Wieviel **Energie** liefert uns die **Sonne?**

Die genauesten Werte für den Energiefluss von der Sonne bestimmte Dietrich Labs, der im März 2008 im Alter von 86 Jahren in Heidelberg starb. Er entwickelte die präzisesten Vergleichsquellen zur Eichung des Sonnenspektrums. Sein SOLSPEC-Instrument wurde seit 1983 mehrmals im Weltraum eingesetzt und misst jetzt auf der Internationalen Raumstation ISS.

Von Dietrich Lemke, Holger Mandel und Uwe Reichert

uch wenn die Sonne gerade mal nicht scheint und Wolken den Himmel verhängen: Sie leuchtet permanent und versorgt die Erde mit lebensnotwendiger Strahlungsenergie. Pro Sekunde und Quadratmeter sind es im Mittel 1367 Joule. Dieser Wert heißt Solarkonstante. Er ist allerdings nicht exakt konstant, denn er hängt von der Entfernung der Erde zur Sonne ab, die bekanntlich wegen der Exzentrizität der Erdbahn im Jahreslauf leicht variiert.

Auch Veränderungen auf unserem Tagesgestirn selbst können den Wert der Solarkonstante beeinflussen – zum Beispiel der elfjährige Sonnenfleckenzyklus, durch

den die Häufigkeit der Sonnenflecken periodisch schwankt. Solche Veränderungen könnten sich auf das Wettergeschehen und die Entwicklung des Erdklimas auswirken, denn die Sonne bestimmt als primäre äußere Energiequelle den Energiehaushalt der irdischen Atmosphäre. Wie stark solche Auswirkungen sind, lässt sich allerdings nur herausfinden, wenn man die Sonnenstrahlung und ihre zeitlichen Veränderungen langfristig genau misst.

Aber nicht genug, dass die Solarkonstante leicht variiert: Auch die spektrale Verteilung der von der Sonne abgestrahlten Energie kann sich mit der Zeit ändern und sowohl Auswirkungen auf das Erdklima als

auch auf die Zusammensetzung der Atmosphäre haben. So bestimmt zum Beispiel Strahlung aus dem mittleren Ultravioletten, also dem Wellenlängenbereich von 200 bis 300 Nanometern (nm), den Ozongehalt der Atmosphäre und damit wiederum die Absorption ultravioletter Strahlung.

Um solche Auswirkungen der Sonneneinstrahlung auf die Vorgänge in der Erdatmosphäre verstehen zu können, ist es also wichtig zu wissen, ob und wie sich die spektrale Verteilung der Sonnenstrahlung mit der Zeit ändert. Aber auch für das volle physikalische Verständnis der Energieerzeugung im Inneren der Sonne und des Strahlungstransports nach außen ist die Absolutmessung ihrer Strahlungsintensität erforderlich. Aus den gemessenen Werten von abgestrahlter Energie pro Fläche, pro Raumwinkel und pro Wellenlängenintervall kann dann durch Integration auch die Solarkonstante genau bestimmt werden.

Stichwort: Solarkonstante

Die Solarkonstante ist die Strahlungsenergie der Sonne, die bei mittlerem Sonnenabstand von einer Astronomischen Einheit und senkrechtem Strahlungseinfall pro Sekunde und pro Quadratmeter auf die Erdatmosphäre einfällt. Ihr Mittelwert beträgt 1367 Joule pro Sekunde und Quadratmeter beziehungsweise 1367 Watt pro Quadratmeter.

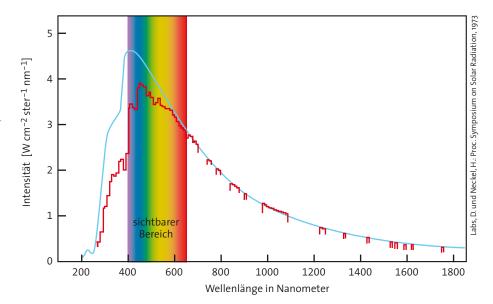
In älteren Lehrbüchern wird dieser Wert so veranschaulicht: Die Sonne wirft an jedem wolkenlosen Sommertag ein Brikett auf jeden Quadratmeter der Erde. Heute haben Besitzer von Solaranlagen durch eingespartes Heizöl oder die Einspeisevergütung für Solarstrom eine Vorstellung von der Leistung des solaren Energiestroms.

