

Hardy/SPL

DIE LICHTAUSBEUTE DER SONNE

Die Sonne ist unsere wichtigste Lichtquelle. Aber wie groß ist eigentlich ihre Lichtausbeute? Der Artikel stellt drei Berechnungsmethoden vor und präsentiert ein überraschendes Ergebnis.

DER AUFBAU DER SONNE

Die Sonne besteht aus drei Schichten (Zonen). Im Sonnenzentrum findet bei 15 Mio. K die Kernfusion (Umwandlung von Wasserstoff in Helium) statt. Es folgt eine Plasmaschicht (Strahlungszone), welche die im Kern erzeugten Photonen auf einer Zick-Zack-Bahn in rund 100 000 Jahren durchlaufen. In den folgenden 30 Tagen passieren sie die äußere Konvektionsschicht, um schließlich nach weiteren

acht Minuten die Erde zu erreichen. Diese Werte sind aktuelle Forschungsergebnisse der Helio-Seismologie.

Das heißt, das Licht, das wir heute empfangen, wurde in der letzten Eiszeit erzeugt. Die Sonne generiert seit 4 Milliarden Jahren pro Sekunde eine Energie, die in etwa 400 Mio.

H-Bomben (mit jeweils circa 10^{18} Ws) entspricht. Die Zeit von heute an gerechnet bis zum Ende der Wasserstoff-Kernfusion liegt nach derzeitiger Erkenntnis bei 4,5 bis 5 Milliarden Jahren. Damit beträgt die Gesamtlebendauer der Sonne rund 10 Milliarden Jahre.

Um sich Vorstellungen von der Größe der Sonne zu machen, ist ein Bezug zur Erde hilfreich: Das Volumen der Erde passt 1,3 Mio. mal in die Sonne.

Physikalisch kann die Sonne annähernd als ein Schwarzer Strahler mit einer Oberflächentemperatur von 5773 K und einer ausgesendeten Strahlungsleistung von $6,35 \text{ kW/cm}^2$ betrachtet werden. Oberhalb der Erdatmosphäre beträgt die gesamte Strahlungsleistung der Sonne etwa 1340 Wm^{-2} (Solarkonstante). Die Sonne ist ein glühender Gasball von $1,39 \cdot 10^6 \text{ km}$ Durchmesser und mit einer Oberflächentemperatur von circa 5773 K. Sie hat bis heute 87 Erdmassen durch Kernfusion verloren.

Auf dem Weg durch die Atmosphäre wird die spektrale Verteilung der Sonnenstrahlung durch Absorption und Streuung verändert. Vor allem durch Wasserdampf, Sauerstoff und

Objekt	Masse	Vergleich
Mond	$7,348 \cdot 10^{22} \text{ kg}$	ca. 1/81 Erdmasse
Erde	$5,9736 \cdot 10^{24} \text{ kg}$	81,2 Mondmassen
Jupiter	$1,8986 \cdot 10^{27} \text{ kg}$	317,8 Erdmassen
Sonne	$1,9891 \cdot 10^{30} \text{ kg}$	332.942 Erdmassen

Tabelle 1: Massen der Planeten und Vergleich untereinander

Kohlendioxid wird die meist selektive Absorption verursacht, woraus sich Bandlücken ergeben. Lediglich Ozon absorbiert in einem breiten Spektrum von 200...700nm und somit auch einen großen Teil der UV-Strahlung.

Wie geht man vor bei der Berechnung der Lichtausbeute der Sonne? Es gibt drei Methoden:

BESTIMMUNG ÜBER DIE SONNENLEUCHTDICHTE UND KERNFUSION

Die extraterrestrische Leuchtdichte der Sonne beträgt $L_{\text{Sonne}} = 1,9 \cdot 10^9 \text{ cd/m}^2$ (das ist also eine sehr starke Blendlichtquelle!). Mit der gesehenen (projizierten) Fläche der Sonnenoberfläche

$$A_{\text{Sonne, proj.}} = \pi \cdot R_{\text{Sonne}}^2 = 3,14 \cdot (6,957 \cdot 10^8 \text{ m})^2 = 1,5197 \cdot 10^{18} \text{ m}^2$$

ergibt sich die sehr hohe Lichtstärke der Sonne

$$I_{\text{Sonne}} = L_{\text{Sonne}} \cdot A_{\text{Sonne, proj.}} = 2,887 \cdot 10^{27} \text{ cd}$$

Damit erhält man den von der Sonne ausgestrahlten Gesamtlichtstrom zu

$$\Phi_{\text{Sonne}} = 4\pi \cdot I_{\text{Sonne}} = 4\pi \cdot 2,887 \cdot 10^{27} \text{ cd} = 3,63 \cdot 10^{28} \text{ lm}$$

und für die extraterrestrische Beleuchtungsstärke auf der Erde

$$E = I_{\text{Sonne}} / (R_{\text{Sonne-Erde}})^2 = 2,887 \cdot 10^{27} \text{ cd} / (1,496 \cdot 10^{11} \text{ m})^2 = 129\,000 \text{ lx}$$

Durch Kernfusion werden in der Sonne pro Sekunde rund $657 \cdot 10^6 \text{ t}$ Wasserstoff in etwa $653 \cdot 10^6 \text{ t}$ Helium umgewandelt, die Sonne ist somit gewissermaßen eine kontrollierte Wasserstoffbombe!

