

PETER BOCHSLER¹

Viel Neues unter der Sonne

Zusammenfassung des Vortrags vom 4. Juni 2013

*Auch wenn es laut Prediger 1/9 nichts Neues **unter** der Sonne gibt, liefert die Forschung **über** die Sonne fast alljährlich neue Überraschungen. Die Sonne bietet ein interdisziplinäres Forschungsgebiet par excellence: Moderne Sonnenmodelle ruhen auf vielen Pfeilern, und neue Erkenntnisse über einzelne Teilgebiete bringen gelegentlich frühere, als gesichert geglaubte Grundlagen wieder ins Wanken. An Einzelbeispielen aus dem 20. Jahrhundert soll gezeigt werden, wie die Astrophysik und die Sonnenforschung aus Erkenntnissen von verschiedenen Zweigen der Naturwissenschaften profitiert haben und – umgekehrt – Gebiete ausserhalb der Sonnenforschung und Astrophysik befruchtet haben.*

Seit dem 19. Jahrhundert ist bekannt und akzeptiert, dass die Energieumsetzung im Sonneninnern nicht auf chemischen Reaktionen, also einem «Feuer», basieren kann. Seit 80 Jahren hat man auch verstanden, dass die Produktion von Sonnenenergie letztlich auf Kernfusion beruht; aber trotz intensiver Bemühungen über die letzten sechs Jahrzehnte hinweg ist es nicht gelungen, diesen Prozess auf der Erde friedlich nutzbar zu machen. Schliesslich soll nicht verschwiegen werden, dass es im modernen Forschungsbetrieb, trotz aller Bemühungen zur Interdisziplinarität, schwierig geworden ist, die Übersicht über die vielen neuen Ergebnisse zu behalten und diese richtig zu gewichten.

Feuer und Sonne: Unterschiede der Energieumsetzung

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts hat man verstanden, dass die Sonne ihre Strahlungskraft nicht aus einer gewöhnlichen Verbrennung, wie etwa aus einem Kohlefeuer, aufrechterhalten kann. Bis gegen Ende des 19. Jh. hielt sich dann die These, die Strahlungsleistung werde aus der Umsetzung von Gravitationsenergie gespiesen, d.h. durch die Kontraktion der Sonne und durch den Einfall von Meteoriten auf die Sonne. Lord Kelvin hat aufgrund dieser Überlegung das Alter der Sonne auf etwa 20 Millionen Jahre geschätzt. Dieser Wert war aber im Widerspruch zu einer neueren Schätzung, die Charles Darwin aufgrund der Erosion einer geologischen Formation («Weald») in Südostengland gemacht hatte.

¹ Prof. Dr. Peter Bochsler, Physikalisches Institut, Universität Bern und Space Science Center, University of New Hampshire, Durham NH, USA

Er veranschlagte deren Alter auf einige hundert Millionen Jahre, womit genug Zeit für die Evolution der Spezies durch natürliche Selektion vorhanden gewesen wäre, was aber bedingt hätte, dass die Erde älter als die Sonne wäre.

Dieser Widerspruch konnte erst mit der Entdeckung der speziellen Relativitätstheorie zu Beginn des 20. Jahrhunderts geklärt und beseitigt werden. Man hatte gelernt, dass im Prinzip Materie in Energie umgewandelt werden kann. Gleichzeitig hatte man mit Hilfe der natürlichen Radioaktivität von gewissen Elementen genauere Methoden zur Bestimmung des Alters von Gesteinen entwickelt.

Friedrich Georg Houtermans, Professor am Physikalischen Institut der Universität Bern von 1955 bis 1966, hat zu beiden Forschungszweigen, zur Nukleosynthese und zur Altersbestimmung von Erde und Meteoriten, massgeblich beigetragen: Zusammen mit Robert Atkinson publizierte er 1929 einen Artikel, in welchem die Details der nuklearen Verbrennung mit Hilfe des von George Gamow untersuchten Tunneleffektes erklärt werden. Gamow hatte mit Hilfe der Quantentheorie beschrieben, wie mit Hilfe dieses Effektes geladene Heliumkerne gelegentlich den Potenzialwall eines Atomkerns durchdringen und so zum Alpha-Zerfall des Kernes führen können. Atkinson und Houtermans spekulierten, dass dieser Effekt auch zu einer umgekehrten Kernreaktion führen könnte und so aus vier Wasserstoffkernen ein Heliumkern gebildet werden könnte. Später hat Houtermans, anhand von Blei-Blei-Altern, das Alter der Erde und des Sonnensystems mit vorher unerreichter Präzision auf 4.6 Milliarden Jahre bestimmt.