Schwarzer Körper als Vergleichslichtquelle

Im Grunde ist das Prinzip der Messung einfach: Man nehme ein Spektralphotometer und messe über eine längere Zeit den spektralen Strahlungsstrom der Sonne in absoluten Einheiten, zum Beispiel

30 Juni 2008 STERNE UND **WELTRAUM**

Das Sonnenspektrum erstreckt sich vom ultravioletten bis weit in den infraroten Strahlungsbereich. Die Treppenkurve gibt die von Dietrich Labs und Heinz Neckel 1970 gemessenen Werte in zehn Nanometer breiten Wellenlängenintervallen an, einschließlich der zahlreichen Absorptionslinien. Die glatte Kurve gibt das Quasikontinuum an, also die Verbindungslinie der höchsten gemessenen Intensitäten zwischen den Linien.



in Watt pro Quadratzentimeter, Steradiant und Nanometer (W cm⁻² sr⁻¹ nm⁻¹). In der Praxis allerdings ergeben sich eine Reihe von messtechnischen Schwierigkeiten: Um störende und veränderliche Einflüsse der Erdatmosphäre auszuschalten, sollten die Messungen vorzugsweise außerhalb der irdischen Lufthülle ausgeführt werden. Und die Empfindlichkeit des Messgeräts darf sich im Laufe der Zeit nicht unkontrolliert ändern; ein steter Vergleich des gemessenen Strahlungsstroms der Sonne mit demjenigen einer Strahlungsquelle bekannter Intensität im Labor ist also erforderlich.

Eine solche Eichquelle ist der berühmte Schwarze Körper, dessen Abstrahlung Max Planck im Jahre 1900 mit der nach ihm benannten Strahlungsformel erstmals genau angeben konnte. Dazu muss nur die Temperatur des strahlenden Hohlraums exakt bekannt sein. Idealerweise sollte sie der Temperatur von etwa 5770 Kelvin auf der Oberfläche der Sonne möglichst nahe kommen.

Einer der Wissenschaftler, die sich solche Messungen an der Sonne zur Lebensaufgabe machten, war Dietrich Labs von der Landessternwarte Heidelberg. Vor allem in den 1960er Jahren hat er mit seinen Mitarbeitern Messungen an den hochalpinen Stationen Pic du Midi in den französischen Pyrenäen und Jungfraujoch in den Berner Alpen durchgeführt.

Da ein Schwarzer Körper mit allen seinen Versorgungseinheiten ein unhandliches Gerät für Expeditionen zu solch unwirtlichen Orten ist, schuf Labs »sekundäre« Standardstrahler: stabil leuchtende Wolframbandlampen sowie Xenon- und



Quecksilber-Hochdrucklampen mit einer sonnenähnlichen Ausstrahlung. Diese kleinen und transportablen Strahlungsquellen kalibrierte er im Labor mit einem Schwarzen Körper. Dessen genaue Temperatur wurde wiederum am Erstarrungspunkt von Gold bei T=1064.43 Grad Celsius angehängt. Diese gegenseitigen Anschlüsse erfordern hohes experimentelles Geschick und einen Genauigkeitsfanatiker wie Labs. Das Ergebnis einer solchen präzisen Absoluteichung des Sonnenspektrums durch Labs und Mitarbeiter zeigt die Grafik oben.

Da Sterne vom Spektraltyp der Sonne (G2V) in der Milchstraße häufiger anzutreffen sind, kennen wir so auch den Energiefluss von zahlreichen Sternen gleichen Typs, sofern deren Entfernung bekannt ist. Umgekehrt kann aus der Helligkeitsmessung von G2V-Sternen ihre Entfernung abgeleitet werden (photometrische Parallaxe). An die G2V-Sterne lassen sich Sterne mit anderem Spektraltyp anschließen, so dass die Sonnenmessungen zum Stammbaum eines photometrischen Eichsystems der Sterne wurden.

