

# Was die Sonne im Innersten zusammenhält...

H. Hauptmann und F. Herrmann, Abteilung für Didaktik der Physik, Universität, 76128 Karlsruhe

## 1. Einleitung

Die Entwicklung des Lebens auf der Erde war möglich, weil die Sonne über Jahrmilliarden gleichmäßig strahlte. Von der Physik her betrachtet ist dieses Verhalten aber sehr merkwürdig.

Der ganze Brennstoff, der die von der Sonne abgestrahlte Energie liefert, nämlich Wasserstoff, ist in der Sonne gespeichert.

Vergleicht man die Reaktion, die in der Sonne abläuft, mit einer irdischen Verbrennungsreaktion, so entspräche sie etwa der Verbrennung in einem Ofen, in den man den Brennstoff- und den Sauerstoffvorrat für den ganzen Winter auf einmal hineinsteckt – eine explosive Mischung.

Man könnte die Sonne auch mit einer Wasserstoffbombe vergleichen, denn in ihr läuft dieselbe Fusionsreaktion ab, wie in der Sonne. Nach der Zündung explodiert diese Bombe in sehr kurzer Zeit mit einem gewaltigen Energieumsatz.

Wer sorgt aber dafür, daß die Reaktion in der Sonne so stabil abläuft, daß die Sonne nicht explodiert?

Noch eine andere Merkwürdigkeit, die wir allerdings an der Sonne selbst nicht beobachten können, und die sich erst in einigen Milliarden Jahren äußern wird: Wenn der Brennstoff in der Sonne seinem Ende entgegengeht, wird die Sonne nicht kälter, wie man es doch wohl erwarten würde, sondern heißer. (Dadurch kann die Fusion des Heliums gezündet werden.)

Diese scheinbar paradoxen Verhaltensweisen sind gar nicht schwer zu verstehen.

Wir werden im Folgenden mit der Sonne einige Experimente ausführen – nur in Gedanken, versteht sich. Und dann werden wir sogar – allerdings wieder nur in Gedanken – ein kleines Labormodell der Sonne bauen.

## 2. Gedankenexperimente mit der Sonne

Was mit einem Stern wie der Sonne von selbst und in Jahrmilliarden passiert, wollen wir in Gedanken viel schneller ablaufen lassen, den Prozeß auch anhalten oder sogar rückwärts laufen lassen. Wir wollen uns dazu vorstellen, daß man die Kernreaktion der Sonne willkürlich ein- oder ausschalten kann, wie etwa einen Tauchsieder, Abb. 1. Auch die Abstrahlung der Sonne schalten wir in Gedanken aus und wieder ein: Wir stellen uns einen großen sphärischen Spiegel vor, den wir nach Belieben um die Sonne herumlegen und wieder wegnehmen können. Solange der Spiegel die Sonne umgibt, kann die Sonne nicht abstrahlen, denn alles Licht, das sie abstrahlt, bekommt sie wieder zurück.

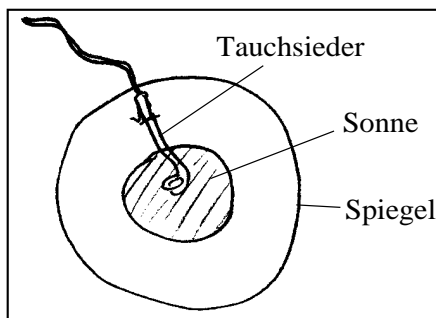


Abb. 1. Mit Hilfe des Tauchsieders kann man der Sonne Entropie und Energie zuführen. Durch Wegnehmen des Spiegels kann man sie dazu veranlassen, Entropie und Energie abzustrahlen.

Wir beginnen damit, einen einfachen Zustand zu betrachten: Der Spiegel ist an seinem Platz, der Tauchsieder ist ausgeschaltet. In der Sonne läuft kein Prozeß ab, alle physikalischen Größen haben bestimmte, zeitlich konstante Werte bzw., falls es sich um lokale Größen handelt, konstante Werteverteilungen. Insbesondere haben auch Entropie und Energie bestimmte Werte. Für diese beiden Größen interessieren wir uns im Folgenden besonders: Wir diskutieren, während wir Tauchsieder und Spiegel betätigen, die Entropie- und die Energiebilanz der Sonne. Mit dem Einschalten des Tauchsieders führen wir der Sonne Entropie und Energie zu. Durch Wegnehmen

des Spiegels ermöglichen wir dem abgestrahlten Licht, Entropie und Energie von der Sonne wegzutransportieren.

