# 3. Die Sonne

*2026-01-06*

**Inhalt**


- 3.1. Ihr Spektrum
- 3.2. Ihre Energieabstrahlung
- 3.3. Energieerzeugung
- 3.4. Aufbau der Sonne, Energietransport
- Übungen zur Fusion


## 3.1. Ihr Spektrum

Wir erhalten alle Informationen über die Sonne durch ihre **Wirkungen**:

- Gravitation
- Teilchen (Sonnenwind, Neutrinos)
- **Strahlung** (sichtbar und andere)

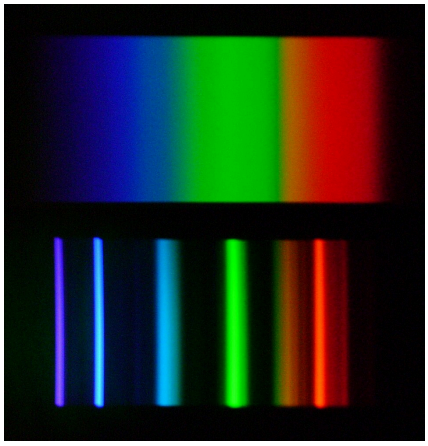
### Wie erhält man Spektren?

➜ Man trennt Licht in seine Wellenlängen auf.

Dazu lässt man es durch ein *Prisma* (Dispersion) oder *Gitter* (Beugung) auf einen Beobachtungsschirm fallen.

Dort werden Wellen mit unterschiedlichen Wellenlängen unterschiedlich stark abgelenkt.

Nebenstehend Beispiele für Spektren.



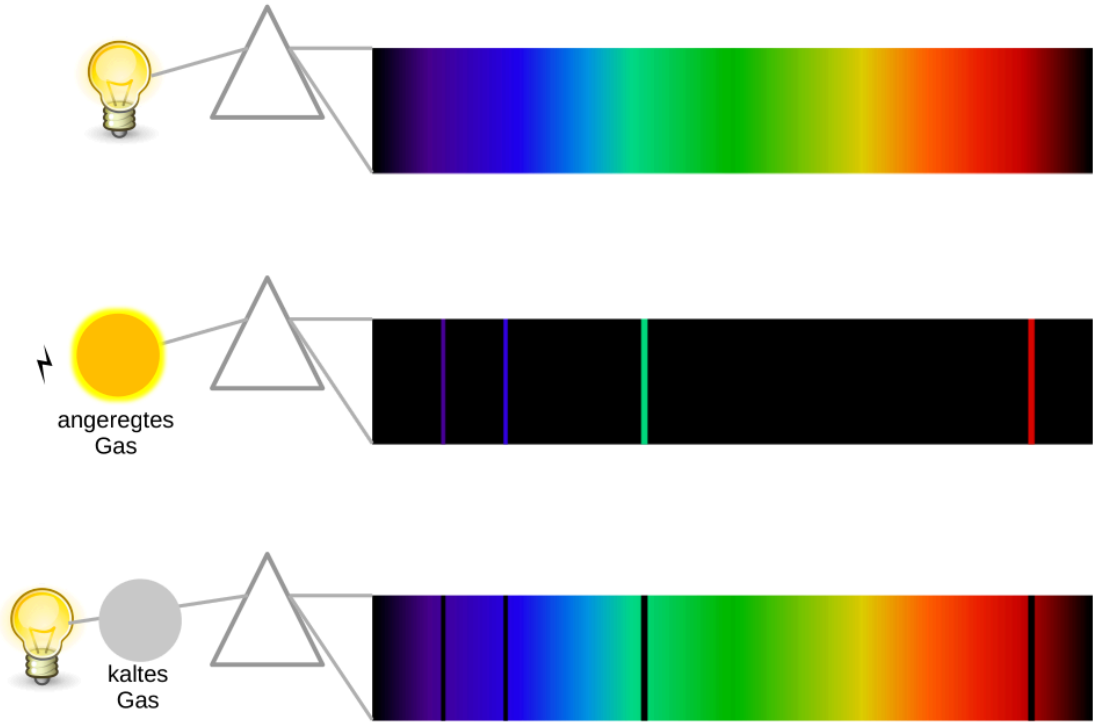
*Quelle: wikimedia* [1]

### Linienspektren, Versuche, Deutung durch die Atomphysik

Glühbirne ⇒ **kontinuierliches Emissions-Spektrum**

leuchtendes Gas ⇒ **diskretes Emissions-Spektrum**

Glühbirne⇒ kaltes Gas ⇒ **diskretes Absorptions-Spektrum**

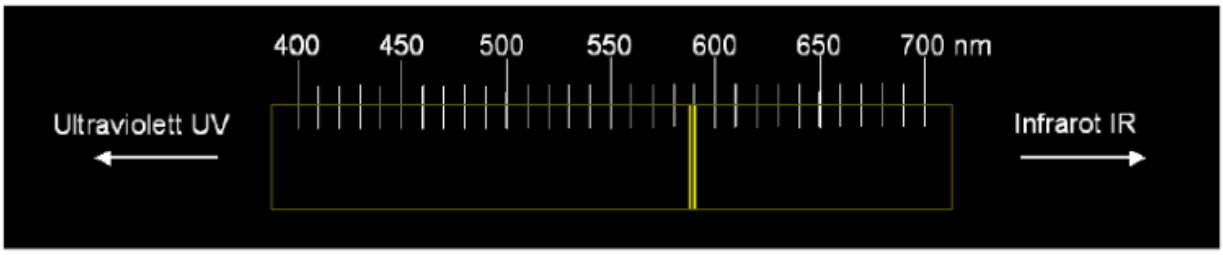



Collage von BieC mit gemeinfreien Spektrum-Grafiken von Stkl (wikipedia) und gemeinfreiem Glühbirnensymbol von The Tango Desktop Project.

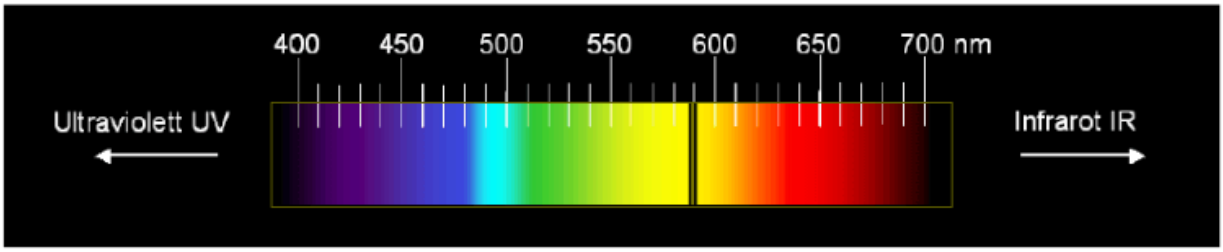
*Quelle: BieC, Collage* [2]