31

www.astronomie-heute.de Juni 2008

Besuchen Sie uns im Internet!



In unserem Online-Archiv finden Sie alle bisher erschienenen **Sterne und Weltraum**-Artikel seit 2005.

- >> Hier können Sie nach einzelnen Artikeln recherchieren und diese für € 1,als PDF-Dateien kaufen: www.suw-online.de/archiv
- Sie können Sterne und Weltraum auch komplett als Online-Ausgabe abonnieren:

www.suw-online.de/digitalabo

- >> Der Podcast von Sterne und Weltaum und astronomie heute enthält aktuelle Nachrichten rund um Weltraumforschung und Amateurastronomie.
- >> ... oder treten Sie einfach mit unseren Astro-Bloggern in Kontakt: www.kosmologs.de

Diese und weitere kostenlose Service-Angebote finden Sie unter

www.astronomie-heute.de



Didaktisches Material zu diesem Beitrag steht Ihnen kostenlos auf der Website www.wissenschaft-schulen.de zur Verfügung, bei denen es darum geht, mit wenig materiellem Aufwand und entspre-

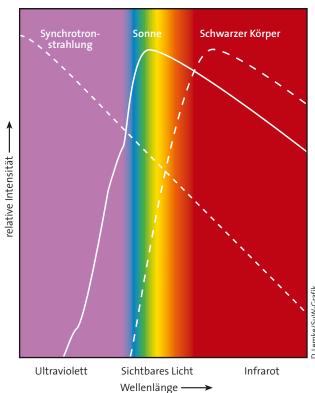
chend mehr Physik- und Mathematikkenntnissen die Solarkonstante zu bestimmen. Unser Projekt »Wissenschaft in die Schulen!« führen wir in Zusammenarbeit mit der Landesakademie für Lehrerfortbildung in Bad Wildbad durch. Es wird von der Klaus Tschira Stiftung gGmbH großzügig gefördert.

Mit der in den 1960er Jahren aufkommenden Möglichkeit extraterrestrischer Messungen verband sich der Wunsch, das Sonnenspektrum auch in dem vom Erdboden aus unzugänglichen Ultravioletten zu kalibrieren. Der klassische Schwarze Körper reichte dafür nicht aus, da er nicht heiß genug wurde und kein bekanntes Wandmaterial Temperaturen von mehr als 3000 Kelvin auszuhalten vermochte. Bei dieser Temperatur liegt das Strahlungsmaximum im nahen Infraroten. Seine Intensität fällt zum Ultravioletten hin um viele Größenordnungen ab. Aus diesem Grund wurden Messungen im mittleren Ultravioletten durch Streulicht aus dem sehr viel helleren sichtbaren Bereich verfälscht, trotz zweifacher Filterung in dem von Labs entwickelten Doppelmonochromator.

Ab 1965 schuf sich Labs mit seinen Studenten einen neuen primären Strahlungsstandard: die Synchrotronstrahlung eines großen Beschleunigers. Energiereiche Elek-

eine Kreisbahn gezwungen werden, strahlen beim Umlauf in tangentialer Richtung helles Licht ab. Das Spektrum dieser Synchrotronstrahlung kann genau berechnet werden, wenn einige messbare Größen, wie Energie der Elektronen und Magnetfeldstärke, bekannt sind. Der Vorteil einer Eichung mit der Synchrotron-Strahlung ist zweifach: ihre Intensität steigt zum Ultravioletten hin an (Grafik unten), und sie kommt aus dem Vakuum des Beschleunigers. Fenster mit Absorptionen und Reflexionen werden so vermeidbar.