### 2.1 Die Entropiebilanz der Sonne

Wir schalten den Tauchsieder für kurze Zeit ein (der Spiegel bleibt an seinem Platz). Die Entropie der Sonne nimmt also zu. Der Entropieinhalt eines Körpers hängt bekanntlich mit seiner Temperatur und mit seinem Volumen zusammen: Je größer die Temperatur, und je größer das Volumen, desto mehr Entropie enthält er. Was beobachtet man nun beim Einschalten der Entropiequelle Tauchsieder? Man beobachtet erstens, wie erwartet, daß das Volumen der Sonne zunimmt, zweitens aber, daß die Temperatur abnimmt. Ein Widerspruch? Nein. Der Entropieinhalt hängt von *zwei* Größen ab: Temperatur und Volumen. Die Volumenzunahme bei Entropiezufuhr ist nun nicht nur so groß, daß es für eine Temperaturzunahme nicht mehr reicht, sie ist sogar so groß, daß die Temperatur abnehmen muß. Die  $1/r$ -Abhängigkeit des Gravitationspotentials ist der Grund dafür, daß eine Volumenvergrößerung um so leichter geht, je größer das Volumen schon ist.

Wir wollen nun den Prozeß rückgängig machen: Wir lassen die Sonne Entropie abgeben, indem wir den Spiegel für kurze Zeit wegnehmen. Man beobachtet selbstverständlich, daß sich Volumen und Temperatur in entgegengesetzter Weise ändern wie beim Heizen: Die Sonne wird kleiner und heißer. (Das Volumen nimmt ab, die Temperatur zu.) Diese Folge stabiler Zustände können wir dank Tauchsieder und Spiegel beliebig oft durchlaufen. In Tabelle 1 sind die Beobachtungen noch einmal qualitativ zusammengefaßt.

Entropie	wenig	viel
Energie	wenig	viel
Volumen	klein	groß
Temperatur	hoch	niedrig

Tabelle 1

### 2.2 Die Energiebilanz der Sonne

Wir betrachten nun für dieselben Prozesse die Energiebilanz. Durch Einschalten des Tauchsieders führen wir der Sonne Energie zu, durch Wegnehmen des Spiegels entziehen wir ihr Energie. Wie sind die Beobachtungen von Volumen und Temperatur mit den Energieänderungen zu verstehen? Beim Aufstellen der Energiebilanz muß man beachten, daß man es im Grunde mit zwei getrennten Systemen zu tun hat: zum einen mit der Sonnenmaterie und zum anderen mit dem Gravitationsfeld. Wenn man der Gesamtsonne (Materie + Feld) Energie zuführt, so muß man wissen, wieviel davon die Materie und wieviel das Feld bekommt. (Beim Bilanzieren der Entropie brauchten wir darauf nicht zu achten, denn das Gravitationsfeld hat keine Entropie und ändert sie daher auch nicht.)

Einschalten des Tauchsieders, d. h. Energiezufuhr verursacht eine Volumenzunahme. Das Volumen ist ein Indikator für die Feldenergie: je größer das Volumen, desto mehr Energie steckt im Feld. Beim Heizen ist also Energie ins Feld gegangen. Gleichzeitig hat aber die Temperatur abgenommen. Die Temperatur ist ein Indikator für die Energie der Materie. Beim Heizen hat also die Energie der Materie abgenommen. Offenbar hat das Feld mehr Energie bekommen als die Heizung geliefert hat. Beim Heizen ist neben der Energie aus dem Tauchsieder noch Energie aus der Sonnenmaterie ins Feld geflossen. Das ist vielleicht überraschend, widerspricht aber nicht dem Energieerhaltungssatz. Die Rechnung liefert für den Zusammenhang zwischen der Energieänderung  $dE_{\text{Feld}}$  des Feldes und der Energieänderung  $dE_{\text{Materie}}$  der Materie:

$$dE_{\text{Feld}} = -\frac{1}{2}dE_{\text{Materie}}$$

Wir haben gesehen, daß die Bilanzen qualitativ stimmen, die Änderungen der Variablen Entropie, Energie, Volumen und Temperatur sind miteinander im Einklang. Daß so viel Energie ins Gravitationsfeld geht, und daß die Temperatur trotz Entropiezufuhr abnimmt, liegt am  $1/r$ -Verlauf des Gravitationspotentials. Das Feld verhält sich wie eine Feder, die beim Spannen immer weicher wird.

