

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 95 (1977)
Heft: 12

Artikel: Ändert die Strahlung der Sonne?
Autor: Fröhlich, Claus
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-73351>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 09.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Literaturverzeichnis

- [1] E. Glauser, H. Gugerli, E. Heimgartner, B. Rast, R. Sägger: «Das Erdbeben im Friaul vom 6. Mai 1976 – Beanspruchung und Beschädigung von Bauwerken». Schweiz. Bauzeitung, H. 38, 1976.
- [2] Basler & Hofmann: «Erdbeben Friaul – 6. Mai 1976 – Schäden an Bauwerken», 9. Juli 1976.
- [3] A. Parducci (coordinatore): «Il terremoto del 6 Maggio 1976 nel Friuli». Estratto della rivista «L'industria Italiana del Cemento», Luglio/Agosto 1976.
- [4] Commissione CNEN-ENEL: «Contributo allo studio del terremoto del Friuli del Maggio 1976». Novembre 1976.
- [5] European Mediterranean Seismological Centre: «Revised Hypocenters and Magnitude Determinations of Major Friuli Shocks 1976». Working Group, Strasbourg 1976.
- [6] CNEN-ENEL: Terremoto del Friuli, prima registrazioni della rete di stazioni accelerometriche fisse dell'ENEL e delle stazioni accelerometriche mobili del CNEN». Roma, 18 Maggio 1976.
- [7] CNEN-ENEL: «Uncorrected accelerograms». Rome, July 1976.
- [8] USAEC Regulatory Guide: «Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants». Rev. 1, 12/1973, US Atomic Energy Commission.
- [9] WASH-1255-Newmark N. (Consulting Engineer Services): «A study of vertical and horizontal earthquake spectra». Directorate of Licensing U.S. Atomic Energy Commission, Washington D.C., April 1973.

Adresse der Verfasser: Basler & Hofmann, Ingenieure und Planer AG, Forchstrasse 395, 8029 Zürich.

Ändert die Strahlung der Sonne?

Von Claus Fröhlich, Davos

Am 4. März ist in Davos das 70jährige Bestehen des Physikalisch-Meteorologischen Observatoriums (PMOD) gefeiert worden. Gleichzeitig wurden die neuen Räume im umgebauten, alten Schulhaus von Davos Dorf offiziell übergeben, in die das PMOD mit dem ihm seit 1971 angegliederten Weltstrahlungszentrum letztes Jahr einziehen konnte.

Das PMOD war im Jahre 1907 durch Carl Dorno (1865 bis 1942) gegründet worden. Der wohlhabende Kaufmann und spätere Privatgelehrte aus Königsberg war durch die Krankheit seiner Tochter in die Lage versetzt worden, sein Leben in Davos zubringen zu müssen. Sein vielseitiges wissenschaftliches Interesse galt dem Klima der Landschaft Davos. Mit der Erforschung der Heilwirkung des Hochgebirgsklimas wurde Dorno zu einem der Begründer der Bioklimatologie. Seine private Mess- und Forschungsstation in der «Villa Dora» ging im Jahre 1926 in die Stiftung «Schweiz. Forschungsinstitut für Hochgebirgsklima und Medizin» über. In seiner medizinischen Abteilung befasste sich das Institut vorerst mit der Erforschung der Tuberkulose. Heute, nach dem drastischen Rückgang dieser Seuche, steht die immunologische Abwehr allergischer Krankheiten im Vordergrund der Institutsarbeit.

Nach dem Rückzug Dornos übernahm im Jahre 1929 Walter Mörikofer (1892–1976) die Leitung des Observatoriums. Er trieb die Entwicklung der Strahlungsmessungen (inkl. Bau und Eichung einschlägiger Instrumente) vorwärts. Seinem Ansehen dürfte es zu verdanken sein, dass die Meteorologische Weltorganisation in Genf eines ihrer beiden

Strahlungszentren – das andere befindet sich in Leningrad – in Davos einrichten wollte.

Das Weltstrahlungszentrum (World Radiation Center) hat im Jahre 1971 seine Tätigkeit aufgenommen. Materiell wird es vom Bund, dem Kanton und der Landschaft Davos unterstützt. Es befasst sich mit der Messung der Sonnenstrahlung und ihrer Wechselwirkung mit der Atmosphäre, der Entwicklung moderner Präzisionsinstrumente zur Strahlungsmessung, der Ausarbeitung von Messmethoden und der Veranstaltung von Kursen, an denen international die Standard-Strahlungsmessinstrumente verglichen werden. Der folgende Artikel ist der Schrift entnommen, die aus Anlass der Festlichkeiten erschienen ist. Sein Verfasser ist der Direktor des PMOD und des Weltstrahlungszentrums. Die Festschrift enthält ausserdem einen Abriss der Geschichte des Observatoriums, geschrieben vom Präsidenten der Stiftung, Felix Suter.

-yer

Praktisch die ganze Energie, die der Erde zur Verfügung steht, kommt als Strahlung von der Sonne. Deshalb ist die Frage, ob diese Energiequelle konstant oder variabel ist, von allgemeinem Interesse. Die physikalische Klimatologie z.B. bemüht sich, einen Zusammenhang zwischen globalen Klimaänderungen und eventuellen, langsamen Änderungen der Strahlungsenergie der Sonne zu finden. Aber auch kurzfristige Schwankungen der Sonnenstrahlung können z.B. das tägliche Wetter beeinflussen, weil ein nicht geringer Anteil der Sonnenenergie in der Atmosphäre absorbiert wird und die globale Zirkulation der Luftmassen antreibt. Die Frage nach Klimaänderungen und deren Ursachen, insbesondere auch als Folge zivilisatorischer Belastungen der Atmosphäre, ist heute besonders aktuell. In diesem Zusammenhang ist es äusserst wichtig zu wissen, welcher Anteil im Strahlungshaushalt der Erde sich natürlich verändert und welcher Anteil von der menschlichen Zivilisation verändert wird.