Vergleichen wir den Metabolismus der Sonne mit demjenigen eines gewöhnlichen Kohlefeuers, so finden wir die folgenden Bilanzen:

Proton-Proton-Zyklus im Sonneninnern (vgl. Abb. 1): Brutto werden aus vier Protonen ein Heliumkern erzeugt, dabei werden 26.7 MeV freigesetzt. Auf ein kg He sind dies 200'000 MWh. Dabei gehen gemäss der Einstein'schen Formel, $E=mc^2$, sieben Gramm Materie verloren.

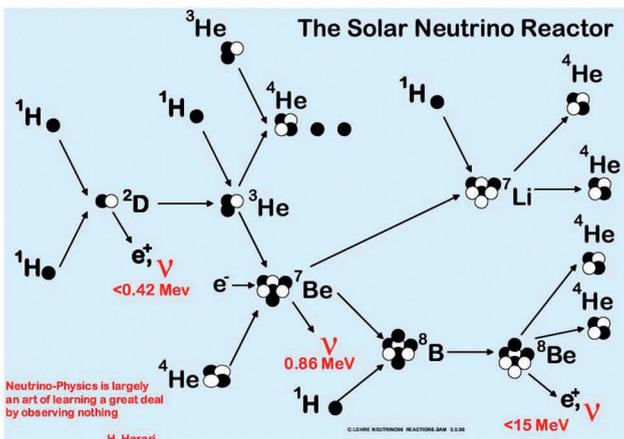


Abbildung 1: Schema des Proton-Proton-Zyklus.

In einem Feuer werden beim Verbrennen von 1 kg Kohle 8.3 kWh Energie frei (und es gehen 0.3 Mikrogramm Materie verloren). Aus dem Vergleich dieser Zahlen wird sofort klar: Selbst wenn die ganze Sonne aus Kohle bestünde, würde bei der gegenwärtigen Strahlungsleistung dieses Brennmaterial nicht sehr weit reichen. Betrachtet man aber den Metabolismus der Sonne als Ganzes, so stellt man fest, dass dieser viel langsamer ist als beispielsweise bei einem Menschen, der ca. 100 W Leistung bei 70 kg Körpergewicht umsetzt. Im Fall der Sonne sind dies lediglich 0.014 W in 70 kg Sonnenmaterie. Die Tatsache, dass die Sonne mit ihrem riesigen Energievorrat so sparsam umgeht, mag mit dazu beigetragen haben, dass genügend Zeit vorhanden war, damit auf der Erde Leben entstehen und sich entwickeln konnte. Der tiefere Grund dafür, dass dieser Prozess derart langsam verläuft und die Sonne nicht wie ein Strohfeuer abbrennt, bzw. in Form einer Supernova-Explosion ihren ganzen Energievorrat in Kürze freisetzt, liegt in der Teilchenphysik. Der erste Schritt im Protonzyklus, die Vereinigung von zwei Protonen zu einem Deuteriumkern unter Freisetzung eines Positrons (ganz links im Schema von Abbildung 1), ist sehr langsam: Ein durchschnittliches Proton in der Sonne hat eine Lebenserwartung von 10 Milliarden Jahren, bevor es sich mit einem anderen Proton vereinigt; entsprechend langsam ist der Verbrauch des Brennstoffs, und entsprechend lang ist die Lebensdauer der Sonne als «gewöhnlicher» Stern. So vergehen bei relativ konstanter Strahlungsleistung etwa 10 Milliarden Jahre, bevor die Sonne nach Erschöpfung des Wasserstoffvorrates zum roten Riesen anwächst und dabei die innersten Planeten verschluckt.