Beim Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg haben Labs und seine Doktoranden schließlich Hochdrucklampen als sekundäre Eichquellen angeschlossen. Diese wurden dann unverzüglich zur Ultraviolett-Kalibrierung von Raketen- und Satelliteninstrumenten zur Messung des Zodiakallichtes eingesetzt, das durch Streuung des Sonnenlichts an



Im Gegensatz zu den Spektren thermischer Quellen wie Schwarzer Körper und Sonne steigt die Intensität von Synchrotronstrahlung zu kurzen Wellenlängen hin an. Skizziert ist der relative Verlauf, nicht die absolute Intensität, da letztere von vielen Geometriefaktoren abhängt. Offensichtlich liefert der Schwarze Körper im Ultravioletten ein viel zu kleines Eichsignal für die Sonne, vorteilhafter ist die Synchrotron-Strah-៊ី lung.



Dietrich Labs (1921–2008) forschte an der Landessternwarte Heidelberg und lehrte an der dortigen Universität. Ein letzter Meilenstein in seinem Lebenswerk war die Inbetriebnahme von SOLSPEC auf der Internationalen Raumstation im Februar 2008. Er starb kurz darauf am 16. März.

den interplanetaren Staubteilchen entsteht.

Hauptziel blieb die präzise Messung der direkten Sonnenstrahlung aus dem Weltraum. Das sollte über einen längeren Zeitraum geschehen, um möglichen Änderungen der Solarkonstanten auf die Spur zu kommen. Labs entwickelte deshalb zusammen mit G. Thuillier (Paris) und P. C. Simon (Brüssel) das Sonnenspektrometer SOLSPEC für den Wellenlängenbereich von 180 bis 3200 nm, das erstmals im Dezember 1983 zusammen mit dem europäischen Weltraumlabor Spacelab 1 ins All startete. Der Heidelberger Beitrag umfasste dabei die Schwarzkörper-Eichung des Instruments im Labor und die präzise Eichung der in SOLSPEC mitfliegenden Vergleichslichtquellen am Kennedy Space Center vor dem Start und nach der Landung.

Ziel: Raumstation

In den Jahren 1992 bis 1994 folgten drei weitere Einsätze auf Raumfähren-Missionen der NASA. Diese Flüge waren jedoch auf eine Dauer von ein bis zwei Wochen beschränkt. Erst mit der freifliegenden Weltraumplattform Eureca der ESA, die zwischen August 1992 und Juli 1993 in der Erdumlaufbahn verblieb, konnten Messungen über einen längeren zusammenhängenden Zeitraum durchgeführt werden. Weiterreichende Pläne sahen den Einsatz von SOLSPEC auf der Internationalen Raumstation (ISS) für mindestens 18 Monate vor. Infolge von Verzögerungen im

ZUM NACHDENKEN



Solarkonstante

or mir liegt die Ausgabe vom 21./22. April 2001 der Rhein-Neckar-Zeitung. Auf Seite 5 hat dort die Heidelberger Tageszeitung eine große Reportage über Dietrich Labs und sein Lebenswerk abgedruckt: »Messung der Sonnenstrahlung als Lebensaufgabe«. Fünf Wochen zuvor war der sympathische Professor achtzig Jahre alt geworden. Viele Studenten kennen ihn vom astronomischen Praktikum an der Landessternwarte auf dem Königstuhl, das er lange Jahre betreut hat. Sein Hauptforschunggebiet, die präzise Messung der Solarkonstanten, gab Anregung zu den folgenden Aufgaben.

Aufgabe 1: Die Solarkonstante *S* beschreibt die über das Jahr gemittelte Leistungsdichte der auf die Erde oberhalb der Atmosphäre einfallenden Sonnenstrahlung. Ihr Wert ist:

$$S = 1367 \text{ W/m}^2$$
.

Man berechne mit Hilfe der Solarkonstanten die Leuchtkraft der Sonne L_{\odot} . Die mittlere Distanz Erde–Sonne $r_{\rm AE}$ wird als Astronomische Einheit (AE) bezeichnet: $r_{\rm AE}=1$ AE = 149,6 Millionen km.