# Vergleich: Linienspektren von Natrium

Emissionsspektrum




Absorptionsspektrum




*Quelle: schule-bw.de*[3]

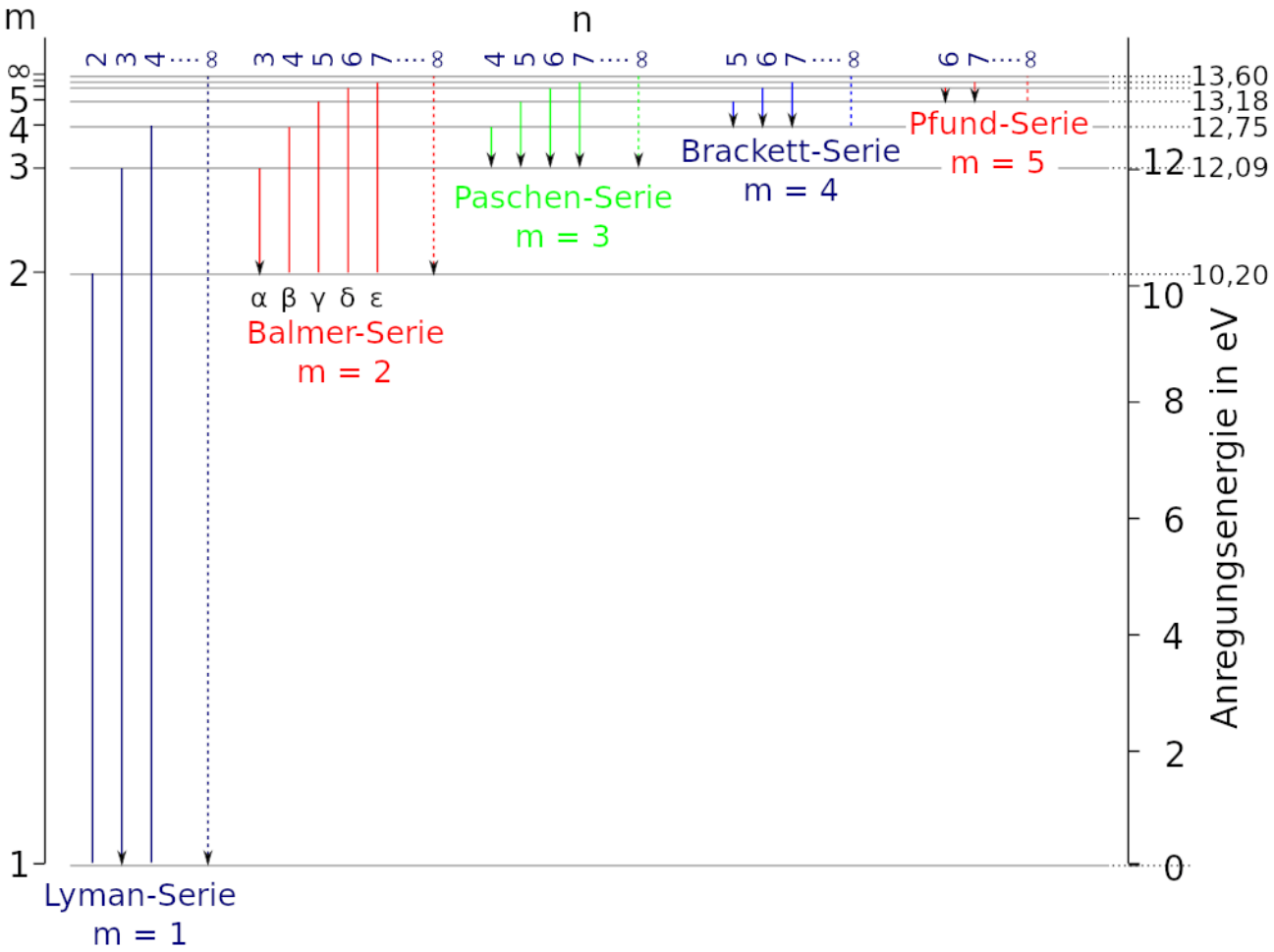
## Erklärung mit Atommodellen – Termschema – Energieniveaus:

- Energie in Atomen ist gequantelt
- Atome haben feste Energieniveaus für die Elektronen:

  ➜ exakt passende Photonen werden absorbiert.

  ➜ $e^-$ hüpft auf höheres Energieniveau.

  ➜ diskretes **Absorptions**spektrum, da diese Photonen nun fehlen.
- Nach der Anregung emittieren die Atome Photonen
  - mit identischer Energie
  - in alle Richtungen (wirkt daher wie Absorption).

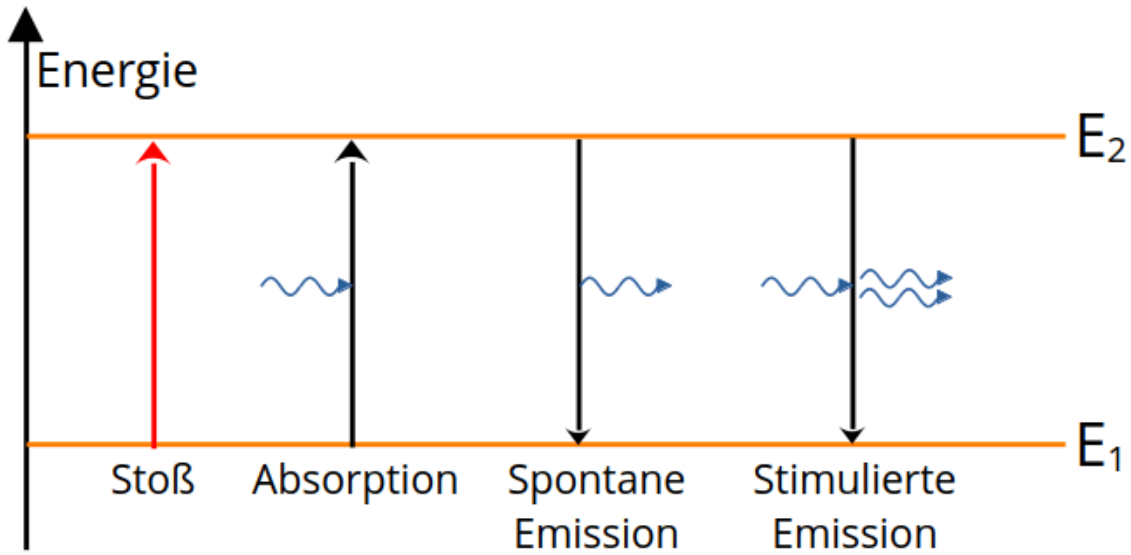



*Quelle: wikipedia*[4]

Damit muss ein Zusammenhang zwischen **Photonenenergie** und **Wellenlänge** bzw. Frequenz des Lichts bestehen (➜Einstein). Details in ⇗ Leifiphysik (https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-photon/grundwissen/einsteins-theorie-des-lichts).

