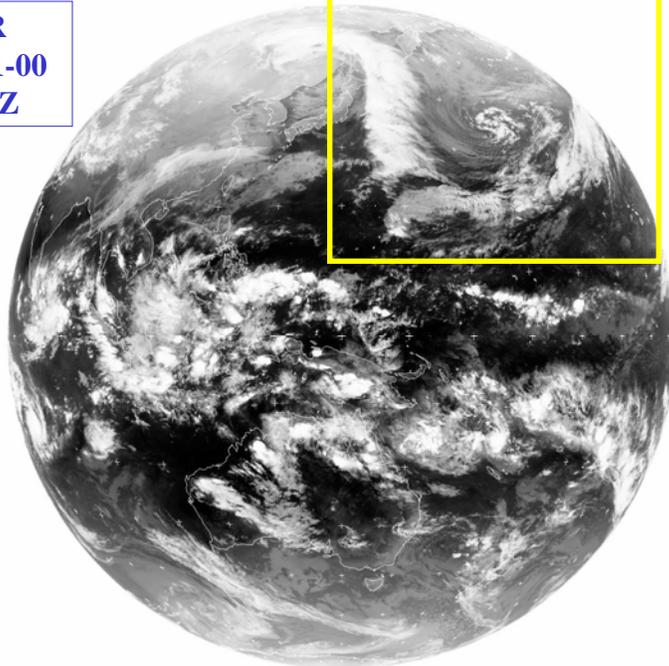
je wärmer ein Körper

- desto intensiver ist die emittierte Strahlung thermische Ausstrahlung (Stefan-Boltzmann-Gesetz)
- desto kürzer ist die Wellenlänge der emittierten Strahlung (Planck-Gesetz)

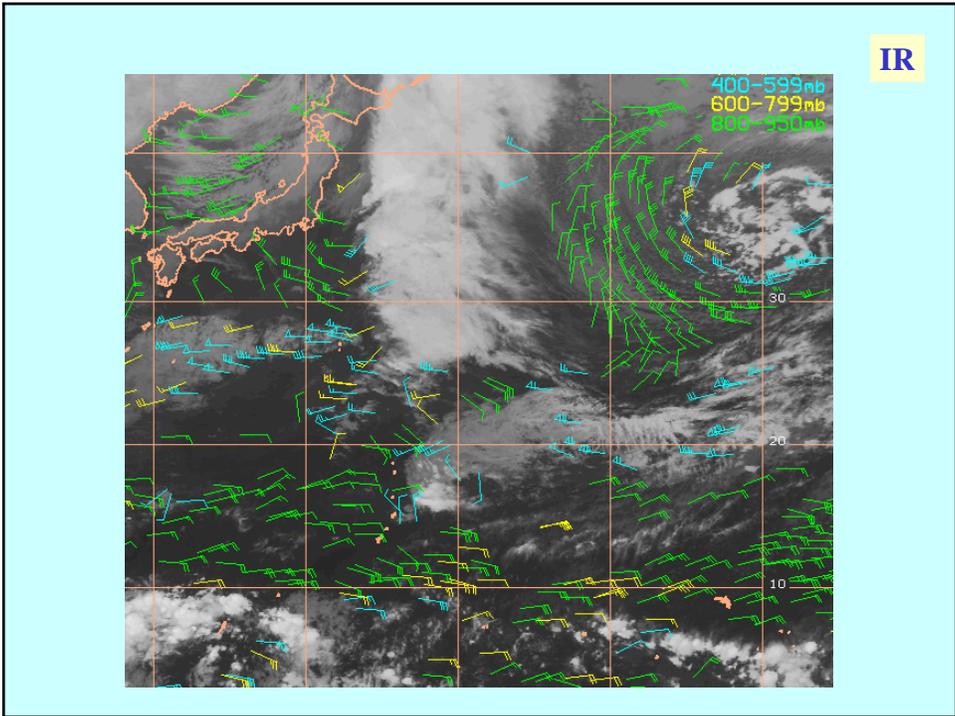
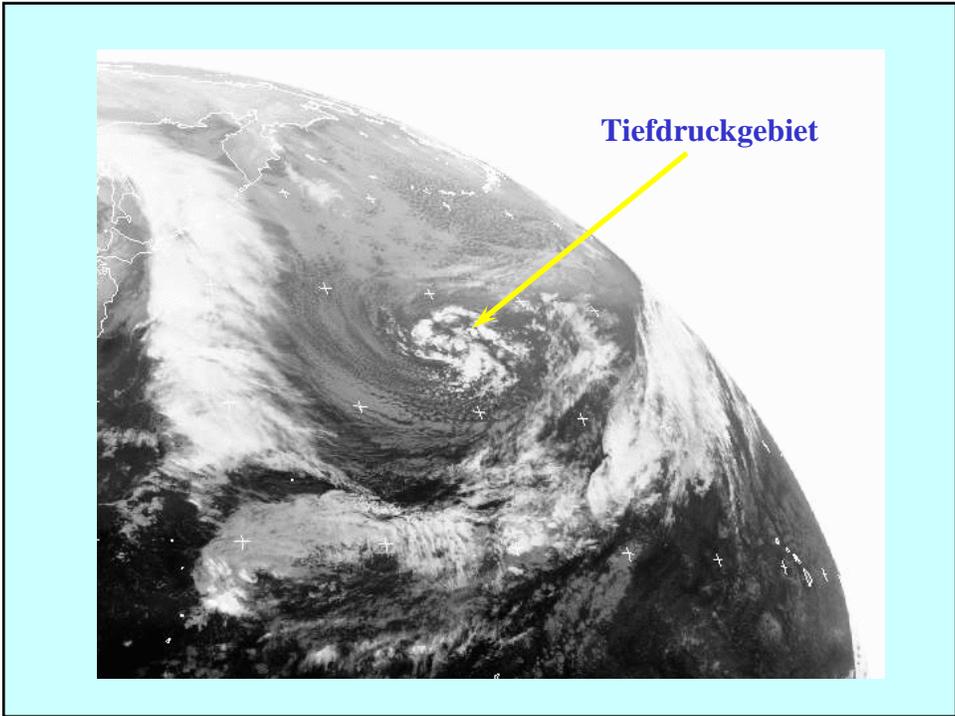
Infrarot Satellitenbildern

