

Zeitschrift: Schweizer Schule
Band: 41 (1954)
Heft: 8: Dorfbrunnen ; Sonnerenergie ; Bayrische kath. Lehrerschaft

Artikel: Die Energie der Sonne
Autor: Jenal, C.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-530021>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 19.11.2024

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

lung der Sonne, entspricht aber einer jährlichen Massenzunahme der Erde um ca. 60 000 Tonnen. Doch erst in 100 Millionen Jahren summiert sich dieser Massengewinn

auf den milliardsten Teil der Gesamtmasse der Erde, vorausgesetzt, daß in dieser Zeitperiode die Sonnenstrahlen weder zu- noch abnehmen.

MITTELSCHULE

DIE ENERGIE DER SONNE

Von Dr. C. Jenal, Kriens

Energiefragen gehören zu den aktuellsten Gegenwartsproblemen. Das haben wir während und noch unmittelbar nach dem Kriege erfahren, und in manchen Ländern müssen es die Menschen heute noch bitter erleben. Das Erdöl ist nicht nur ein Wirtschaftsfaktor, sondern wird gerade deshalb auch zu einem bedeutenden politischen Faktor. Die Weltproduktion an Erdöl beträgt jährlich rund 300 Millionen Tonnen. Weniger politische Bedeutung haben Steinkohle und Wasserkräfte. Sie sind aber nichtsdestoweniger wichtig. Es werden jährlich über eine Milliarde Tonnen Steinkohle auf der ganzen Welt gefördert und nahezu 500 Milliarden Kilowattstunden elektrische Energie erzeugt. Der Energiebedarf wächst beständig, die Vorräte an Erdöl und Kohle nehmen aber rapid ab. Die Kohlenvorräte der Erde schätzt man auf etwa 5 Billionen Tonnen. Die Wasserkräfte sind allerdings überall noch sehr ausbaufähig. Die total mögliche Leistung wird auf etwa 7 Milliarden veranschlagt. Das entspricht einer Jahresleistung von nahezu 50 Billionen Kilowattstunden. Wissenschaft und Technik werden sicher noch neue Energiequellen erschließen. Man verspricht sich ja gerade von der Atomenergie eine große Zukunft.

Seit etwa hundert Jahren ist auch die Energieproduktion der Sonne zu einem Problem geworden, d. h. man ist sich seither bewußt, daß die Wärme- und Leuchtkraft der Sonne auch nicht unbegrenzt sein kann

und daß sie einmal erkalten muß. Der Energieverlust der Sonne, ihre Gesamtstrahlung, läßt sich leicht berechnen. Durch genaue Messungen weiß man, daß die Erde pro cm^2 und Minute 1,9 Kilokalorien Sonnenenergie empfängt. Man nennt diese Größe Solarkonstante. Die Gesamtenergie, die die Sonne pro Minute ausstrahlt, ergibt sich, wenn man die Solarkonstante mit einer Kugeloberfläche (gemessen in cm^2) vom Radius der Entfernung Erde-Sonne, also 150 Millionen km (15 Billionen cm), vervielfacht. Das ergibt pro Jahr die phantastische Zahl von 3×10^{30} (3 mit 30 Nullen) Kilokalorien oder 3×10^{27} Kilowattstunden. Demgegenüber beträgt der technische Energieaufwand der Erde (an Erdöl, Kohle und Elektrizität) jährlich etwa 10 Billionen (1×10^{16}) Kilokalorien oder 12 Billionen Kilowattstunden (12×10^{12}). Die gewaltigen Holzmengen, die jährlich verbrannt werden und noch andere, nicht erfaßbare Energiemengen, vor allem die vielen Kalorien, die die Lebewesen aus der Nahrung ziehen, sind dabei nicht inbegriffen. Da auch die statistischen Zahlen keineswegs genau sind, kann es sich bei diesen Angaben bloß um die Größenordnung handeln. Man kann etwa 20×10^{12} Kilowattstunden oder 20×10^{15} Kilokalorien annehmen. Das ist 100 bis 200 Billionen mal weniger als die jährliche Energiestrahlung der Sonne. Die Energie, die die Sonne in einer einzigen Sekunde ausstrahlt, würde den Energieaufwand der Erde für mehrere Millionen Jahre decken.