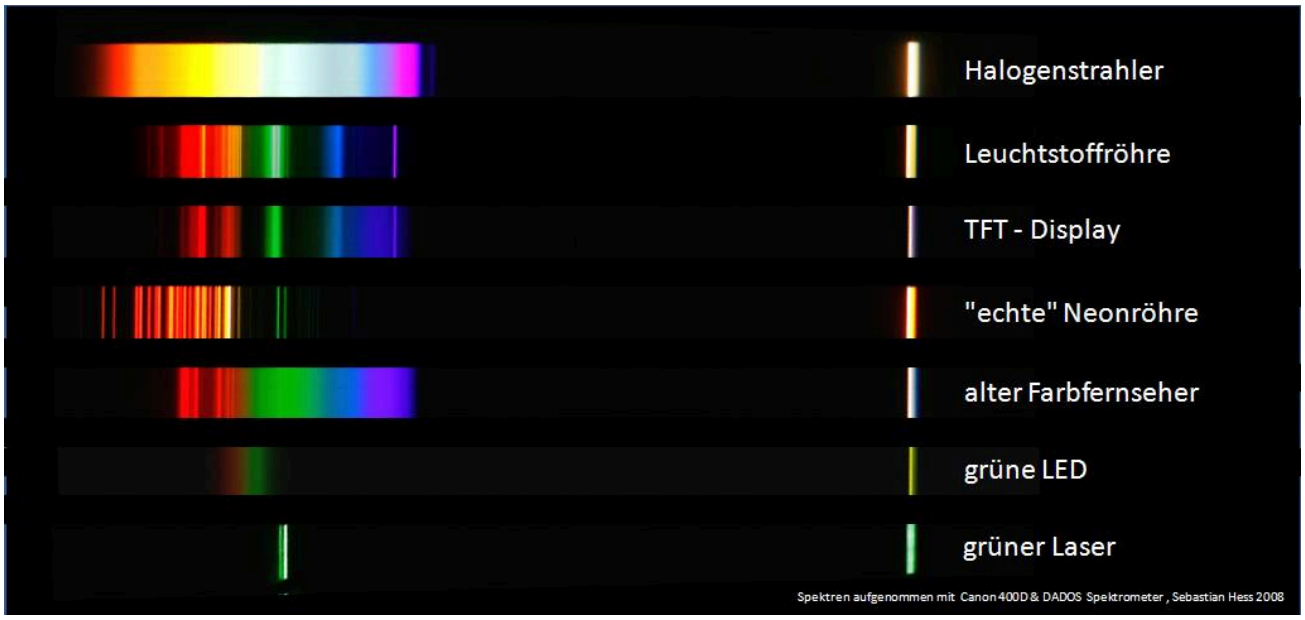
$$E_{Ph} = h \cdot \frac{c}{\lambda} = h \cdot f$$

## Überblick:




*Quelle: BieC*[5]

## Spektren von technischen Lichtquellen




*Quelle: S. Hess* [6]

(Finde die eine “heiße” Lichtquelle!)

## Extremfälle

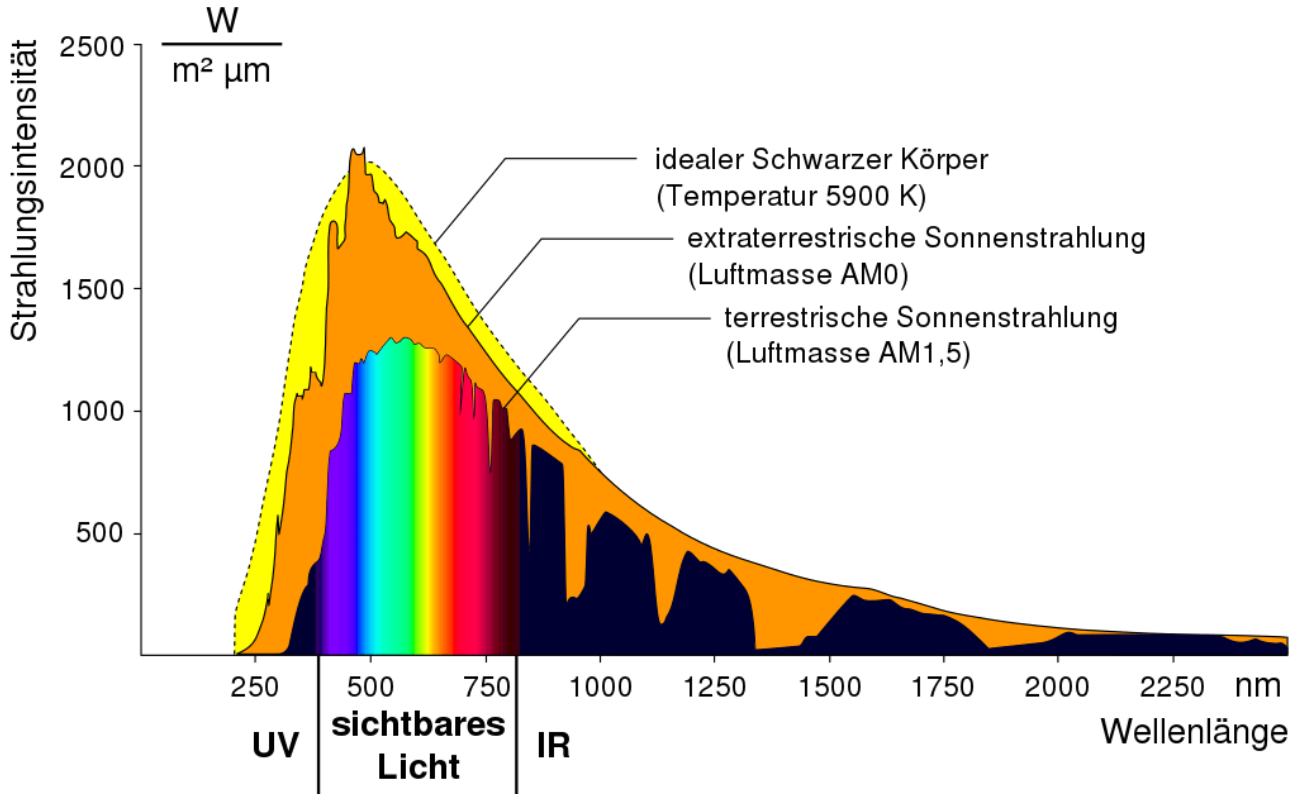
*monochromatisches Linienspektrum*

- Natrium (fast nur eine Linie) oder
- hochwertiger Laser (exakt eine Wellenlänge).