Von der Sonne wissen wir, dass sie mehr oder weniger «aktiv» ist. Die Aktivität äussert sich z.B. durch die Anzahl Sonnenflecken, die als dunkle Stellen auf der Sonnenoberfläche beobachtet werden können: eine grosse Anzahl bedeutet grosse Aktivität, eine kleine Anzahl geringe Aktivität. Diese Aktivität ändert sich innerhalb eines 11jährigen Zyklus. 1969 war das letzte Maximum, 1980 wird das nächste erwartet. Das letzte Maximum wurde eben durchlaufen. Es drängt sich auf, die Gesamtausstrahlung der Sonne in einen Zusammenhang mit dieser Aktivität zu bringen. Falls es gelingen sollte, eine Formel dafür zu finden, könnte durch einfache Beobachtung der Sonne auf deren Gesamtausstrahlung geschlossen werden, und es könnte die Sonnenstrahlung auch für vergangene Zeiten noch bestimmt werden, da Sonnenfleckenbeobachtungen von



den Astronomen seit sehr früh regelmässig aufgezeichnet worden sind.

Aus solchen Überlegungen heraus hat z.B. die *Smithsonian Institution in Washington (USA)*, unter der Leitung von *S. P. Langley* und später von *C. G. Abbot*, um die Jahrhundertwende begonnen, die Gesamtstrahlung der Sonne, die sogenannte *Solarkonstante*, täglich zu bestimmen.

Bestimmung der Solarkonstante

Prinzipiell stehen zwei Möglichkeiten zur Messung der Solarkonstante zur Verfügung:

- *Direkte* Messung mit einem *Radiometer*, das *ausserhalb der Atmosphäre* stationiert ist, z.B. von einem *Satelliten* aus. Das Radiometer muss dann eine ausgeglichene spektrale Empfindlichkeit haben, damit es das ganze Spektrum der Sonne gleichermassen erfasst.
- *Indirekte* Messung von der Erde aus. Indirekt in dem Sinne, als eine *Extrapolation der gemessenen Werte* notwendig ist, um den Wert der Solarkonstante zu bestimmen.

Messungen von der Erde aus

Betrachten wir zuerst den 2. Fall: Bei klarem Himmel wird die Strahlung der Sonne auf dem Weg durch die Atmosphäre bis auf Meeresniveau total auf etwas weniger als zwei Drittel geschwächt. Die *Schwächung* ist von der *Wellenlänge des einfallenden Lichtes* abhängig. In Bild 1 ist das extraterrestrische und ein terrestrisches Sonnenspektrum aufgezeichnet, wie es bei klaren Tagen auf Meereshöhe anzutreffen ist. Daraus ist ersichtlich, dass z.B. die blauen und violetten Strahlen und besonders die ultravioletten sehr viel stärker abgeschwächt werden als die Strahlen auf der roten Seite des sichtbaren Spektrums. Andererseits nimmt die Intensität der Schwächung gegen das Infrarote wieder zu, teilweise sogar so weit, dass im Wellenlängenbereich um $3\mu\text{m}$ praktisch keine Sonnenstrahlung mehr auf die Erdoberfläche fällt. Zwei physikalische Phänomene bestimmen die Schwächung: die *Streuung an Luftmolekülen*, an *Staub* und an *Dunstteilchen* (Aerosolen) und die *Absorption an Gasen*. Die *extrem starke Schwächung* der *ultravioletten Strahlung* ist durch die Absorption an *Ozon* bedingt, die *Schwächung im Infraroten* durch *Absorption an Wasserdampf und Kohlendioxid*. Im dazwischen liegenden Spektralbereich ist hauptsächlich die Streuung für die Schwächung verantwortlich, und zwar im violetten und blauen Bereich, die Streuung an Luftmolekülen (*Rayleigh-Streuung*: blauer Himmel, rote aufgehende und untergehende Sonne), im sichtbaren und nahen Infrarot dagegen hauptsächlich die Streuung an Aerosolen (*Mie-Streuung*: weisser Hof um die Sonne).

Die Gesamtschwächung hängt zudem noch von der Länge des Weges in der Atmosphäre ab: Im Laufe eines Tages (vom Aufgang bis zum Untergang der Sonne) ändert sich die Länge dieses Weges kontinuierlich. Diese Tatsache wird nun dazu verwendet, aus terrestrischen Messungen die Solarkonstante zu extrapolieren. Aus der Geometrie der Atmosphäre, wie sie schematisch in Bild 2 dargestellt ist, lässt sich die *Weglänge als Funktion der Sonnenhöhe* berechnen. Die Weglänge, normiert auf die Weglänge senkrecht nach oben, wird als *Luftmasse m* bezeichnet. Die Schwächung der Strahlung durch die Atmosphäre gehorcht einer Exponential-Funktion, falls nur in einem engen Wellenlängenbereich gemessen wird. Der Exponent ist dann proportional zur Luftmasse und zum entsprechenden Absorptions- bzw. Streukoeffizienten.

Dieses Gesetz wird nun angewendet, um bei einer bestimmten Wellenlänge den extraterrestrischen Wert zu bestimmen, indem die während eines Tages bei verschiedenen Luftmassen gemessenen Werte auf Luftmasse $m = 0$ extrapoliert werden. Das Vorgehen ist für einige Wellenlängen in Bild 3 dargestellt. Wie aus dem Bild ersichtlich ist, sind die