Nun strahlt aber die Sonne schon seit mindestens 2 Milliarden Jahren immer die gleiche Energiemenge in den Weltraum hinaus, vielleicht auch länger. Über das genaue Alter der Sonne besteht noch keine Einigkeit. Zwei Milliarden Jahre ergibt sich aus der Fliehgeschwindigkeit der Spiralnebel (Hubble'sche Konstante). Aus astrophysikalischen Überlegungen resultiert ein bedeutend höheres Alter. Bestünde die Sonne aus reinem Kohlenstoff, dann hätte sie bei dessen Verbrennung die angegebene Energiemenge bloß etwa 6000 Jahre liefern können (Waldmeier, 1945). Eine reine Wasserstoffkugel von der Masse der Sonne hätte durch Oxydation diese Energie 24 000 Jahre lang gespendet. Der Sauerstoff hätte in beiden Fällen von außen kommen müssen. Wären Kohle und Sauerstoff, beziehungsweise Wasserstoff und Sauerstoff in der Sonne im richtigen Verhältnis gemischt gewesen, dann hätte es im ersten Fall bloß für rund 1500, im zweiten für etwa 2600 Jahre gereicht. Diese zwar sachlich unzutreffenden Berechnungen beleuchten in sehr drastischer Weise das Problem der Energieerzeugung in der Sonne.

Auf eine besser begründete Möglichkeit der fortwährenden Energieerzeugung hat zuerst Helmholtz aufmerksam gemacht, nämlich auf Zusammenziehung des Sonnenballs. Die Sonne ist ein Gasball oder darf trotz der hohen durchschnittlichen Dichte von 1,4 als solcher betrachtet werden. Es werden alle Gasgesetze auf sie angewandt. Wenn man ein Gas zusammendrückt, erwärmt es sich. Das kann man an jeder Velopumpe feststellen. Durch langes, intensives Pumpen wird die Pumpe allmählich sehr warm. Das rührt nun nicht etwa von der Reibung des Pumpenstempels an der Wand des Pumpenrohrs her, sondern tatsächlich von der starken Zusammenpressung der Luft beim Pumpen, denn es erwärmt sich der unterste Teil am stärksten. Die Kraft, die den Sonnengasball zusammendrückt, kommt nicht von außen, sondern sitzt in

der Sonne selber. Es ist die Gravitationskraft. Die Sonne wird nicht eigentlich zusammengedrückt, sondern zusammengezogen. Im Effekt ist es dasselbe. Nun hat die Sonne aber eine hohe Temperatur, und die Gasteilchen sind in einer rasenden Wirbelbewegung begriffen. Dadurch streben sie auseinander und erzeugen einen Druck, der nach außen gerichtet ist und daher dem Gravitationsdruck entgegenwirkt. Solange Gravitations- und Gasdruck in der Sonne einander das Gleichgewicht halten, verändert sich die Größe der Sonne nicht. Durch die Ausstrahlung kühlt sie sich aber ab. Mit der Temperaturabnahme erniedrigt sich auch der Gasdruck. Der Gravitationsdruck bleibt jedoch konstant und wird somit größer als der Gasdruck. Deshalb zieht sich die Sonne zusammen. Dadurch erwärmt sie sich aber automatisch wieder. Nach Eddington vermag dieser Prozeß die Sonnenstrahlung für etwa 20 Millionen Jahre zu decken. Verglichen mit dem minimalen Alter der Sonne von 2 Milliarden Jahren ist das immer noch viel zu wenig.

Heute betrachtet man als Energiequelle der Sonne subatomare Prozesse, Atomumwandlungen. Es sind aber nicht Atomzertrümmerungen, die dabei die entscheidende Rolle spielen, wie bei technischen oder andern atomaren irdischen Prozessen (Atom-bombe, Radioaktivität), sondern im Gegenteil atomare Aufbauprozesse, Kernreaktionen, wobei aus Elementen mit niederm Atomgewicht solche mit höherm Atomgewicht entstehen, z. B. aus Wasserstoff Helium. Der amerikanische Physiker H. A. Bethe hat zwei bestimmte Kernreaktionen für die Energieproduktion der Sonne als besonders wichtig erkannt: die Protonenreaktion (Wasserstoff reagiert mit Wasserstoff) und den Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus. Dabei verwandelt sich Kohlenstoff durch Wasserstoffanlagerung in Stickstoff, dieser auf gleiche Weise über ein Sauerstoffisotop in ein Stickstoffisotop, aus dem dann schließlich durch nochmalige Wasser-