*“Schwarzer Körper”*

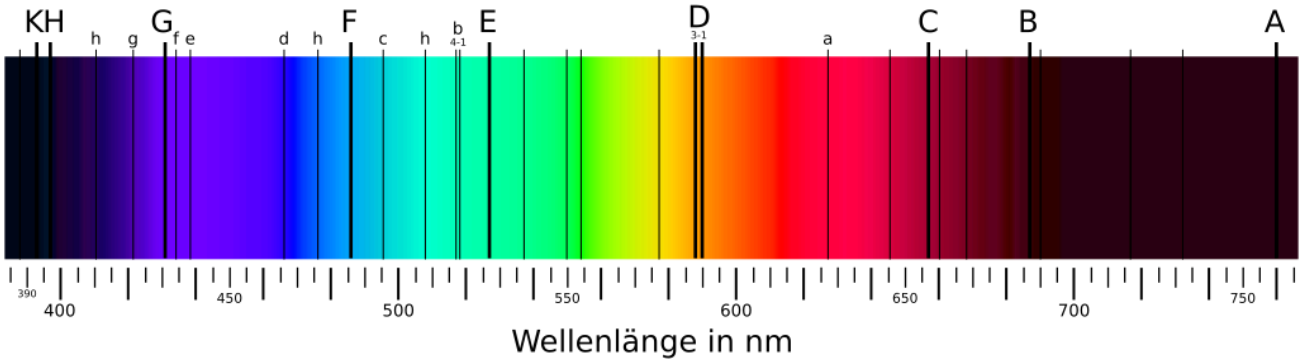
Kontinuierliches Spektrum, spektrale Intensitätsverteilung ist berechenbar und nur von der **Temperatur** abhängig - siehe unten “Strahlungsgesetze”.

## Sonnenspektrum, Intensitätsverteilung




*Quelle: wikipedia*[7]

## Sonnenspektrum, Fraunhoferlinien




*Quelle: wikipedia*[8]

- Wie entstehen sie?
- Was kann man aus ihnen folgern?

## 3.2. Ihre Energieabstrahlung

*"Wie viel Energie strahlt die Sonne ab?"*
Unpräzise! Wie viel Energie pro Sekunde, also welche *Leistung*.

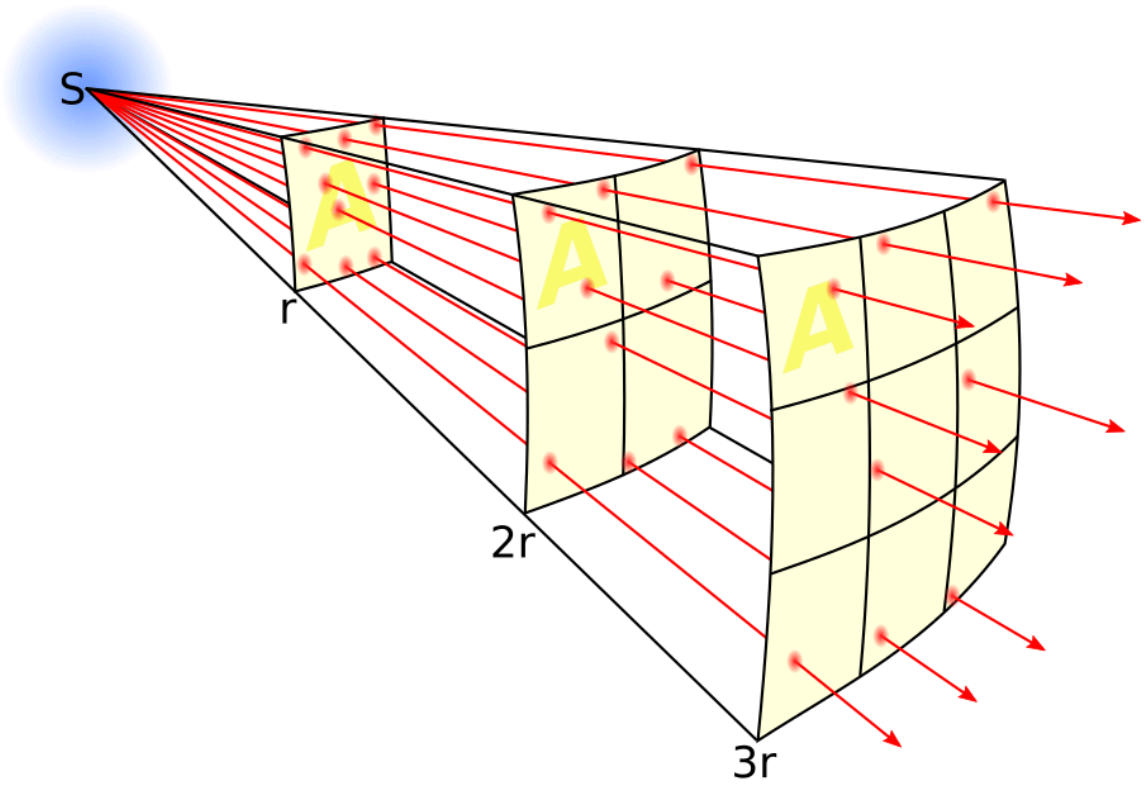
### Solarkonstante und Leuchtkraft der Sonne

Als Solarkonstante $S_0$ bezeichnet man die *gemittelte extraterrestrische Bestrahlungsstärke der Sonne* (Intensität, Leistung pro Flächeneinheit), die senkrecht zur Strahlrichtung auf die Erde auftrifft.

$$S_0 = 1367 \frac{W}{m^2}$$

Eine Messung ist im engagierten Schülerversuch möglich.
Dann ist aber eine etwas aufwändigere Korrektur nötig, da wir nur innerhalb der Atmosphäre messen können (max. 1kW/m²).

**Überlegung**: Strahlung verteilt sich bei größeren Radien auf quadratisch größere Flächen:




*Quelle: wikipedia*[9]