Wir betrachten im folgenden zwei Systeme, die man im Prinzip im Labor aufbauen kann, und die dieselben Merkwürdigkeiten zeigen wie die Sonne.

### 3. Modelle

#### 3.1 Ein Wassermodell

Dieses sehr einfache Modell, Abb. 2, soll lediglich zeigen, daß es nicht unbedingt widersprüchlich ist, wenn ein Behälter dadurch leerer wird, daß man etwas in ihn hineinfüllt, so wie der Energieinhalt der Sonnenmaterie abnimmt wenn man ihr Energie zuführt. Dem Wasser entspricht die Energie, dem linken Behälter die Sonnenmaterie, dem rechten das Feld. Läßt man in den linken Behälter Wasser hineinfließen, so fließt ein Teil in den rechten ab. Der rechte Behälter senkt sich dadurch ab, sodaß noch mehr Wasser von links nach rechts fließt und der Wasserstand im linken Behälter abnimmt.

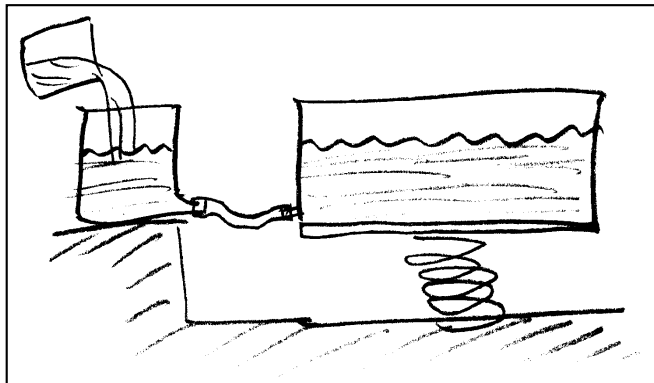


Abb. 2. Gießt man Wasser in den linken Behälter, so nimmt der Wasserstand in diesem Behälter ab.

#### 3.2 Das Gasmodell

Wie die Sonne, so besteht auch das Modell von Abb. 3 aus zwei Teilsystemen. Das Gas im Zylinder entspricht der Sonnenmaterie, die mechanische Vorrichtung dem Gravitationsfeld. Wir stellen uns der Einfachheit halber vor, außerhalb des Zylinder sei Vakuum, sodaß von rechts keine Luft gegen den Kolben drückt. Die Bahn, auf der der Wagen läuft, ist so beschaffen, daß die Kraft, die der Wagen auf den Kolben ausübt umso geringer wird, je weiter rechts der Kolben steht. (Der eigentliche Energiespeicher ist hier übrigens auch das Gravitationsfeld.) Bei geeigneter Wahl der Form der Bahn erreicht man, daß sich das Gas im Zylinder so verhält wie die Sonne: Es gibt eine Folge von stabilen Zuständen, für die Entropie, Energie, Volumen und Temperatur qualitativ so zusammenhängen wie bei der Sonne. (Die Bedingungen dafür, wie die Bahn verlaufen muß, lassen sich leicht berechnen unter Verwendung der Gasgleichung und der Adiabatangleichung).

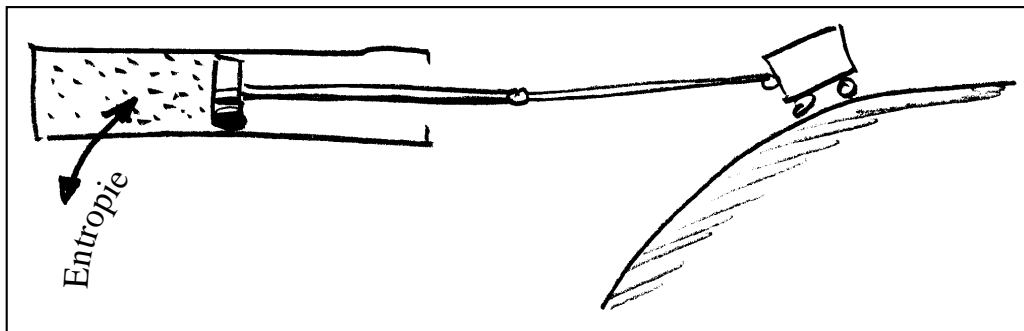


Abb. 3. Führt man dem Gas Entropie zu, so verschiebt sich der Kolben nach rechts und die Temperatur des Gases nimmt ab.