Aufgabe 2: Verblüffenderweise gehorcht die Energieabstrahlung der Sonne und der Sterne überhaupt derjenigen eines sogenannten Schwarzen Körpers. Das Stefan-Boltzmannsche Gesetz beschreibt für solche Körper den Zusammenhang zwischen ihrer Leuchtkraft und ihrer Oberflächentemperatur:

$$L_{\odot} = \sigma T_{\odot}^{4} F_{\odot}$$
.

Dabei ist $\sigma=5,67\times10^{-8}~{\rm W~m^{-2}~K^{-4}}$ die Stefan-Boltzmannsche Strahlungskonstante und F_{\odot} die Oberfläche der Sonne. Ihr Radius beträgt: $R_{\odot}=696\,000~{\rm km}$. Man leite aus der in Aufgabe 1 bestimmten Sonnenleuchtkraft ihre Oberflächentemperatur her.

Aufgabe 3: a) Im Perihel der Erdbahn beträgt die Sonnendistanz $r_{\rm P}=147,1$ Millionen km. Auf welchen Wert $S_{\rm P}$ erhöht sich Leistungsdichte im Perihel? Man drücke das Ergebnis auch als prozentuale Erhöhung in Bezug auf die Solarkonstante aus. b) Wie verhält es sich mit der Leistungsdichte $S_{\rm A}$ im Aphel der Erdbahn? Die Sonnendistanz ist dort $r_{\rm A}=152,1$ Millionen km.

Aufgabe 4: Ein Braunkohlebrikett hat den Heizwert $H_{\rm B}=6.0~{\rm kWh/kg}$. Die Masse $m_{\rm B}$ eines solchen Briketts beträgt ein Kilogramm. Man berechne die Leistungsdichte $L_{\rm B}$ eines Briketts pro Tag und Quadratmeter und vergleiche mit der Aussage im Kasten auf Seite 30.

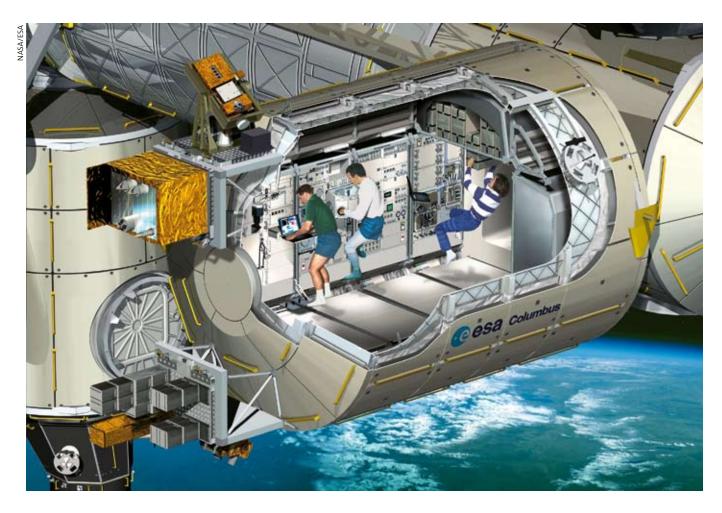
Aufgabe 5: Im Leerlauf benötigt ein Auto etwa einen Liter Sprit pro Stunde. Der Heizwert von Benzin liegt bei $H_{\rm S}=45$ MJ/kg, seine Dichte liegt bei $\varrho_{\rm S}=0.8$ kg/Liter. Man vergleiche die in einem Liter Benzin steckende Verbrennungsenergie mit der an einem guten Tag mit zwölf Stunden Sonnenscheindauer bei einem Wirkungsgrad von dreißig Prozent aufgesammelten Energiemenge einer einen Quadratmeter großen Solarzellenpaneele.

LÖSUNGEN

Ihre Lösungen senden Sie bitte bis zum 15. Juni an: Redaktion SuW – Zum Nachdenken, Max-Planck-Institut für Astronomie, Königstuhl 17, D-69117 Heidelberg. Fax: (+49|0) 6221–528246. Einmal im Jahr werden unter den erfolgreichen Lösern **Preise** verlost: siehe Seite 125

33

www.astronomie-heute.de Juni 2008



Seit Februar 2008 befindet sich das rund einen Meter große Sonnenspektrometer SOLSPEC an Bord der Internationalen Raumstation ISS. Gemeinsam mit einem zweiten Instrument ist es außen an dem europäischen Weltraumlabor Columbus angebracht.