Bei all den Reaktionen, die in *Abbildung 1* dargestellt sind, wird den Teilchen kinetische Energie vermittelt, die letztlich in Wärme- und Lichtstrahlung umgewandelt wird. Diese Strahlung dringt allmählich zur Sonnenoberfläche. Tatsächlich wird die Strahlung auf dem Weg vom Sonneninnern zur Oberfläche immer wieder durch Atomkerne und Elektronen vom Weg abgelenkt. Strahlung kann auch als ein Fluss von Lichtteilchen (=Photonen) verstanden werden: Diese Lichtteilchen bewegen sich zwar mit Lichtgeschwindigkeit und könnten die Sonne auf direktem Weg spätestens zwei Sekunden nach ihrer Entstehung verlassen; in Wirklichkeit werden sie aber so häufig von ihrer Flugrichtung abgelenkt, dass sie erst nach einigen tausend Jahren den Weg durch das Labyrinth der streuenden Kerne und Elektronen in den Weltraum finden.

In den äusseren Zonen der Sonne herrschen kühlere Bedingungen. Das hat zur Folge, dass die schwereren Elemente (schwerer als Helium) nicht mehr voll ionisiert sind. Sie bieten der Strahlung einen stärkeren Widerstand, und die Temperaturunterschiede zwischen innen und aussen sind so gross, dass sich wie in einer Pfanne mit heissem Wasser Konvektion entwickelt: Es gibt am Boden dieser Zone heisse Gaszellen, die sich dank des Auftriebes wie Heissluftballone zur Oberfläche bewegen; sie dehnen sich dabei aus, kühlen sich ab und geben am Schluss ihren Wärmeinhalt an die Umgebung in den oberen Schichten ab. Umgekehrt schießt abgekühltes Material am Rand der aufsteigenden Konvektionszellen wieder in die Tiefe.

In *Abbildung 1* ist dargestellt, dass in der Reaktionskette vom Wasserstoff, bzw. dessen Atomkernen – den Protonen – bis zum Helium noch andere Teilchen freigesetzt werden: Die Neutrinos, dargestellt mit dem Symbol ν , entstehen überall dort, wo auch Elektronen (e^-) oder Positronen (e^+) involviert sind. Die Neutrinos sind sehr leichte, elektrisch neutrale Teilchen, die mit anderen Teilchen nur ganz selten reagieren. Entsprechend können sie – anders als die Photonen – praktisch ungehindert aus dem Sonneninnern entweichen. Dies macht sie für die Astrophysik interessant: Einerseits können sie auch – anders als die Photonen – direkt von den Vorgängen im Sonnenzentrum unverfälschte Informationen übermitteln, andererseits sind sie wegen ihrer schwachen Reaktionsfähigkeit mit Materie ausserordentlich schwierig nachzuweisen. Bereits in den fünfziger Jahren ist es jedoch gelungen, die energiereicheren unter ihnen – z.B. solche, die bei der Entstehung von Berylliumkernen (*siehe Abb. 1*) entstehen – dank ihrer grossen Menge auf der Erde nachzuweisen. Das Problem war aber, dass man deutlich kleinere Neutrinoflüsse als erwartet fand. Während fast drei Jahrzehnten haben sich die Astro- und Teilchenphysiker bemüht, eine Erklärung für das Neutrino Defizit zu finden. Das Problem löste sich allmählich in den neunziger Jahren: Erstens wurde festgestellt, dass auch die niederenergetischen Neutrinos, die im ersten Schritt im Proton-Proton-Zyklus bei der Fusion von Wasserstoff zu Deuterium freigesetzt werden und die im Reaktionspfad von Wasserstoff in keinem Fall vermieden werden können, auf der Erde nicht im vollen Umfang ankamen. Zweitens stellte sich heraus, dass Neutrinos eine wenn auch geringe, doch nicht verschwindende Masse hatten und sich deshalb von einer Teilchensorte in eine andere verwandeln konnten. Dieser Vorgang war auch schon bei anderen Elementarteilchen beobachtet worden. Die elektronischen Neutrinos werden in der Sonne nach dieser Vorstellung zwar im vollen Umfang produziert. Sie verändern aber auf dem Weg von der Sonne zur Erde ihren Charakter und werden in sogenannt müonische oder tauonische Neutrinos verwandelt. In dieser Gestalt waren sie für die bestehenden Neutrino-Detektionsanlagen unsichtbar. Erst später konnten sie in Kamiokande in Japan mit Hilfe eines Detektors, der keinen Unterschied zwischen den verschiedenen Neutrinoarten macht, eindeutig nachgewiesen werden. Schliesslich konnte mit einer neuen Methode – der Helioseismologie – gezeigt werden, dass die bestehenden Sonnenmodelle sehr präzise Voraussagen über die Bedingungen im Sonnenzentrum gemacht hatten. Nur am Rande sei erwähnt, dass im Sonnenzentrum neben dem Proton-Proton-Zyklus auch der Kohlenstoff-Stickstoff-Sauerstoff-Zyklus mit dem gleichen Endergebnis – Fusion von Wasserstoff zu Helium – läuft. Dieser Prozess läuft aber bei den in der Sonne herrschenden Verhältnissen viel langsamer und trägt wenig zur Leistungsbilanz der Sonne bei.