Um uns mit dem System vertraut zu machen, führen wir zunächst einige Gedankenexperimente aus, die wir mit der Sonne nicht machen konnten. Wir hängen die Mechanik aus und bewegen den Kolben mit der Hand.

In einem ersten Experiment blockieren wir den Kolben, d. h. wir halten das Volumen konstant, und heizen (wir führen Entropie und Energie zu). Man beobachtet eine Temperaturzunahme.

In einem zweiten Experiment (ausgehend von demselben Anfangszustand wie im ersten) heizen wir wieder, ziehen dabei aber den Kolben so heraus, daß die Temperatur des Gases konstant bleibt.

Diese beiden Experimente zeigen noch einmal, daß ein Gas um so mehr Entropie enthält, je höher seine Temperatur und je größer sein Volumen ist.

In einem dritten Experiment wollen wir den Kolben nun einfach "kommen lassen", und zwar ohne zu heizen. Bei diesem Prozeß nimmt die Temperatur ab. Temperaturabnahme und Volumenzunahme sind so miteinander verknüpft, daß die Entropie konstant bleibt.

In einem vierten Experiment schließlich wollen wir wieder heizen, d. h. Entropie zuführen, und dabei den Kolben so kommen lassen, daß die Temperatur des Gases trotz des Heizens abnimmt. Dazu muß sich der nur Kolben weiter nach rechts bewegen, als im zweiten Experiment.

Dieser Prozeß ist es, der auch von selbst abläuft, wenn wir unsere Mechanik einhängen und heizen. Und das ist unser eigentliches Sonnensimulationsexperiment: Wir hängen die Mechanik ein und heizen. (Wir führen dem Gas Entropie zu.) Der Kolben bewegt sich nach rechts (das Volumen nimmt zu) und das Gas wird kälter (die Temperatur nimmt ab). Entzieht man dem Gas Entropie, so nimmt sein Volumen wieder ab, und die Temperatur nimmt zu.

#### 4. Die Stabilität der Kernreaktion in der Sonne

Wir haben gesehen, wie es kommt, daß die Sonne, wenn ihre Entropie abnimmt, kleiner und heißer wird, aber noch nicht, warum die Kernreaktion so stabil brennt.

Die Reaktion



hat zwar einen hohen Reaktionsantrieb (das chemische Potential der Edukte ist sehr viel höher als das der Produkte), ihr Reaktionswiderstand ist aber so hoch, daß sie erst bei sehr hohen Temperaturen merklich in Gang kommt. "Hohe Temperatur" bedeutet in der Kernchemie eine etwa  $10^6$  mal höhere Temperatur als in der normalen Chemie.

Wir betrachten einen Stern, in dem noch keine Kernreaktion läuft, weil die Temperatur zu niedrig ist. Der Stern verliert Energie und Entropie durch Abstrahlung. Dieser Prozeß führt, wie wir inzwischen wissen, dazu, daß er kleiner und heißer wird. Mit zunehmender Temperatur kommt aber langsam die Kernreaktion in Gang und liefert Entropie nach.

Das ungewöhnliche Verhalten bei Entropiezufuhr sorgt nun dafür, daß die Reaktionsumsatzrate stabilisiert wird und die Temperaturzunahme zum Stillstand kommt. Auch die Werte aller anderen physikalischen Größen werden stationär: Es stellt sich ein Fließgleichgewicht ein. Jede Störung des Systems führt dazu, daß das System in den alten Fließgleichgewichtszustand zurückläuft. Sollte etwa die Reaktionsrate aus irgendeinem Grund einmal zu groß werden, so wird mehr Entropie produziert, der Stern dehnt sich aus, die Temperatur sinkt, und dadurch wird die Umsatzrate wieder kleiner.

Erst wenn der ganze Brennstoff verbraucht ist, funktioniert dieser Mechanismus nicht mehr. Eine Temperaturzunahme kann zu keiner Zunahme der Umsatzrate mehr führen. Die Abstrahlung geht daher weiter, die Entropie nimmt weiter ab und der Stern wird immer heißer, bis er schließlich Temperaturen erreicht, bei denen die nächste Brennphase (bei der Sonne das Heliumbrennen) einsetzen kann.