stoffanlagerung wieder ein Atom Kohlenstoff und ein Atom Helium resultieren. Der Kohlenstoff spielt in diesem Zyklus lediglich die Rolle eines Katalysators. Das eigentliche Ergebnis ist die Bildung eines Atoms Helium aus vier Protonen. Nach Waldmeier werden auf diese Weise etwa 80 % der Sonnenenergie bestritten, durch die direkte $H + H =$ Reaktion bloß 20 %. Auch für diesen Prozeß braucht es einen Katalysator, damit er in Gang kommt, nämlich eine Spur Helium selber. Die Energiemengen, die bei solchen Kernreaktionen entstehen, sind gewaltig. Die Energie entsteht dabei auf Kosten der Materie. Heute weiß man, daß Energie und Materie äquivalent sind und daß beide Zustände ineinander übergeführt werden können. Ein Gramm Materie ergibt dabei etwa 20 Milliarden Kilokalorien. Die Energiebeträge, die bei Verbrennungsprozessen frei werden, sind dagegen minim: für ein Gramm Kohle 8 Kilokalorien, für ein Gramm Erdöl 10 bis 11 Kilokalorien. In den 2 Milliarden Jahren ist bloß etwa 0,1 Promill der Sonnenmasse zerstrahlt worden. (Waldmeier, S. 44/45).

Bedingung, daß Atomkerne miteinander reagieren, ist eine hohe Temperatur. Wegen ihrer positiven elektrischen Ladung stoßen sie einander ab und könnten daher nie in so intime Berührung miteinander kommen, wie es für eine Reaktion notwendig ist. Diese abstoßende Kraft wird durch die Wärmebewegung überwunden. Die Geschwindigkeit der Partikel hängt von der Temperatur ab. Die Bewegungsenergie kann nun derart groß sein, daß zwei Atomkerne (in der Sonne sind die Atome sehr stark jonisiert) mit großer Wucht aufeinander prallen und dann miteinander reagieren. Waldmeier (S. 33) gibt eine Formel an, mit der die Minimaltemperatur berechnet werden kann, bei welcher die verschiedenen Elemente miteinander reagieren. Für Protonen ist eine Temperatur von 55 Millionen Grad notwendig. Bei 110 Millionen Grad dringen Protonen in Heliumkerne ein, bei

220 Millionen Grad wirken erst Heliumkerne aufeinander. Waldmeier berechnet die Temperatur im Mittelpunkt der Sonne auf etwa 20 Millionen Grad. Bei dieser Temperatur scheinen keine Reaktionen möglich. Man muß jedoch bedenken, daß die Temperatur immer nur die mittlere Energie der Partikel angibt. Deren Geschwindigkeit und damit die Energie variiert aber in weiten Grenzen. Ein kleiner Bruchteil hat immer eine Energie, die ein Vielfaches der mittleren Energie ist. Es können also schon bei 20 Millionen Grad einzelne Atome miteinander reagieren. Ob aber diese vereinzelt Prozesse ausreichen, die Sonnenstrahlung zu bestreiten, ist immerhin problematisch. Waldmeier schreibt dazu auf S. 46 folgendes: »Zusammenfassend erhalten wir das außerordentlich einfache Ergebnis, daß unter den jetzt in der Sonne herrschenden Bedingungen sich lediglich eine indirekte Verwandlung von Wasserstoff in Helium vollzieht, daß alle übrigen Elemente in nennenswerten Mengen weder erzeugt noch abgebaut werden. Die Bildung der 92 chemischen Elemente und ihrer Isotope kann sich deshalb nicht in der Zeit vollzogen haben, in welcher sich die Sonne nur unwesentlich verändert hat, sondern muß mindestens 2 Milliarden Jahre zurückliegen. Wann, wo und wie die chemischen Elemente gebildet worden sind, ist heute noch ein ungelöstes Rätsel.«

Nun weichen aber die Angaben über die Zentraltemperatur der Sonne stark voneinander ab. Eddington (1928) gibt 40 Millionen Grad an. A. Gasser (1945) kommt auf Grund ganz neuer, stichhaltiger Überlegungen sogar auf fast 200 Milliarden Grad. Er erhält dieses Resultat auf zwei voneinander unabhängigen Wegen, was immerhin stark für dessen Wahrscheinlichkeit spricht. Nach ihm besteht die Sonne aus einer homogenen Zentralkugel mit der konstanten Temperatur von 200 Milliarden Grad. Sie enthält 97 % der ganzen Sonnenmasse und besteht nur aus schweren Atomkernen, die

einander berühren. Kernreaktionen finden keine mehr statt. Diese Zentralkugel umgibt eine Hülle von bedeutend dünnerer Masse, in der Temperatur und Dichte von außen nach innen ansteigen. In der Hülle sind Kernreaktionen möglich. Nach Gassers Ansicht spielen sie aber als Energiequelle für die Sonnenstrahlung keine Rolle. Er vermutet, daß sie beim Vorgang der Planetenbildung als auslösende Ursache bedeutsam sind, denn wenn sich die dabei frei werdende Energie zur normalen Strahlung addiere, werde das Gleichgewicht am Sonnenrand gestört, was zur Ablösung von Planeten führe. Auf die nähere Begründung dieser Ansicht kann hier nicht eingegangen werden.