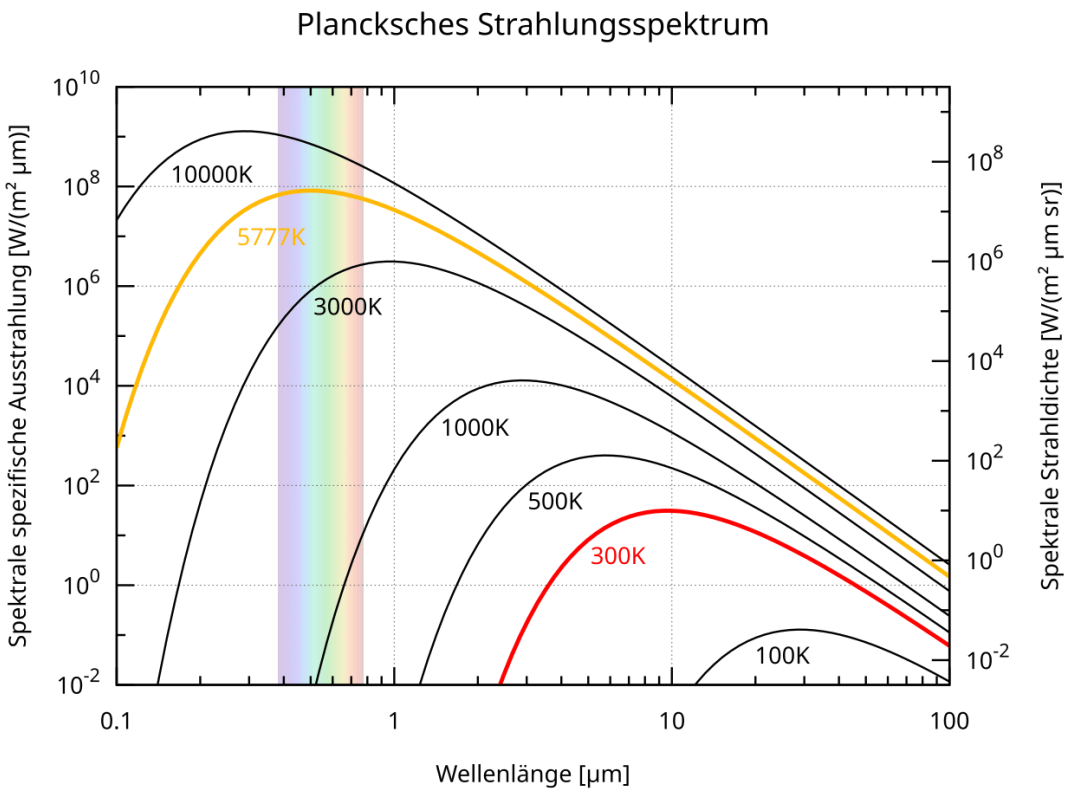
### Die Gesamtleistung der Sonne

...können wir daraus berechnen: Man stellt sich eine komplette Kugeloberfläche mit Radius 1AE so beleuchtet vor.

$$\begin{aligned} L &= S_0 \cdot A \\ &= S_0 \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 \\ &= 1,36 \cdot 10^3 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2} \cdot 4 \cdot \pi \cdot \left(1,50 \cdot 10^{11} \mathrm{m}\right)^2 \\ &= 3,84 \cdot 10^{26} \mathrm{W} \end{aligned}$$

Dieses Ergebnis bedeutete im 19. Jhd., dass man ⇗ nicht erklären (https://de.wikipedia.org/wiki/Sonne#Lord_Kelvin_und_das_Alter_von_Sonne_und_Erde) konnte, wo diese Energiemenge ( $1,2 \cdot 10^{32} \frac{J}{Jahr}$) herkommen sollte.

## Strahlungsgesetze von Stefan-Boltzmann und Wien




Nebenstehende Kurven geben das Strahlungsspektrum (https://de.wikipedia.org/wiki/Plancksches_Str wieder - welches hier kein Stoff ist.

*Quelle: wikipedia*[10]

**Wiensches Verschiebungs-Gesetz**

$\lambda_{max} \sim \frac{1}{T}$ (Wellenlänge, bei der die Intensität am höchsten ist):

$$\lambda_{max} = \frac{2{,}898 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m} \cdot \mathrm{K}}{T}$$

**Stefan-Boltzmann-Gesetz**

Gesamtstrahlungsleistung (entspricht Fläche unter der Kurve) $P \sim T^4$ und der Oberfläche des Körpers:

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

**Merke:**

für jedes $\lambda$ gilt, dass die "dortige" Strahlungsleistung mit der Temperatur ansteigt! $\Rightarrow$ obiges Diagramm.

Präziser für "dortig": Die Strahlungsleistung im Wellenlängenintervall $[\lambda \;;\; \lambda + \Delta\lambda[$ mit einem festen $\Delta\lambda$.

## Oberflächentemperatur der Sonne

... kann entweder über die Gesamtstrahlungsleistung (Solarkonstante+Geometrie), den Sonnenoberflächeninhalt und Stefan-Boltzmann genähert werden.

Oder einfacher mit $\lambda_{max}$ und Wien.

Ergebnis: 5772 K (Kelvin)

## Terrestrische Wirkung

- Sonnenwind $\Rightarrow$ Polarlichter (Teilchen)
- Licht, Wärme, aber auch UV-Licht (elektromagn. Strahlung)

## 3.3. Energieerzeugung

**Kernfusion**

- Verschmelzung von Atomkernen unter
- hohem Druck und
- hoher Temperatur mit
- Energieüberschuss im
- Sonnenkern.

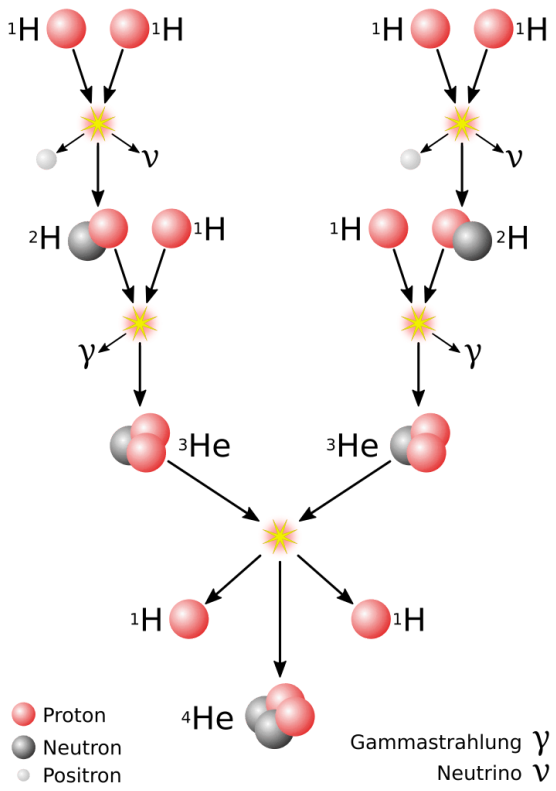
**Dauer des Prozesses** Milliarden von Jahre!