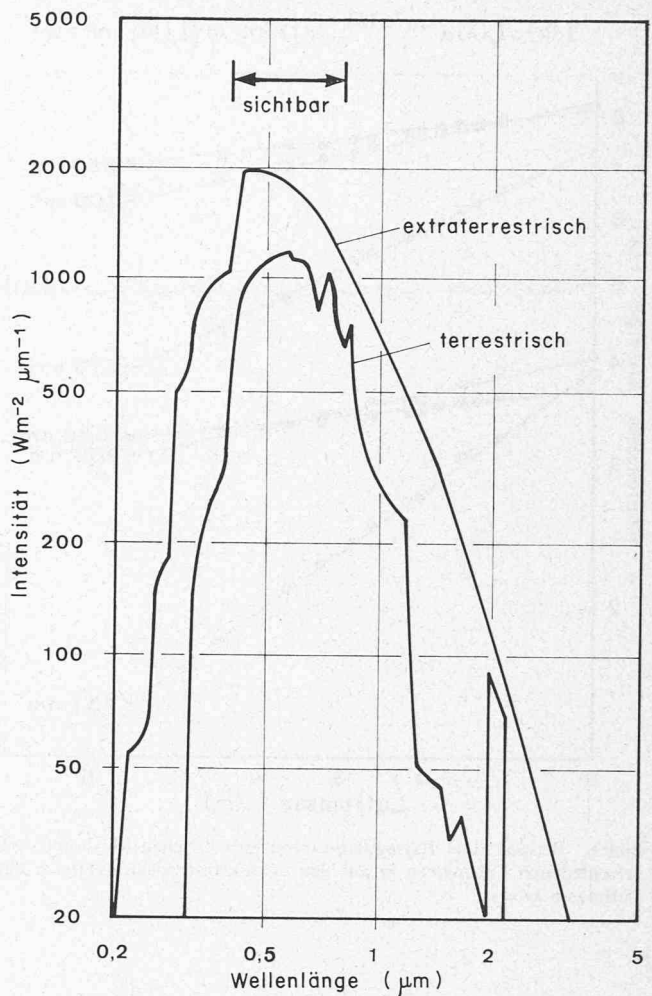


Bild 1. Spektrale Verteilung der Sonnenstrahlung ausserhalb der Atmosphäre (extraterrestrisch) und auf Meeresniveau (terrestrisch). Der Bereich der sichtbaren Strahlung erstreckt sich von etwa $0,4$ bis $0,7\mu\text{m}$. Ausserhalb des Sichtbaren beginnt gegen kleinere Wellenlängen das ultraviolette (UV) und gegen grosse Wellenlängen das infrarote Gebiet (IR)

Steigungen der Kurven, die proportional zum Absorptions- bzw. Streukoeffizienten sind, von der Wellenlänge abhängig, wie auch schon in Bild 1 abzulesen ist.

Die Solarkonstante enthält aber alle Wellenlängen und kann deshalb nicht durch eine analoge Extrapolation von Messungen mit einem *Pyrheliometer*, das die *Gesamtstrahlung* misst, gewonnen werden. Aber das Resultat der Gesamtstrahlungsmessung kann zur Eichung der spektralen Messungen bei verschiedener m verwendet werden, indem diese auf-

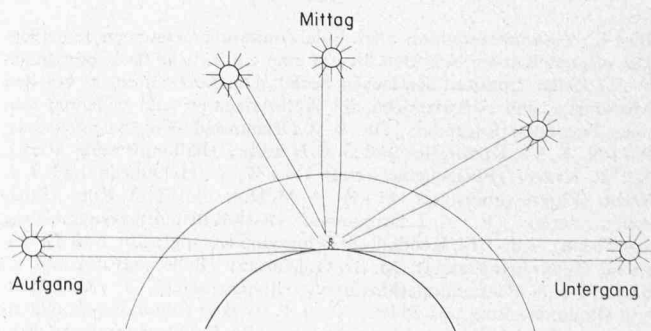


Bild 2. Geometrie der Schichtdicke der Atmosphäre als Funktion der Sonnenhöhe

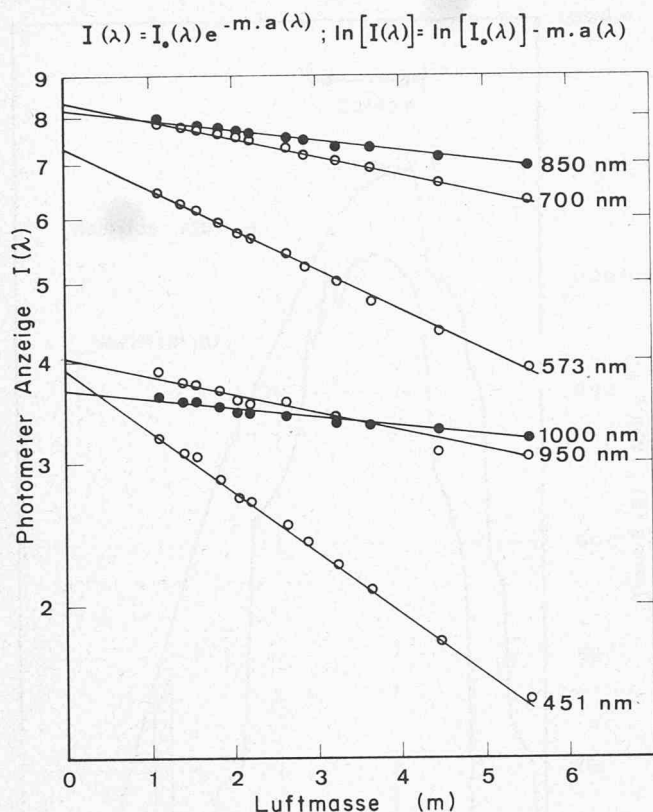


Bild 3. Beispiel einer Extrapolation von terrestrischen Messungen bei verschiedenen Luftmassen m auf den extraterrestrischen Wert bei der Luftmasse $m = 0$