Spaceshuttle-Programm der NASA ließ die Umsetzung jedoch länger auf sich warten. SOLSPEC konnte deshalb erst im Februar 2008 zusammen mit dem europäischen Columbus-Modul zur ISS gebracht werden (Grafik oben).

Die Kalibrierung des Spektrometers erfolgte diesmal unter Verwendung eines neuartigen Hochtemperatur-Schwarzkörpers aus Pyrokohlenstoff ($T \sim 3200$ Kelvin) der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig und der Synchrotron-Strahlungsquelle BESSY II in Berlin. Anders als bei den bisherigen Einsätzen im Weltraum ist es aus Kostengründen diesmal nicht möglich, das Experiment nach erfolgter Mission wieder auf die Erde zurückzubringen und zu rekalibrieren. Es wird eines Tages mit der ausgedienten ISS bei einem gesteuerten »Absturz« in der Erdatmosphäre verglühen.

Die inzwischen auch durch mehrere Satellitenmessungen über drei Jahrzehnte gesammelten Daten zeigen erstaunlich geringe Variationen der Solarkonstanten von ungefähr 0,2 Prozent, aber Schwankungen von mehreren Prozent im Ultravioletten. Letzteres trägt zwar nur mit etwa einem Prozent zur Gesamtstrahlung der Sonne bei, zeigt jedoch eine starke Wechselwirkung mit der Stratosphäre unserer Erde. Bei stärkerer UV-Strahlung steigt die Ozonkonzentration um mehrere Prozent und in der Folge die Temperatur der Stratosphäre. Das kann zu kleineren Rückkopplungseffekten in die unteren Atmosphärenschichten führen. Erstaunlicherweise hat sich die Stratosphärentemperatur seit Beginn der Satellitenmessungen aber geringfügig verringert. Da die Gesamtstrahlung der Sonne jedoch gleich geblieben ist, können wir für den irdischen Temperaturanstieg der letzten Jahrzehnte jedenfalls nicht die Sonne verantwortlich machen.

Ob diese wichtige Aussage auch für die Zeit der ansteigenden Sonnenaktivität im neuen Sonnenfleckenzyklus gilt, wird uns das neue SOLSPEC-Experiment lehren.



DIETRICH LEMKE wirkte von 1965 bis 1967 als Doktorand in der von Dietrich Labs geleiteten Arbeitsgruppe an der Nutzung der Synchrotronstrahlung als primärer

Standard mit. Anschließend war er am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg über viele Jahrzehnte für Weltraumprojekte des Instituts verantwortlich.



HOLGER MANDEL ist seit Anfang der 1980er Jahre in die Arbeitsgruppe von Labs und die anstehenden Kalibrierungskampagnen des SOLSPEC-Experiments

eingebunden. Seit seiner Promotion ist er an der Landessternwarte Heidelberg an der Entwicklung von Instrumenten – unter anderem für das Large Binocular Telescope – beteiligt.



UWE REICHERT entwickelte Anfang der 1980er Jahre als Diplomand in der Arbeitsgruppe von Labs einen Graphit-Hohlraumstrahler zur Kalibrierung des SOL-

SPEC-Experiments. Seit Anfang 2008 ist er Chefredakteur von »Sterne und Weltraum«.

34 Juni 2008 STERNE UND WELTRAUM

Für einen näheren Blick auf die Sonne, werfen Sie einen näheren Blick auf das LS60T/H-a Teleskop

Das LS60T/H-a ist ein Refraktor-Teleskop mit einer Einzellinse (Chromat) mit 60mm Durchmesser.

LS60T/H-a (Chromat) mit 60mm Durchmesser.

Die Brennweite von 500mm erzeugt eine etwa 4,5mm durchmessende Sonnenscheibe durch einen 6mm Block-Filter. Bestellen Sie noch heute und sichern Sie sich Ihr LS60T/H-a.