### kernphysikalische Grundlagen

**Merke** Wasserstoffkerne sind Protonen. (Heliumkerne sind Alphateilchen)

**Ablauf** einfache Version siehe rechts

**Bilanz** $4p \rightarrow 1He$
Wasserstoff fusioniert zu Helium




*Quelle: wikipedia*[11]

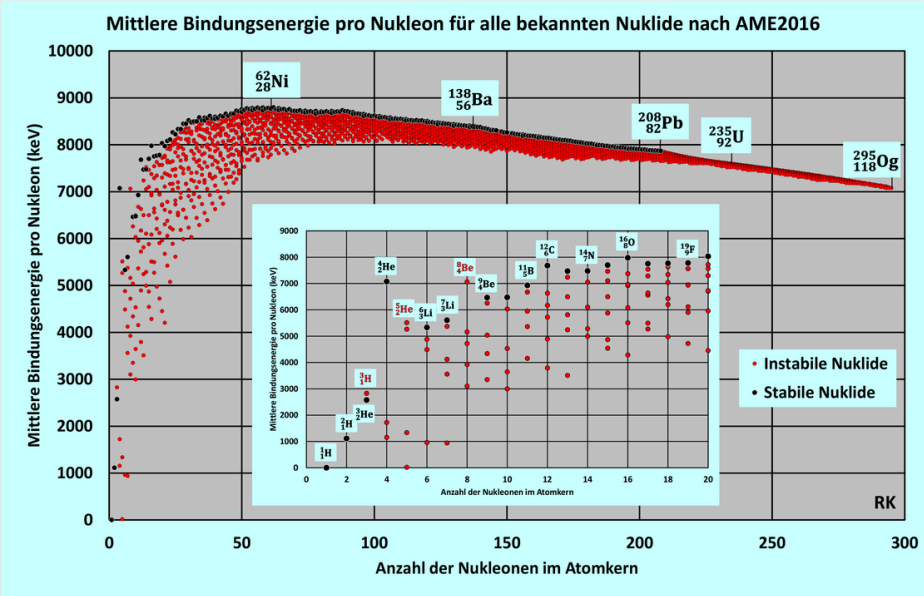
### Bindungsenergie

Wo kommt die Energie her?

**Bindungsenergie** im Kern ("Starke Kernkraft").

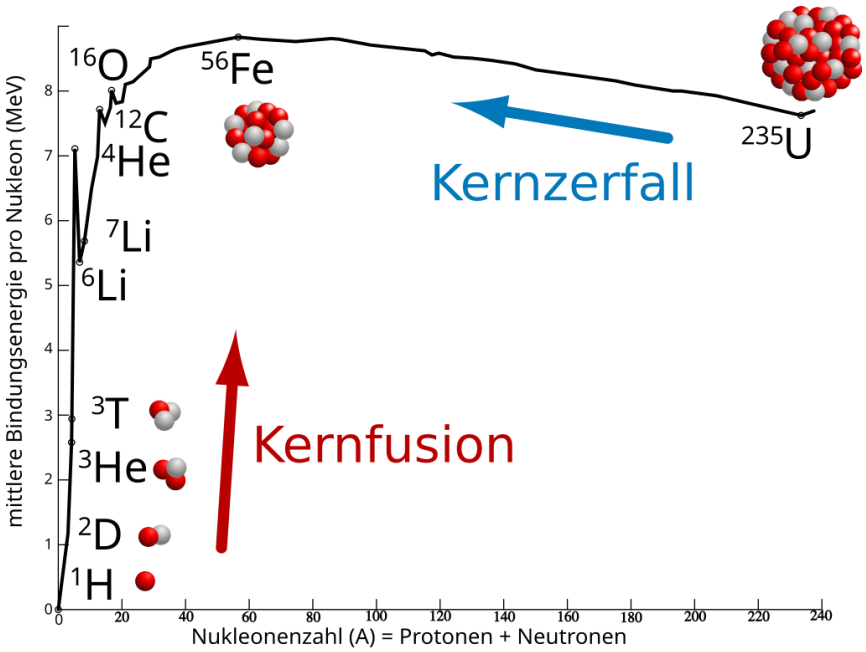
Freiwerdende Energie = Energie, die zum Trennen nötig wäre.

Vergleiche Kraft & Energie im Magnetfeld.




*Quelle: wikipedia*[12]

*Stabile Kerne:*




Quelle: wikipedia[13]

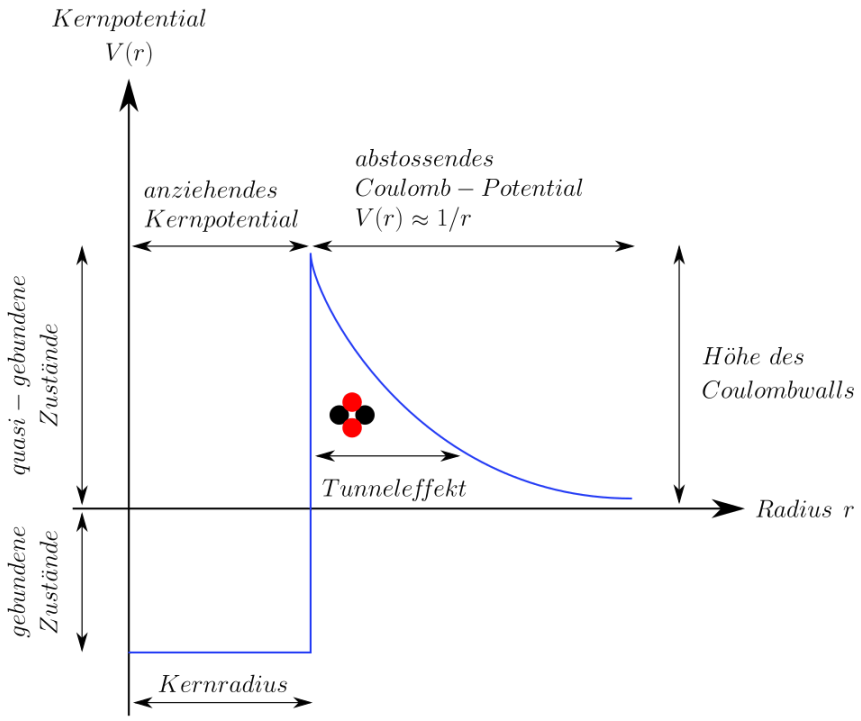
Eisenkerne haben die höchste Bindungsenergie pro Nukleon:

- *Exotherme Fusion* kann nur von Wasserstoff bis Eisen stattfinden.
- *Exotherme Fission* kann nur von schwersten Kernen bis Eisen stattfinden.

## Tunneleffekt

Statistische Komponente der Fusion.
Dessen *Wahrscheinlichkeit* hängt ab von:

- Breite des Energiewalls bei maximaler Teilchenenergie,
- damit auch von der Temperatur.
- Druck: verantwortlich für die Rate der Versuche.




Quelle: bnv-bamberg[14]

## Massendefekt $\Delta m$

Nach dem Gesetz $E = mc^2$ muss die freigesetzte Energie mit einer Massenänderung korellieren. Tatsächlich sind 4 Protonen etwas schwerer als der resultierende Heliumkern!

Aufgabe *(mit vielen Stellen rechnen!)*:

- Berechne aus der Summe der Massen von vier Protonen und der Masse eines Helium**kerns** den sog. Massendefekt $\Delta m$ in der Einheit $u$.
- Berechne daraus die bei diesem Fusionsvorgang freigesetzte Energie. *(Tipp: suche in der FS nach der Energieeinheit $uc^2$)*
  $\rightarrow$ Das Ergebnis sollte ca. $27MeV \approx 4,3 \cdot 10^{-12}J$ betragen.
- Berechne nun den Massendefekt der Sonne **pro Jahr** bei ihrer oben berechneten Leistung von $1,2 \cdot 10^{32}\frac{J}{Jahr}$. *(Ansatz $E = mc^2$ reicht dazu.)*

Anmerkung: Wenn man Uran spaltet, so sind die Produkte minimal leichter als der Urankern.