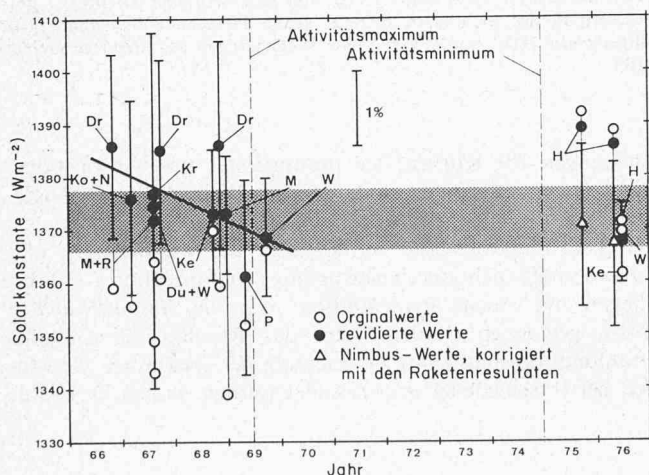


Bild 4. Zusammenstellung aller Solarkonstantenmessungen seit 1966. Die offenen Kurven bedeuten die auf eine einheitliche Basis bezogenen Werte (Solar Constant Reference Scale). Die Bezeichnungen bei den Messungen sind Abkürzungen der Autorennamen und bedeuten von links begonnen folgendes: Dr: A. J. Drummond (Flugzeugmessung); Ko+N: K. Ya. Kondratjev und G. A. Nikolsky (Ballonmessung 30 km); Kr: R. Kruger (Flugzeugmessung); Du+W: C. H. Duncan und J. J. Webb (Flugzeugmessung); M+R: A. McNutt und T. A. Riley (Flugzeugmessung); Dr: A. J. Drummond (X-15-Raketenflugzeugmessung von 80 km); Ke: J. M. Kendall; Sr (Flugzeugmessung); Dr: A. J. Drummond (Flugzeugmessung); M: D. G. Murcay (Ballonmessung aus 35 km); P: J. A. Plamondon (Mariner-Satellitenmessung); W: R. C. Willson (Ballonmessung aus 35 km); H: J. R. Hickey (Nimbus-6-Satellitenmessung); die Δ bedeuten die durch das NASA-Raketenexperiment korrigierten Daten, H, Ke, W: J. R. Hickey, J. M. Kendall Sr., R. C. Willson (NASA Raketenmessung 100 km)

summiert in jedem Fall gleichviel ergeben müssen wie das Gesamtstrahlungsinstrument anzeigt. Bei der Auswertung werden dann die so normierten spektralen Messungen extrapoliert und die Aufsummierung der « $m = 0$ »-Werte ergibt dann die Solarkonstante. Auf diese Art und Weise wurden die täglichen Solarkonstantenbestimmungen der Smithsonian Institution von den Bergstationen *Montezuma* (Chile), *Table Mountain* (Kalifornien) und anderer Stationen durchgeführt. Eine ähnliche Methode verwendeten D. Labs und H. Neckel aus Heidelberg bei ihren Messungen auf dem *Jungfraujoch*.

Um die Genauigkeit zu steigern, ist es von Vorteil, solche Messungen von möglichst hohen Bergstationen durchzuführen, wo die gemessenen Werte schon viel näher an den extraterrestrischen liegen. Dies hat auch dazu geführt, die gleichen Methoden von Flugzeugen aus zu verwenden. Da dort jedoch die zur Verfügung stehenden Messzeiten um ein Vielfaches kürzer sind als von Bergstationen aus, ist der Genauigkeitsgewinn meist klein. Erst die Messung von Ballonen aus Höhen von mehr als 30 km bringt eine Verbesserung der Genauigkeit gegenüber Bergstationen.

Satelliten als Messstationen

Die zweite Möglichkeit, die alle oben genannten Probleme elegant umgeht, ist natürlich die Messung von Satelliten aus. Im Prinzip genügt dort ein Instrument, das die Gesamt-Strahlungsleistung misst. Die Genauigkeit der Experimente mit amerikanischen Satelliten zur Bestimmung der Solarkonstante, d.h. die Messungen von *Mariner 6* und *7* (1969) und die noch laufenden Messungen von *Nimbus 6*, ist leider noch sehr gering. Dies ist hauptsächlich bedingt durch die für die Konstruktion der Radiometer zur Verfügung stehenden, für die Raumfahrt geeigneten Technologien. Zudem ist die Eichung der Satelliteninstrumente sehr schwierig. Dasselbe gilt vom Flug des *X-15 Raketenflugzeuges* im Jahre 1967, bei dem erstmals die Solarkonstante von ausserhalb der Atmosphäre, von 80 km Höhe, gemessen wurde.

Letztes Jahr ist von der *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) ein *Raketenexperiment* gestartet worden, das drei verschiedene, selbsteichende *Absolutradiometer* moderner Konstruktion auf eine Höhe von 100 km brachte. Während 5 Minuten wurde die Intensität der Sonne gemessen und so wahrscheinlich der genaueste Momentanwert der Solarkonstante bestimmt. Für die Zukunft sind ähnliche Experimente von Satelliten geplant. Die NASA wird 1980 den «*Solar Maximum Mission*»-Satelliten starten, der u.a. mit einem der Raketeninstrumente zur Bestimmung der Solarkonstante ausgerüstet ist. Ebenso plant die *European Space Agency* (ESA) Experimente vom *Spacelab* und von Satelliten aus.

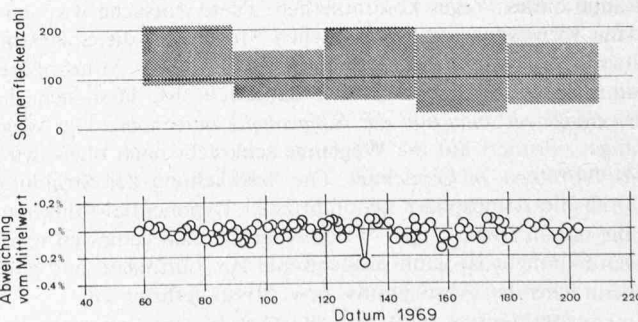


Bild 5. Die untere Darstellung zeigt die zeitlichen Schwankungen der Solarkonstante, gemessen vom *Mariner 6*. Auf der oberen Darstellung sind die Bereiche der Zürcher Sonnenfleckenzahlen, die während des entsprechenden Monats gemessen wurden, aufgezeichnet. Schon diese Darstellung zeigt, dass wahrscheinlich keine Korrelation zwischen Sonnenfleckenzahlen und Solarkonstante besteht