Sonneneruptionen

Der weitaus grösste Teil der nuklearen Energieumsetzung im Sonnenfeuer endet schliesslich wie bei einem gewöhnlichen Feuer in Licht- und Wärmestrahlung. Ein kleinerer Teil der Energie geht in die Neutrinoflüsse und ein sehr geringer Teil endet in der Beschleunigung und Heizung von Teilchen (vor allem Protonen und Heliumkernen) aus der Sonnenatmosphäre. Während von diesen die niederenergetischen Teilchen im sogenannten Sonnenwind kontinuierlich von der Sonne wegfließen, werden Teilchen mit höherer Energie – je nach Phase des Sonnenzyklus – mehr oder weniger häufig in Eruptionen weggeschleudert. Spektakuläre Ereignisse dieser Art, welche durch den Ausbruch starker Magnetfelder aus der Sonnenoberfläche verursacht werden, können mit optischen Instrumenten (Koronagraphen) beobachtet werden. Ein Beispiel einer solchen Eruption ist im linken Teil der *Abbildung 2* dargestellt: Dieser Ausbruch ereignete sich am 27. November 2013, während sich der Komet ISON (rechts unten in der linken Bildhälfte) der Sonne näherte.

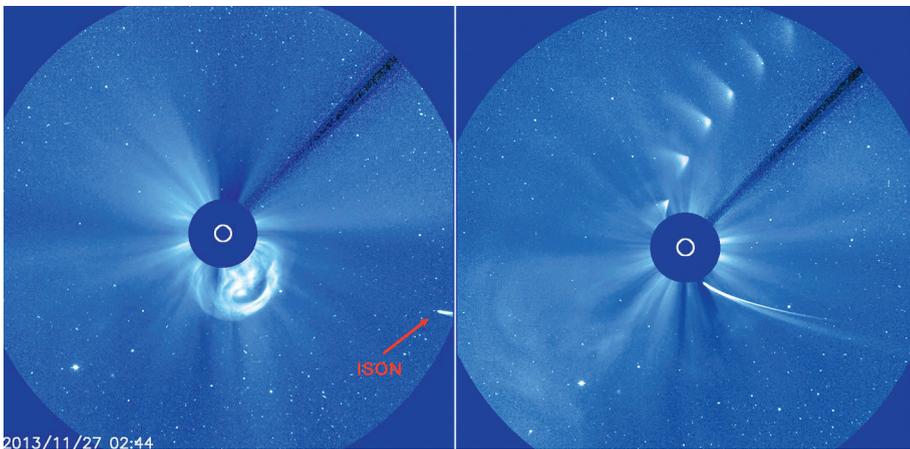


Abbildung 2: Sonneneruption vom 27. November 2013: Im linken Bildteil sieht man nebst der Sonneneruption auch den Kometen ISON auf dem Weg zur Sonne. Der Bildteil rechts ist eine Montage von einigen Bildern, welche in Zeitabständen von ca. einer Stunde von LASCO/C3 auf SOHO aufgenommen wurden. Der Komet hat die enge Begegnung mit der Sonne zwar überlebt, ist aber nach dem «Auskochen» in der enormen Hitzestrahlung deutlich schwächer geworden. (Die Sonne selbst ist in diesen Bildern durch eine Kreisscheibe abgedeckt, der weisse Kreis deutet die Grösse der Sonne an.)