## Voraussetzungen für die Wasserstoff-Fusion

Notwendig ist hohe Dichte und Temperatur. Dann liegt Wasserstoff und andere Atome nur als Plasma vor. Dabei sind Atomkerne und Elektronen frei voneinander.

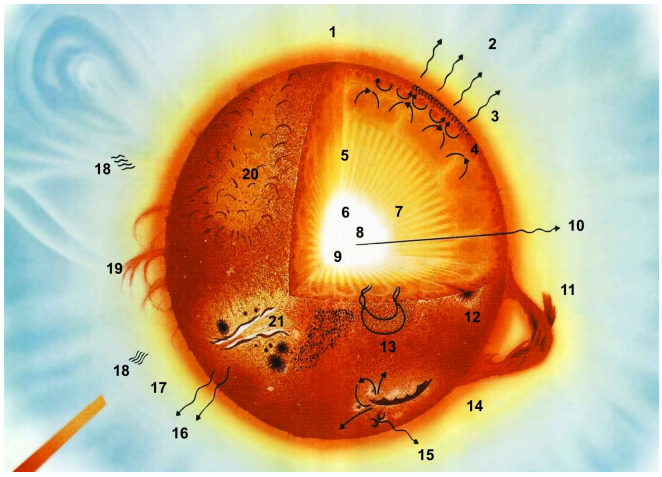
Diese Bedingungen herrschen nur im **Kern** der Sonne. Nur der dortige Wasserstoffvorrat wird umgesetzt - danach endet die Heliumfusion.

Merke: “Wasserstoffbrennen” = Heliumfusion

# 3.4. Aufbau der Sonne, Energietransport

## Aufbau

1. **Photosphäre** 6 000 K
2. Sichtbare, Infrarot- und UV-Strahlung
3. Turbulente Konvektion
4. **Konvektionszone**
5. 2 100 000 K
6. **Kern**
7. **Strahlungszone**
8. Thermonukleare Reaktionen
9. 14 000 000 K
10. Neutrinos
11. Protuberanz
12. Spot
13. Magnetfeldschleife
14. Helle Spots und kurzlebige magnetische Regionen
15. Röntgenstrahlung
16. Röntgen- und γ-Strahlung
17. Energetische Partikel
18. Radiowellen
19. **Korona**
20. Koronales Loch
21. Chromosphärischer Flare




*Quelle: wikipedia* [15]

## Sonneninneres

### *Kern 150 000 km Radius*

Im Kern befinden sich etwa ca. ein Viertel der Sonnenmasse: extremer Druck und Temperaturen von über 10 Mio. Kelvin, daher Kernfusion.

### *Strahlungszone 320 000 km dick*

Ab ca. 25% des Sonnenradius'.
Energietransport durch Strahlung. Dabei findet laufend ein Emittieren, Streuen, Absorbieren und wieder Emittieren der Photonen entlang von zufälligen Pfaden statt. Transportdauer der Energie zur Oberfläche daher größer 10 000 a.

### *Konvektionszone 230 000 km dick*

Beginn ab ca. 71% des Sonnenradius'.
Energietransport durch Konvektion, meist ca. 10 m/s. Erst kurz vor der der Oberfläche bis über 1 000 m/s.

## Sonnenoberfläche

### *Photosphäre 200 km dick*

Quelle der Kontinuumsstrahlung. Auch entstehen hier die fraunhoferschen Linien. Sonnenflecken (wg. starken Magnetfeldern, s.u.).

### *Chromosphäre 2 000 km dick*

$H_2$ und He. Geringe Dichte, kaum Strahlung, u.a. Eruptionen, Protuberanzen.

### *Korona 1-2 Mio. km (wechselnd)*

Niedrige Dichte, sehr hohe Temperatur von Mio Kelvin. Quelle des Sonnenwinds.

## Oberflächenphänomene, Sonnenwind

### *Protuberanzen*

Materieströme, die Materie ins All an den Magnetfeldlinien der Sonne entlang schleudern

### *Flare*

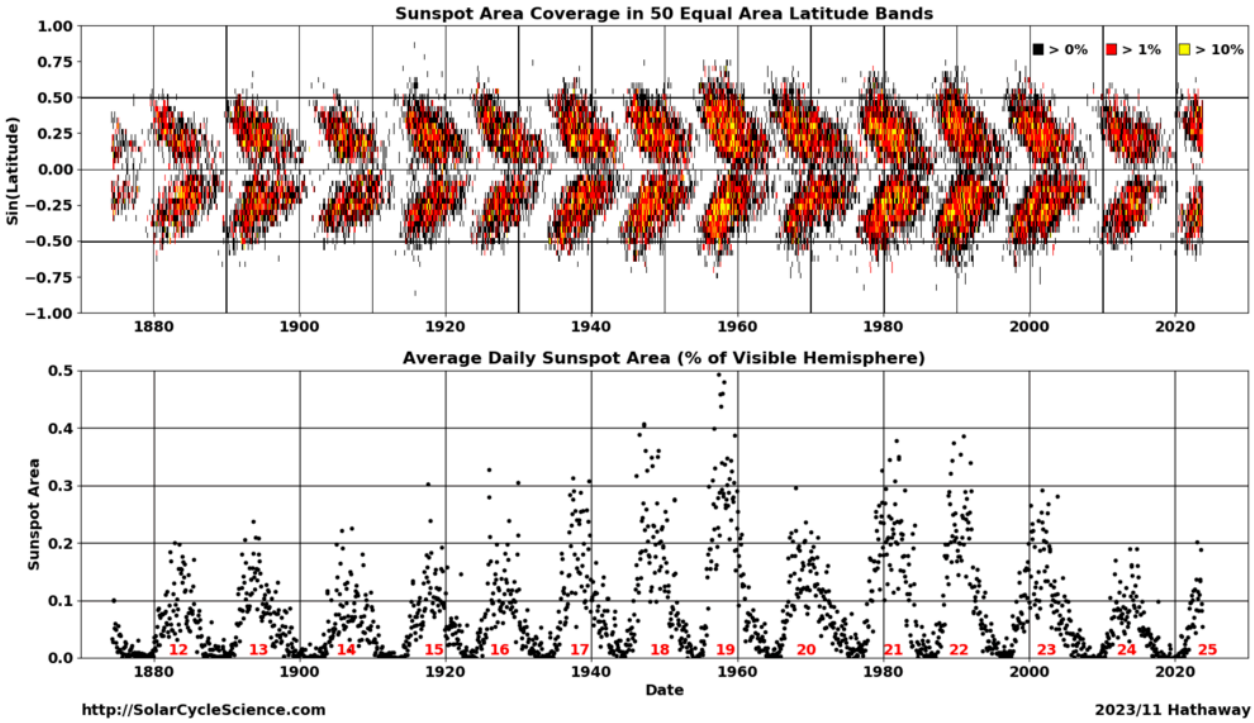
Kleines Gebiet mit mehreren Millionen Grad Celsius