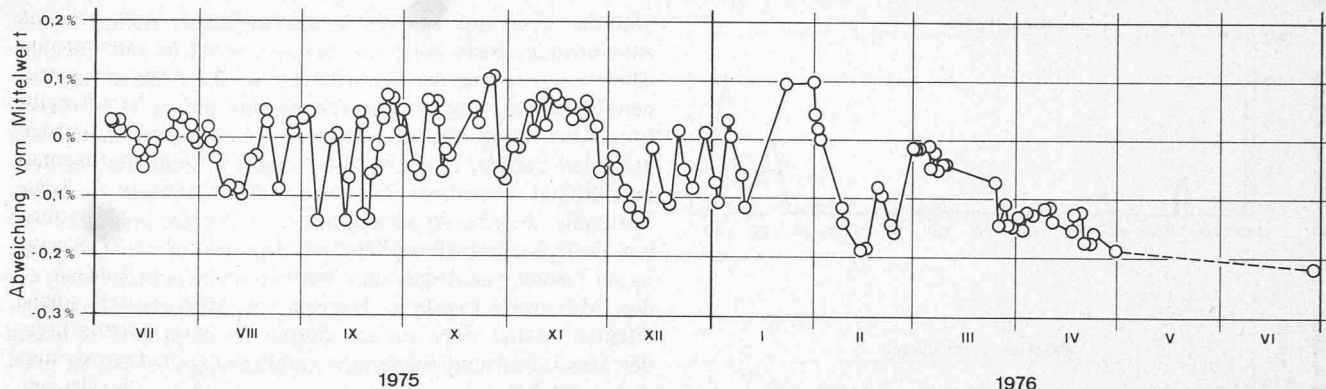


Bild 6. Zeitliche Schwankungen der Solarkonstante, wie sie vom Nimbus-6-Instrument gemessen wurden. Die Einzeldaten für Mai und Juni 1976 sind noch nicht erhältlich. Der Zeitpunkt der Messung im Juni entspricht dem Zeitpunkt des Raketenexperimentes der NASA, das zur Absoluteichung der Nimbus-Daten verwendet werden kann

Resultate bisheriger Messungen

Ein Problem bei der Diskussion von Solarkonstantenbestimmungen liegt darin, dass die Werte *vergleichbar* sein müssen, d.h. sie müssen *auf die gleiche Basis* bezogen sein. Für *meteorologische Strahlungsmessungen* wurde im Bemühen um Einheitlichkeit und Kontinuität vor 20 Jahren eine spezielle *Strahlungsbasis* definiert. Sie wurde dann durch die verschiedenen *internationalen Pyrheliometervergleiche*, die von der *Meteorologischen Weltorganisation* (WMO) organisiert und 1959, 1964, 1970 und 1975 hier in Davos durchgeführt wurden, weltweit bekannt gemacht. Die Basis weicht jedoch – wie man in den letzten Jahren festgestellt hat – vom internationalen Einheitensystem ab, d.h. die Watt pro m^2 , die der Meteorologe an seinem Pyrheliometer abliest entsprechen nicht den Watt pro m^2 , die der Physiker definiert.

Entwicklung eines hochpräzisen Absolutradiometers

Um dieser unbefriedigenden Situation abzuweichen, wurde hier am Institut ein *hochpräzises Absolutradiometer* entwickelt, dessen Messresultate direkt in den vom Physiker definierten Einheiten angegeben werden – deshalb werden sie «absolut» genannt. Damit liess sich der Unterschied zwischen der meteorologischen und physikalischen Basis bestimmen. Zur Steigerung der Zuverlässigkeit der Differenzbestimmung wurden hier auch internationale Vergleiche von verschiedenen Absolutradiometern durchgeführt. Mit den Resultaten der Vergleiche und denen der verschiedenen Pyrheliometervergleiche war es nun möglich, die von den verschiedensten Instrumenten und auf die verschiedensten Standardinstrumente bezogenen Solarkonstantenbestimmungen auf eine gemeinsame Basis zu bringen. Zudem können auch *Schwankungen der Standardinstrumente* ein Problem sein. Da aber Vergleichsresultate über längere Zeiträume existieren, konnten auch dafür Korrekturen angebracht werden. Das Resultat dieser Normierung ist in Bild 4 dargestellt und zeigt eindeutig, dass dadurch der Streubereich der Messungen reduziert wurde, was die Zuverlässigkeit der Resultate verbessert.

Absolutwert und Schwankungen der Solarkonstante

Das ist die Information, die uns jetzt zur Verfügung steht, um den Absolutwert der Solarkonstante und deren eventuelle Schwankungen zu diskutieren. Die Werte liegen in einem Bereich von 1362 bis 1388 Wm^{-2} , womit eine *obere Grenze für mögliche Schwankungen von total 2 Prozent* gegeben ist. Eine solche, aber lang anhaltende Veränderung würde nach der Ansicht von *W.D. Sellers* zu einer *Eiszeit* führen.

Neben diesen Einzelresultaten gibt es auch Aufzeichnungen von Solarkonstantenbestimmungen, die über einen *gewissen Zeitraum mit dem gleichen Instrument oder nach der*

gleichen Methode durchgeführt wurden, so die Resultate der Mariner-(P in Bild 4) und Nimbus-(H in Bild 4) Satelliten (Bild 5 und 6) und die langjährigen Aufzeichnungen der Smithsonian Institution (Bild 7). Im Gegensatz zu den Einzelresultaten zeigen besonders die Satellitenresultate einen bedeutend kleineren Schwankungsbereich.

Kurzzeitige Schwankungen

Wechselwirkungen zwischen Sonnenstrahlung und Sonnenaktivität?

Erstmals wurde von *C.G. Abbot* die Hypothese aufgestellt, die *Strahlung der Sonne könnte von der Sonnenaktivität beeinflusst* werden. Seine Analyse des langjährigen Materials bestätigte auch weitgehend die Hypothese. Davon gingen auch *K.Ya. Kondratjev* und *G.A. Nikolsky* von der *Universität Leningrad* (K+N, Bild 4) aus, als sie versuchten, die breite Streuung ihrer Solarkonstanten-Resultate zu erklären. Ihre Messungen wurden im Gegensatz zu jenen der Smithsonian Institution von Ballonen aus durchgeführt, bestanden aber nur in der Messung der Gesamtstrahlung der Sonne; alle atmosphärischen Korrekturen erfolgten rein rechnerisch. Sie haben einen Zusammenhang zwischen Sonnenfleckenzahl und ihren Resultaten gefunden, und zwar steigt die Solarkonstante um ca. 2 Prozent monoton mit zunehmender Sonnenfleckenzahl bis zu einer Anzahl von etwa 100 und nimmt dann mit zunehmender Anzahl wieder ab. Dieser Zusammenhang galt lange als gefestigt, wahrscheinlich weil er frühe Interpretationen des Smithsonian Materials quantitativ bestätigte. Einer genauen Analyse der Messdaten hält er jedoch nicht stand, da die Genauigkeit der Messungen zusammen mit den rechnerischen Korrekturen zu schlecht ist, um einen solchen Zusammenhang signifikant zu beweisen. Trotzdem wird er immer