Helioseismologie

Dieser junge Zweig der Astrophysik hat wesentlich dazu beigetragen, dass die Prinzipien des Sternaufbaus und der Sternentwicklung gefestigt werden konnten. Die physikalischen Grundlagen dazu sollen im Folgenden kurz erklärt werden:

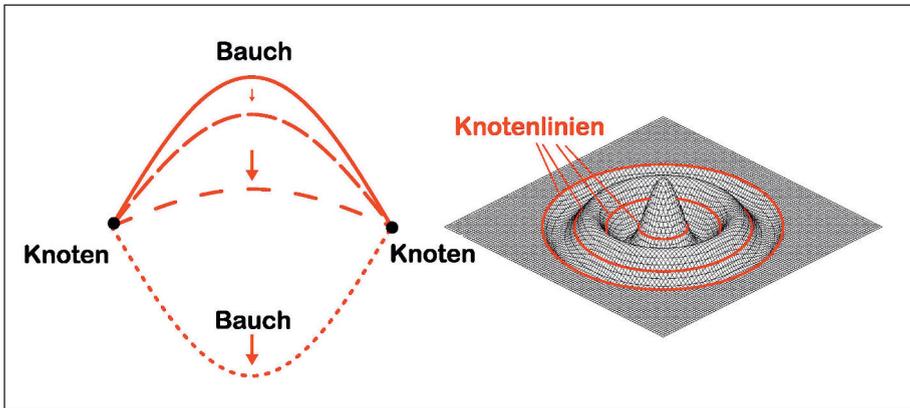


Abbildung 3: Eindimensionale Schwingung einer Saite und zweidimensionale Schwingung einer Membran.

Zupft man eine Saite, so beginnt diese zu schwingen, und es entsteht je nach Spannung (Kraft pro Querschnittfläche), Dichte und Länge der Saite ein Ton einer bestimmten Frequenz. Genauer gesagt entstehen je nach Art der Anregung ein Grundton und eine Reihe von Obertönen, die dem Ton eine charakteristische Klangfarbe geben. Eine mathematisch ideale, ungedämpfte Saite behält während der Schwingung ihre Form: An den «Knoten» verschwindet die Auslenkung, an den «Bäuchen» ist sie gross. Eine solche Schwingung kann auch als Überlagerung von zwei durch die Saite laufenden Wellen dargestellt werden, die an den Fixpunkten reflektiert werden. Die Wellenlänge entspricht genau der Saitenlänge und die Schwingungsperiode entspricht der Zeit mit der eine Schallwelle vom einen Ende der Saite zum andern Ende läuft. Eine Membran, beispielsweise das gespannte Fell einer Pauke, schwingt nach dem gleichen Prinzip; nur ist in diesem zweidimensionalen Beispiel ein Knoten nicht ein Punkt, sondern es bildet sich eine Knotenlinie, beispielsweise eine Kreislinie, wenn die Membran wie eine Wasseroberfläche schwingt, nachdem ein Stein ins Wasser geworfen wurde. Eine solche zweidimensionale Schwingung kann mit zwei charakteristischen Zahlen beschrieben werden: mit der Anzahl von kreisförmigen Knotenlinien (in Abb. 3 rot gezeichnet) und mit der Zahl radialer Knotenlinien, die durchs Zentrum der Membran verlaufen. (In der in Abb. 3 dargestellten Schwingung gibt es keine radialen Knotenlinien.)

Ein (näherungsweise) kugelförmiger Körper wie die Sonne kann dreidimensionale Schwingungen ausführen, welche mit drei charakteristischen Zahlen, der Anzahl von «Knotenflächen», beschrieben werden kann. Drei Beispiele von möglichen Kugelschwingungsmustern, wie sie auf der Sonnenoberfläche wahrgenommen werden könnten, sind in Abbildung 4 dargestellt. Die Stellen maximaler Auslenkung (nach aussen und nach innen) sind rot und blau dargestellt. Man kann sich einfach vorstellen, wie im Laufe einer Schwingung das Schwingungsmuster

zwar erhalten bleibt, aber die roten Flächen in blaue übergehen und umgekehrt, d.h. wo am Anfang eine Ausstülpung ist, ist nach einer halben Schwingungsperiode eine Eindellung etc. Derartige Schwingungsmuster können im Prinzip auch auf der Sonne beobachtet werden. Allerdings werden nicht die lokalen Erhöhungen und Vertiefungen beobachtet, sondern man misst mit Hilfe des Dopplereffektes die geordneten Bewegungen des Materials an der Sonnenoberfläche. Im Sonneninnern verhalten sich die Schwingungen vorwiegend wie Schallwellen, sie manifestieren sich dem Beobachter natürlich nur übers Licht.