Die hierbei auftretende Massendifferenz $\Delta m = 4,3 \cdot 10^6 \text{ t}$ wird nach der berühmten Formel von Einstein $E = m \cdot c^2$ als äquivalente Strahlungsenergie pro Sekunde in den Weltraum abgestrahlt. Die Leistung der Sonne beträgt also:

$$P_{\text{Sonne}} = \Delta m \cdot c^2 / s = 4,3 \cdot 10^9 \text{ kg} \cdot (300\,000 \text{ km/s})^2 / s = 3,87 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

Damit erhält man für die Lichtausbeute der Sonne

$$\eta_{\text{Sonne}} = \Phi_{\text{Sonne}} / P_{\text{Sonne}} = 3,63 \cdot 10^{28} \text{ lm} / 3,87 \cdot 10^{26} \text{ W} = 93,78 \text{ lm/W}$$

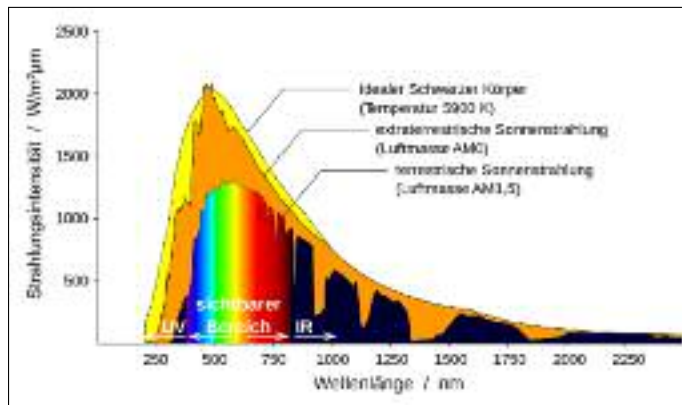
BESTIMMUNG AUS DER EXTRATERRESTRISCHEN SPEKTRALEN BESTRAHLUNGSSTÄRKE

Für die extraterrestrische Beleuchtungsstärke E erhält man aus den gemessenen Werten der extraterrestrischen spektralen Bestrahlungsstärke $E_{e\lambda}$ im Wellenlängenbereich von 370 nm bis 780 nm:

$$E = 683 \text{ lm/W} \cdot \sum_{\lambda=380 \text{ nm}}^{\lambda=780 \text{ nm}} E_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \Delta\lambda$$

mit $E_{e\lambda}$ in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ nm}}$ und $\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$

Die Auswertung mit den gemessenen Zahlenwerten ergibt:



Strahlungsintensität der Sonne (Quelle: Wikipedia / Degreen / Quilbert)

$$E = 683 \text{ lm/W} \cdot 181,81 \text{ W/m}^2 = 124\,176 \text{ lm/m}^2 = 124\,176 \text{ lx}$$

Mit der bekannten extraterrestrischen Solarkonstante $S = 1340 \text{ W/m}^2$ folgt

$$\eta_{\text{Sonne}} = 124\,176 \text{ lm m}^{-2} / 1340 \text{ W m}^{-2} = 92,7 \text{ lm/W}$$

EINFACHE BERECHNUNG FÜR PRAKTIKER

1. Messung der Beleuchtungsstärke senkrecht zum Lichteinfall bei klarem Himmel am 21. Juni mittags auf einem hohen Berg, z. B. Zugspitze

$$E_{\text{gem}} = 125\,000 \text{ lx} = 125\,000 \text{ lm/m}^2$$

2. Division durch die bekannte extraterrestrische Solarkonstante $S = 1340 \text{ W/m}^2$ ergibt

$$\eta_{\text{Sonne}} = 125\,000 \text{ lm m}^{-2} / 1340 \text{ W m}^{-2} = 93,28 \text{ lm/W}$$

BEWERTUNG DER ERGEBNISSE

Die Mittelung der drei Rechenergebnisse liefert das Ergebnis

$$\eta_{\text{Sonne}} \approx 93 \text{ lm/W}$$

Dieses wichtige Ergebnis sollte in lichttechnischen Lehrbüchern und Vorlesungen zukünftig erwähnt werden!

Die Lichtausbeute der Sonne liegt damit im Bereich derjenigen von Leuchtstofflampen und deutlich unter der von modernen Halbleiter-Lichtquellen (LED) und Hochdruck-Gasentladungslampen, diese sind somit lichttechnisch bereits effizienter als unsere gute alte Sonne!

Die Glühlampen mit ihren mageren 12 lm/W werden – wie bekannt – nach und nach verboten, weil die EU wegen dieser ineffizienten Edisonschen Lampen aus dem vorvorigen Jahrhundert bereits die Fassung verloren hat.

Auch die Glühstrümpfe der etwa 40 000 Berliner Gas-Laternen mit der Technik aus dem 19. Jahrhundert und einer Lichtausbeute von weniger als 2 lm/W werden hoffentlich bald durch LED-Leuchten ersetzt, mit dann über 100 lm/W.