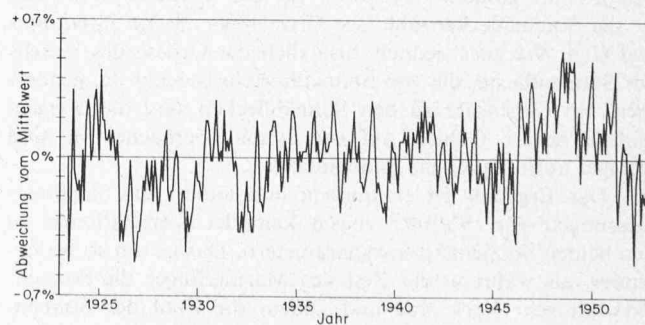


Bild 7. Zeitliche Schwankungen der Monatsmittel der Solarkonstante nach den Daten der Smithsonian Institution. Die Werte stellen die «besten» Werte dar, die aus den Messungen an den verschiedenen Stationen gewonnen wurden

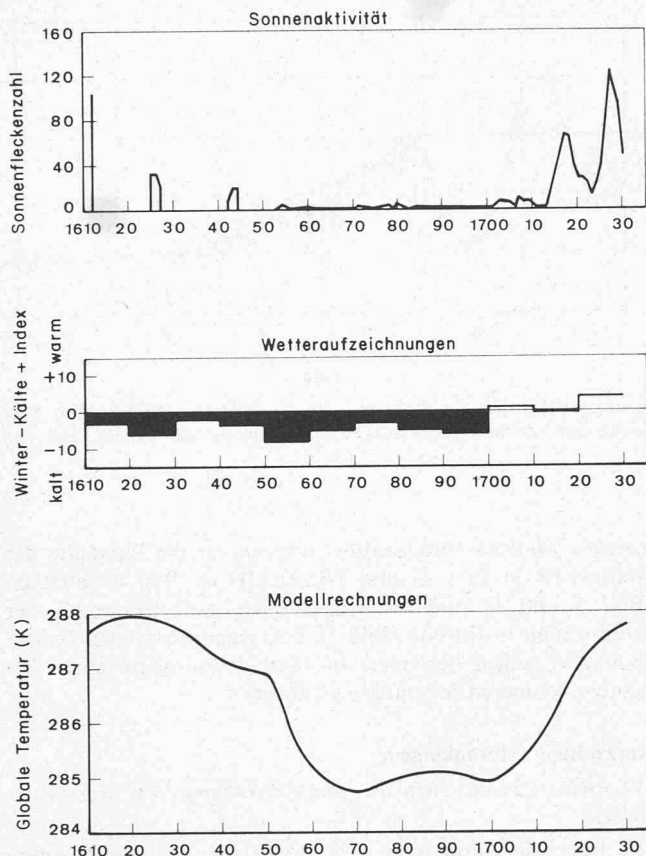


Bild 8. Zusammenhang zwischen Sonnenaktivität und Klima, dargestellt am Beispiel des Maunder-Minimums: Die oberste Darstellung zeigt die mittlere jährliche Sonnenfleckenanzahl. Nach 1700 setzt eindeutig wieder der elfjährige Sonnenzyklus ein, der während des Minimums zu fehlen scheint. Die zweite Darstellung stellt ein Mass für die Winterhärte dar, das zeigt, dass vor 1700 die Winter bedeutend kälter waren als nachher. Die unterste Darstellung zeigt das Resultat einer Modellrechnung, die aber auf einer wahrscheinlich zu starken Abhängigkeit der Solarkonstante von den Sonnenflecken beruht (siehe Text)

noch als Eingabe für Modelle zur Berechnung von Klimaänderungen verwendet, wahrscheinlich vor allem, weil noch keine echte Alternative besteht.

Gegen Ende des letzten Jahres hat P. V. Foukal vom Harvard Observatory (Boston) in einer neuen statistischen Analyse der Smithsonian- und der Mariner-Daten diesen Zusammenhang nochmals näher untersucht. Um die Analyse nicht durch langfristige Trends, die auch durch Schwankungen der Eichung der Messinstrumente verursacht sein können, zu stören, hat er nur nach unmittelbaren und kurzfristigen Korrelationen zwischen der Solarkonstante und der Sonnenaktivität gesucht. Als Mass für die Sonnenaktivität hat er die Sonnenfleckenanzahl, wie C. G. Abbot, K. Ya. Kondratjev und G. A. Nikolsky, jedoch zusätzlich die Grösse des Anteils der Sonnenfläche, die von Sonnenfackeln bedeckt ist, genommen. Im Gegensatz zu den Sonnenflecken sind die Sonnenfackeln hellere Gebiete auf der Sonnenoberfläche. Sie sind weniger auffällig als die Sonnenflecken.

Das Ergebnis ist erstaunlich und lautet: die Satellitenmessungen von Mariner zeigen keinerlei Korrelationen zu den beiden Sonnenaktivitätsparametern. Das ist um so bedeutender, als während der Zeit des Marinerfluges die Sonnenaktivität sehr hoch war und zudem die Zahl der Sonnenflecken in einem sehr grossen Bereich schwankte (vgl. oberen Teil von Bild 5). Die Analyse der von der Erde aus gemessenen Smithsonian-Daten hingegen zeigt eine Korrelation, wenn auch eine viel schwächere als bisher angenommen. Die

von der Erde aus bestimmte Solarkonstante nimmt zu mit zunehmender Bedeckung der Sonnenoberfläche mit Fackeln: eine Vergrösserung der Fackelfläche um 0,2 Prozent der Sonnenoberfläche erhöht die Solarkonstante um ca. 0,1 Prozent. Eine Korrelation mit den Sonnenflecken hingegen kann nicht gefunden werden. Die Abschwächung des Einflusses der Sonnenaktivität gegenüber der Abbotschen Analyse desselben Materials, die eine Änderung um ca. 1 Prozent ergab, könnte auf die Tatsache zurückgeführt werden, dass hier nur Perioden in der Grösse von Tagen und Wochen untersucht wurden. Ob das Abbotsche Ergebnis dagegen auf wirklichen Langfristeffekten basiert oder einfach durch die natürliche Streuung der Messungen und Eichungen zufällig ausgelöst ist, ist noch nicht geklärt.