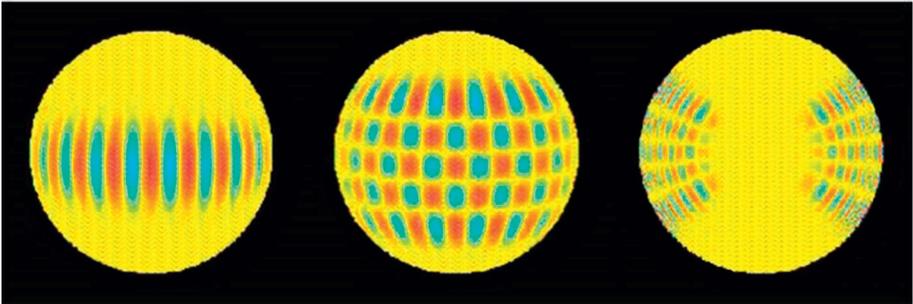


Abbildung 4: Schwingungsmuster auf einer Kugeloberfläche.

Das grosse wissenschaftliche Interesse an der Helioseismologie besteht darin, dass man ähnlich wie bei der herkömmlichen Seismologie, aus den Schwingungsmustern und der Frequenz der angeregten Schwingungen viel über die Materialbeschaffenheit und die physikalischen Prozesse im Sonneninnern lernen kann. So erhält man beispielsweise Aufschluss über die komplizierten Verhältnisse der Sonnenrotation in der Tiefe (die Sonne rotiert nicht wie ein starrer Körper !) Die differenzielle Rotation erzeugt ihrerseits das Magnetfeld der Sonne und ist damit die Ursache der wechselnden Sonnenaktivität. Die Ergebnisse stimmen, wie bereits erwähnt, auch gut mit den neueren Ergebnissen der Neutrinoobservations überein.

Neue Schwierigkeiten der Interpretation

Aus der bisherigen Schilderung des Standes der Sonnenforschung erhält man den Eindruck, das «Sonnenfeuer» sei im Wesentlichen verstanden, und es gäbe nichts Neues unter der Sonne. Dies ist aber nicht so: In letzter Zeit sind einige dieser als bisher gesichert geltenden Ergebnisse wieder in Frage gestellt worden. Insbesondere haben vertiefte Untersuchungen über die Zusammensetzung der Sonnenatmosphäre ergeben, dass diese wesentlich weniger schwere Elemente zu enthalten scheint als bisher angenommen. Dies hat einige Astrophysiker zu wilden

Spekulationen über den Aufbau des Sonneninnern und sogar über die Entstehung der Sonne verführt.

In der modernen Welt der Wissenschaft scheint es manchmal so, dass besonders aufregende Hypothesen besondere Beachtung finden und, wenn sie zusätzlich mit der nötigen PR-Wirkung vorgetragen werden, auch besondere Berücksichtigung bei der Zuteilung finanzieller Mittel geniessen. Beispielsweise wurde kürzlich behauptet, die Sonne sei eben kein gewöhnlicher Stern ihrer Spektralklasse, sondern sie unterscheide sich von vielen anderen Sternen des gleichen Typs durch die Besonderheit, dass sie von Planeten umgeben sei. Es zeigt sich damit mindestens, dass Sonnenforschung ein wirklich interdisziplinäres Thema geworden ist. Dies hat nicht nur Vorteile: Es wird für viele hochspezialisierte Forscherinnen und Forscher schwierig, den Überblick über die aktuellen Ergebnisse der verschiedenen Zweige zu behalten. Vergleicht man Artikel in heutigen Fachzeitschriften mit denjenigen aus früheren Jahrgängen, so fällt auf, dass – auch im Sinn der Pluralität der Meinungen – heute deutlich mehr unausgegorene Spekulationen veröffentlicht werden, die einer kritischen Betrachtung aus den verschiedenen Blickwinkeln des Forschungsgebietes kaum standhalten können.