- Die Abhängigkeit der Schwarzkörperemission von der Temperatur wird auf Infrarot-Satellitenbildern deutlich.
- Der Satellit mißt die Emission von Erde bzw. Atmosphäre zwischen 10,5 und 12,5 μm , in der Nähe des Maximums des Schwarzkörperspektrums für terrestrische Strahlung.
- **Warme Gebiete (tiefe Wolken, Landoberfläche)** lassen sich von kalten Gebieten (hohe Wolken) unterscheiden.

IR
07-01-00
12 Z

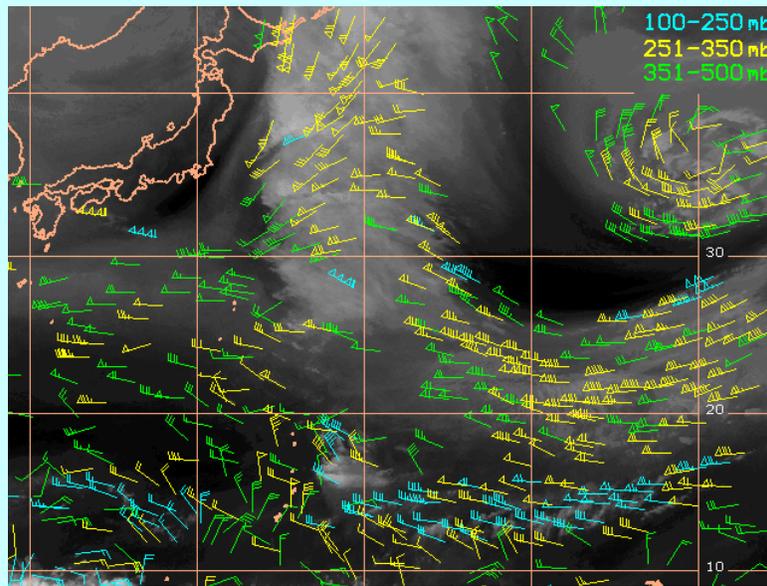


Copyright: DLR/ESA/NOAA



Wasserdampf-Kanal

Mikrowellen-Bereich



Ende