Kurzwellige UV-Strahlung und Ozonproduktion

Was bedeutet dieses Resultat? Es scheint, dass irgendein Mechanismus in der Atmosphäre existiert, der ihre Transmission durch die Sonnenaktivität beeinflusst, und zwar so, dass er nicht durch die üblichen Extrapolationsmethoden kompensiert werden kann. Es ist aus Satelliten- und Raketenmessungen bekannt und heute gefestigt, dass die Fackelgebiete eine gegenüber der Umgebung stark erhöhte Ultraviolettstrahlung aussenden (im Wellenlängenbereich um 200 nm und darunter). Damit wird die gesamte UV-Strahlung der Sonne erhöht, ohne jedoch die Solarkonstante merklich zu beeinflussen, da der UV-Anteil energetisch sehr gering ist.

Die erhöhte, sehr kurzwellige UV-Strahlung führt nun in der hohen Atmosphäre zur erhöhten Produktion von Ozon, das seinerseits die Sonnenstrahlung absorbiert, und zwar im nahen Ultraviolett und auch im sichtbaren Bereich des Spektrums. Dadurch, dass das Ozon auf einer Höhe zwischen 20 und 45 km konzentriert ist, variiert die Dicke der durchstrahlten Ozonschicht mit veränderlicher Sonnenhöhe etwas anders als die Dicke der Gesamtluftschicht, die durch die Luftmasse m ausgedrückt wird. Dadurch sind die «Geraden» im Ozongebiet (Bild 3) leicht gekrümmt und führen bei linearer Extrapolation zu einer vom Ozongehalt abhängigen Abweichung vom wahren Wert. Erst genaue Modellrechnungen werden diese mehr qualitative Aussage beurteilen können. Dazu wären aber auch noch genauere statistische Analysen des Ozongehaltes als Funktion der Sonnenaktivität notwendig. Solche Analysen sind sehr schwierig durchzuführen, weil der Ozongehalt über einem bestimmten Ort wegen der Zirkulation in der Stratosphäre stark schwankt. Die existierenden Analysen, z.B. der langjährigen Daten von Arosa, zeigen eine gewisse Abhängigkeit vom Aktivitätszyklus der Sonne. Solche Resultate wurden aber noch nie auf die Probleme der Solarkonstantenbestimmung angewendet.

Ein weiterer Anhaltspunkt, dass das Ozon für die Beeinflussung der Solarkonstante verantwortlich gemacht werden könnte, ist, dass gerade im sichtbaren Spektralbereich, wo das Ozon etwa 5% der einfallenden Strahlung absorbiert, das Solarspektrum mit einer relativ schlechten Genauigkeit bekannt ist, obschon dort wegen der grossen Intensität der Strahlung eigentlich die höchste Genauigkeit bei der Messung erwartet werden sollte. Auch diese Messungen wurden nur von Bergstationen oder Flugzeugen und noch nicht von Satelliten aus durchgeführt. Eine nähere Untersuchung der Abhängigkeit des Ozongehaltes von der Aktivität der Sonne scheint auch zur Beurteilung der heute so oft diskutierten Möglichkeiten einer Veränderung dieser Schicht durch Abfälle unserer Zivilisation angezeigt. Denn auch hier müssen die Verursacher – Natur und Mensch – unterschieden werden können.

Zusammenfassend kann also folgendes über den kurzzeitigen Zusammenhang zwischen Sonnenaktivität und Solarkonstante gesagt werden:

- Die Solarkonstante variiert, wenn überhaupt, mit der Sonnenfleckenzahl oder der Sonnenfackelfläche weniger als mit der heute erreichten Messgenauigkeit festgestellt werden kann.
- Die Strahlung an der Erdoberfläche wird durch die Sonnenaktivität leicht beeinflusst, jedoch nicht so stark wie bisher angenommen. Eine mögliche Erklärung ist die Beeinflussung des Ozongehaltes durch die von der Sonnenaktivität, insbesondere von den Sonnenfackeln, verursachten UV-Schwankungen.

Langfristige Schwankungen

Ob es langfristige Veränderungen der Solarkonstante im Laufe von Jahren bis Jahrhunderten gibt, darüber sagen die bisherigen Resultate nichts aus. Deshalb möchte ich noch kurz auf dieses Problem eingehen.

Gibt es einen Zusammenhang zwischen Klima und Sonnenaktivität?

J. Eddy vom National Center of Atmospheric Research (NCAR) in Colorado (USA) hat die langjährigen Aufzeichnungen der Sonnenfleckenhäufigkeit nach andauernden Maxima bzw. Minima untersucht, um abzuklären, ob es einen Zusammenhang zwischen Klima und Aktivität gibt. In Bild 8 ist dieser Zusammenhang dargestellt.

Ferner ist im untersten Diagramm das Resultat einer vorläufigen Modellrechnung von S.H. Schneider vom National Center of Atmospheric Research (NCAR) dargestellt. Obwohl diese Rechnung den Effekt auf die Solarkonstante mit der Kondratjev-Nikolsky-Beziehung berücksichtigt und somit anscheinend stark überbewertet, zeigt sie doch das qualitativ richtige Verhalten; die Änderung der globalen Temperatur um etwa 3 Grad ist jedoch zu gross und hätte recht verheerende Folgen gehabt. Es bedeutet aber, dass eine korrekte Berücksichtigung der Strahlungsveränderungen in der Troposphäre möglicherweise das europäische Temperaturverhalten während des Maunder-Minimums erklären könnte. Ausserdem muss natürlich auch beachtet werden, dass ein bis jetzt unbekannter Effekt in der Sonne für beides – die schwache Aktivität und eine erniedrigte Solarkonstante – verantwortlich sein könnte, ohne dass das eine vom andern abhängig sein muss.