Als Energiequelle der Sonnenstrahlung genügt nach Gasser die Kontraktion der Sonne vollauf. Emden (siehe Eddington, 1928) ging für deren Berechnung von der verschwundenen potentiellen Energie aus, die dasselbe ist wie die frei gewordene Gravitationsenergie, indem sich die Sonne von unendlicher Verdünnung und Ausdehnung auf die heutige Dichte und Größe zusammenzog. Er fand dafür folgende Formel: $E = 1,5 \cdot G \cdot \frac{M^2}{R}$ (E = verschwundene potentielle Energie, G = Gravitationskonstante, M = Sonnenmasse, R = Sonnenradius). Daraus ergibt sich, wie schon erwähnt, eine Energie, die die Sonnenstrahlung für etwa 20 Millionen Jahre decken würde. Weil aber die Sonne ein Gasball ist und die Gasgleichungen ohne Bedenken auf sie angewendet werden, kann man für die Berechnung der frei gewordenen Sonnenenergie auch von der allgemeinen Gasgleichung ($pv = RT$) ausgehen. Nach dem Virialsatz (einem wichtigen Satz der Mechanik) wird nämlich die Hälfte der Kontraktionsenergie in Wärme umgewandelt, die andere Hälfte aber ausgestrahlt. Durch Kombination der Gasgleichung mit dem Virialsatz läßt sich nun eine Formel ableiten, nach der man den Strahlungsbetrag für eine belie-

bige Kontraktion berechnen kann. Die jährliche Strahlungsenergie sei mit L bezeichnet, in a Jahren daher $a \cdot L$. Es ergibt sich nun folgende Beziehung: $a \cdot L = M \cdot c_v \cdot T \cdot \ln \frac{r_1}{r_2}$ (M = Sonnenmasse, c_v = spezifische Wärme pro Gramm, T = absolute Temperatur, \ln = natürlicher Logarithmus, r_1 und r_2 = die Sonnenradien vor und nach der Kontraktion). Die Temperatur ist darin leider ein ganz unbestimmtes Element, denn sie steigt von außen nach innen stark an. Der gesamte Energieinhalt der Sonne, nämlich $M \cdot c_v \cdot T$ kann also nicht berechnet werden. Wenn die Sonne aus einer inkompressiblen Zentralkugel bestünde, dann wäre auch die Masse nicht ohne weiteres bestimmbar. Man dürfte dann nämlich nur mit der kompressiblen Hülle rechnen. Nun hat aber Gasser auf ganz anderm Wege genau dieselbe Formel abgeleitet, und es ist ihm auch gelungen, für M und T ganz bestimmte Werte anzugeben. Für T gilt nach ihm einfach die konstante Temperatur der Zentralkugel. Für M gibt er in seiner ersten Publikation (1945) den Wert $2,7 \cdot 10^{30}$, in einer zweiten Veröffentlichung (1946) jedoch $6,2 \cdot 10^{30}$ Gramm an. Da c_v aus physikalischen Messungen bekannt ist, ergibt sich aus $M \cdot c_v \cdot T$ ein konstanter Faktor.

Gasser hat seine Formel nicht zum Zwecke aufgestellt, den Betrag der Kontraktion für eine bestimmte Strahlungsenergie zu berechnen, sondern das Alter der Planeten. Er formuliert daraus ein Gesetz und fügt es den drei bekannten Keplerschen Gesetzen als viertes Planetengesetz hinzu: »Der Altersunterschied zweier Planeten ist der Differenz der Logarithmen ihrer Bahnradien proportional.« Seine Formel verdient deshalb große Beachtung, weil sie z. B. für die Erde dasselbe Alter ergibt, wie man es auf fundamental anderm Wege (aus dem Zerfall der radioaktiven Substanzen in der Erdrinde) erhalten hat. Mit der gleichen Formel kann man nun aber auch ausrechnen, um wieviel sich der Sonnenradius ver-

kürzen mußte, um die Strahlungsenergie für eine bestimmte Anzahl Jahre nur aus der Kontraktion zu bestreiten. Zu diesem Zweck formen wir die Formel um zu:

$$\ln \frac{r_1}{r_2} = a \cdot \frac{L}{M \cdot c_v \cdot T}$$

Für $\frac{L}{M \cdot c_v \cdot T}$ ergibt sich nach Gasser (1945) $2,4 \cdot 10^{-9}$. Für die Zeit, seit der es Menschen gibt (vielleicht bis eine halbe Million Jahre; vgl. hierzu Dr. P. Theodor Schwegler OSB. »Die biblische Urgeschichte im Lichte der Natur- und Geisteswissenschaften« in »Schweizer Schule« Nr. 14 vom 15. Nov. 1950), ergibt der Ausdruck rechts $1,2 \cdot 10^{-3}$. Das macht für das Verhältnis der beiden entsprechenden Bahnraden 1,0012, und daraus resultiert eine Verkürzung des Sonnenhalbmessers von rund 800 km oder des scheinbaren Sonnendurchmessers von etwa zwei Bogensekunden. Während des jährlichen Laufes der Erde um die Sonne variiert der scheinbare Sonnendurchmesser zwischen Perihel und Aphel infolge der verschiedenen Entfernung um etwa 64 Bogensekunden. Eine Verkürzung des Sonnenradius' auf die Hälfte des heutigen Betrages würde die Strahlungsenergie für weitere 300 Millionen Jahre bestreiten. Entsprechende Werte ergäben sich, wenn man von heute an rückwärts rechnete. Diese Resultate weichen erheblich von dem ab, was man bisher in dieser Beziehung für möglich hielt. Wendet man jedoch die Emden-Eddingtonsche Formel nur für Gassers Zentralkugel an, die 97 % der gesamten Sonnenmasse ausmacht, aber einen Radius von bloß etwa 20 km hat, dann resultiert eine Strahlungsdauer von mehr als 100 Milliarden Jahren. Dabei ist die Energie für die starke Erwärmung und Jonisation der Zentralkugel schon abgerechnet. Es kann sich hier natürlich nicht darum handeln, ein Urteil über die Möglichkeit der Zentralkugel abzugeben. Die Gasserschen Auffassungen verdienen aber alle Beachtung (siehe Begleitwort von Dr. P. Stuker von der Urania-

sternwarte Zürich zu Gassers Publikation von 1946).

Einige Worte sind noch zu sagen, ob es Anhaltspunkte dafür gibt, daß der Sonnenradius einst um ein Vielfaches des heutigen größer war und ob er sich noch weiter verkürzen kann. Hand in Hand damit ginge eine Veränderung der Sonnendichte. Ihre heutige mittlere Dichte ist 1,4. Man kennt aber Sterne mit vieltausendfach größerer Dichte, als sie unsere Sonne hat. Es sind das die sogenannten weißen Zwergsterne. Ein Siriusbegleiter hat eine Dichte von 30 000 bis 40 000 Gramm pro cm^3 . Es gibt aber auch solche von der Dichte 600 000, was 600 kg pro cm^3 ausmacht. Dann gibt es aber auch Sterne, die unvorstellbar geringe Dichte haben. Das sind die roten Riesensterne. Unter ihnen hat Alpha-Tauri, Aldebaran, eine Dichte von 0,00002 Gramm pro cm^3 , Alpha-Orionis, Beteigeuze, 0,0000006 Gr, Antares 0,0000003 Gramm. Da alle Sterne ungefähr die gleiche Masse besitzen, müssen diese roten Riesensterne einen bedeutend größeren Radius als die Sonne haben. Z. B. ist der Stern Epsilon im Fuhrmann so groß, daß er, an die Stelle unserer Sonne gesetzt, noch über die Saturnbahn hinausreichte. Unsere Sonne hat sich wahrscheinlich auch aus einem ehemaligen roten Riesenstern entwickelt und wird diese Entwicklung als weißer Zwergstern beenden.

Literatur.

- Eddington A. S.: *Der innere Aufbau der Sterne*, deutsch von E. v. der Pahlen, Berlin 1928.
 Gasser A.: *Entstehung, Aufbau, Energiehaushalt und Alter der Sterne und ihre Planeten*. Mitteilungen der Naturwissenschaftlichen Gesellschaft in Winterthur, Heft 24, 1945.
 — *Ein neues kosmisches Weltbild*, 1946, Bern.
 Waldmeier M.: *Sonne und Erde*, Zürich, 1945.

*U*nsere Zeit liebt die einfachen Formeln, denn sie verwechselt gern deren Handlichkeit mit Wahrheit.

ROMANO GUARDINI