### *Sonnenflecken*

entstehen an Orten mit dem stärksten B-Feld, da das die Konvektionsströme lenkt → vergleichweise kältere Orte → dunkler

- in Gruppen mit entgegengesetzter magn. Ausrichtung
- Häufigkeit ist zyklisch (ca. 11 Jahre)
- beginnt mit insgesamt geringer Anzahl und meist bis zu 30° vom Äquator entfernt
- Ort der hohen Auftrittswahrscheinlichkeit wandert dann zum Äquator hin mit steigender Gesamtzahl

→ Schmetterlingsdiagramm:




*Quelle: wikipedia*[16]

### *Sonnenwind*

- Dauerhafter, aber variabler Teilchenstrom radial von der Sonne ins All.
- Hauptsächlich Protonen, Elektronen, Alphateilchen und Spuren von Atomkernen weiterer Elemente.
- Bis zu 750km/s bei der Erde.
- Wird bei starker Sonnenaktivität (s.o.) verstärkt.
- Beeinflusst das Magnetfeld der Erde (“Weltraumwetter”).

### *weitere Phänomene*

gibt es in hoher Zahl, die aber für den Unterricht nicht gefordert sind, z.B. Regelung der Fusionsleistung, Schwingungen im Sonneninneren, Druck- und Temperaturgradienten usw.

# Übungen zur Fusion

### *Elektronenvolt*

1eV ist eine Energieeinheit:

$$1eV = 1e \cdot V = 1,6 \cdot 10^{-19} As \cdot V = 1,6 \cdot 10^{-19} J$$

### *Massendefekt*

Ein Kernprozess verändert die Masse! Summe der Eduktmassen > Summe der Produktmassen. Die Differenz wird gemäß $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$ als Energie frei.

> Siehe auch FS zu $u \cdot c^2$

## Abi 1996

In der Sonne wird durch Fusion von Wasserstoff Helium erzeugt. Ein He-Kern entsteht aus vier Protonen und zwei Elektronen über mehrere Zwischenstufen, die hier außer acht gelassen werden.

a. Berechne die Energieausbeute bei der Fusion von Protonen zu 1kg Helium. [zur Kontrolle: $6 \cdot 10^{14}\,\mathrm{J}$]

b. Die Masse der Sonne beträgt $2 \cdot 10^{30}\,\mathrm{kg}$, ihr Alter rund 5 Milliarden Jahre. Sie strahlt jährlich eine Energie von $1{,}2 \cdot 10^{34}\,\mathrm{J}$ ab. Schätze ab, wie viel Prozent der Sonnenmasse seit “Geburt” der Sonne in Helium verwandelt wurden.

## Paarvernichtung

Ein Elektron und ein Positron (entsteht z.B. bei der Fusion) zerstrahlen, sobald sie einander begegnen, zu meist 2 *Gammaquanten* (Impulserhaltung). Dabei wird ihre Gesamtmasse in Energie umgesetzt.

a. Berechne die Energie in J aus den Massen.
b. Ermittle die Energie aus den Ruheenergien.
c. Vergleiche die Ergebnisse.

1. Horst 123 horst, public domain, ⇗ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spektrum_60W_ESL.jpg (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spektrum_60W_ESL.jpg) ↩
2. C. Bienmüller, CC0, mit freien Bestandteilen selbst erstellt (inspiriert von diversen Quellen) ↩
3. unbekannt, CC-BY, ⇗ https://www.schule-bw.de/faecher-und-schularten/mathematisch-naturwissenschaftliche-faecher/chemie/neuer-index.html/materialien/chemie-unterrichtsmittel/spektro/20nalinienspektren.pdf/%40%40download/file/20nalinienspektren.pdf (https://www.schule-bw.de/faecher-und-schularten/mathematisch-naturwissenschaftliche-faecher/chemie/neuer-index.html/materialien/chemie-unterrichtsmittel/spektro/20nalinienspektren.pdf/%40%40download/file/20nalinienspektren.pdf) ↩
4. Kiko2000, CC-BY-SA, ⇗ https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Wasserstoff-Termschema.svg (https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Wasserstoff-Termschema.svg) ↩
5. C. Bienmüller, CC-BY-NC-SA, selbst erstellt (inspiriert von ⇗ http://physics.johannesdoerr.de/files/a-praktikum/V26-Beugung_und_Interferenz.pdf (http://physics.johannesdoerr.de/files/a-praktikum/V26-Beugung_und_Interferenz.pdf)) ↩
6. Sebastian Hess, mit freundlicher Erlaubnis, ⇗ http://www.sebastian-hess.eu/dados.html (http://www.sebastian-hess.eu/dados.html) ↩
7. Degreen, CC-BY-SA, ⇗ https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Sonne_Strahlungsintensitaet.svg (https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Sonne_Strahlungsintensitaet.svg) ↩
8. Saperaud, CC-BY-SA, ⇗ https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Fraunhofer_lines_DE.svg (https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Fraunhofer_lines_DE.svg) ↩
9. Borb, CC-BY-SA, ⇗ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Inverse_square_law.svg (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Inverse_square_law.svg) ↩
10. Prog, CC-BY-SA, ⇗ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BlackbodySpectrum_loglog_de.svg (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BlackbodySpectrum_loglog_de.svg) ↩
11. Sarang, CC-BY-SA, ⇗ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fusion_in_the_Sun.svg?lang=de (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fusion_in_the_Sun.svg?lang=de) ↩
12. Roderich Kahn, CC-BY-SA, ⇗ https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Atomkernbindungsenergie_RK01.png (https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Atomkernbindungsenergie_RK01.png) ↩
13. Napy1Kenobi, CC-BY-SA, ⇗ https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Auftragung_Bindungsenergie_gegen_Massenzahl.svg (https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Auftragung_Bindungsenergie_gegen_Massenzahl.svg) ↩
14. Ba2282, CC-BY-SA, ⇗ http://wiki.bnv-bamberg.de/flg-wiki/index.php/Datei:Kernpotential.png (http://wiki.bnv-bamberg.de/flg-wiki/index.php/Datei:Kernpotential.png) ↩
15. Nasa (Dr. Jim Lochner), bearbeitet durch Hic et nunc, public domain, ⇗ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sun_parts.jpg (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sun_parts.jpg) ↩
16. NASA Marshall Space Flight Center - Arcinides, CC-BY-SA, ⇗ https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Sun_-_btly_-_2023.png (https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Sun_-_btly_-_2023.png) ↩