Messungenauigkeiten und langfristige Änderungen

Ausgehend von diesen Betrachtungen liegt der Versuch nahe, ähnliches aus den modernen Messungen abzulesen. Die in Bild 4 dargestellten revidierten und somit direkt vergleichbaren Solarkonstantenbestimmungen könnten die Vermutung nahelegen, dass auch innerhalb des 11jährigen Aktivitätszyklus Modulationen vorkommen. Die Resultate sind aber teilweise durch den möglichen Ozoneffekt beeinflusst. Damit sind natürlich nicht mehr alle Messungen echt vergleichbar. Auch sind die Messunsicherheiten relativ gross, d.h. sie sind wahrscheinlich zu gross, um einen eindeutigen Trend festzustellen. Trotzdem könnte man sich eine Abnahme der Solarkonstante gegen das Aktivitätsmaximum vorstellen. Auch die Nimbus-6-Daten, die zwar noch nicht in ihrer definitiven Form vorliegen, deuten einen ähnlichen Trend an, wie dem Bild 6 leicht zu entnehmen ist. Die tiefen Temperaturen während des Maunder-Minimums widersprechen jedoch dieser Tendenz, ebenso die Foukalsche Analyse. Aus diesem Material auf langfristige Änderungen schliessen zu wollen, ist eher kühn, weil die Messungenauigkeiten zu gross sind.

Schweizer Solarkonstantenexperiment

Trotzdem oder gerade deswegen scheint mir das Problem einer weiteren Bearbeitung wert zu sein. Dazu sind aber weitere Messungen notwendig, die eine hohe Genauigkeit und eine Zuverlässigkeit garantieren, die auch langfristige Inter-

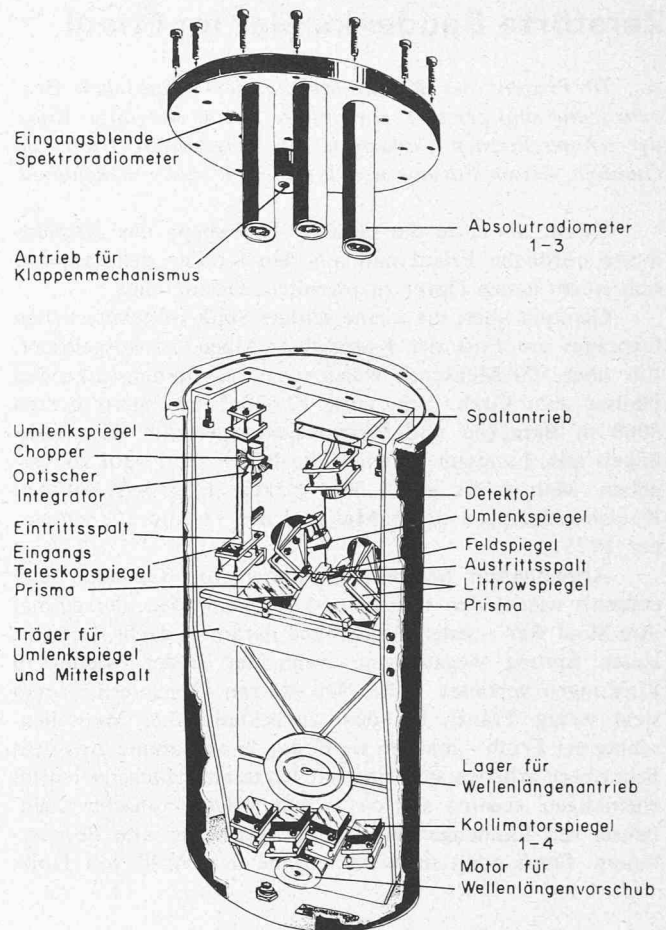


Bild 9. Schematische Darstellung des Solarkonstanten-Experiments, das sich an unserem Institut im Bau befindet. Es enthält drei Absolutradiometer und ein Spektroradiometer zur Messung der spektralen Restextinktion. Das Experiment wird in eine Ballongondel des Observatoriums Genf eingebaut. Die Messungen werden aus einer Höhe von rund 35 km ausgeführt werden. Ein erster Flug ist im Frühjahr 1978 vorgesehen

pretationen zulässt. Die Raumforschung und die modernen Absolutradiometer erlauben solche Messungen. Da aber die nächsten Satellitenmessungen erst Anfang der achtziger Jahre geflogen werden können, haben wir uns hier entschlossen, so rasch wie möglich ein *Solarkonstantenexperiment* durchzuführen, das den oben genannten Ansprüchen genügt. Dies soll der Anfang sein für eine Reihe von Messungen, die dann durch die geplanten Satelliten- und Spacelab-Messungen der NASA und ESA fortgesetzt werden können.

In Bild 9 ist das von uns im Rahmen eines vom Schweizerischen Nationalfonds unterstützten Forschungsprogrammes entwickeltes Solarkonstantenexperiment dargestellt. Als Plattform für das Experiment wurde ein Stratosphärenballon gewählt, da sich nur so kurzfristig ein finanziell tragbares und präzises Experiment durchführen lässt. In Zusammenarbeit mit dem Observatorium Genf, das langjährige Erfahrungen mit Stratosphärenballon-Experimenten hat, soll ein erster Flug im Frühling 1978 stattfinden. Das Experiment, das drei Absolutradiometer und ein Spektrometer enthält, wird die Solarkonstante mit einer Absolutgenauigkeit von $\pm 0,15$ Prozent bestimmen. Wenn das Experiment erfolgreich verläuft, wird dies die genaueste Absolutbestimmung der Solarkonstante überhaupt sein.

Adresse des Verfassers: Dr. C. Fröhlich, Weltstrahlungszentrum, Physikalisch-Meteorologisches Observatorium, 7260 Davos Dorf.