



# Warum die Sonne leuchtet

Von Kurt Bangert

Die Sonne ist seit Menschengedenken als Quelle des irdischen Lebens verehrt und sogar angebetet worden. Die Sonne setzt mit ihrem Tages- und Jahreszyklus den Rhythmus nicht nur für die Menschen, sondern für alle Kreaturen auf der Erde. Ihr Auf- und Untergang prägen unseren Tagesablauf, und die von ihr bestimmten Jahreszeiten den Ablauf von Saat und Ernte, Wachsen und Gedeihen. Die Sonne ist das Maß aller Dinge und die ewige Messlatte, nach der wir die Tage und Jahre unseres Lebens zählen. Nach ihr haben die Kulturen ihre Kalender entwickelt, die wiederum für den Ackerbau von entscheidender Bedeutung waren.

Die Sonne wurde in vielen Kulturen als Gottheit verehrt und spielte in vielen Mythologien eine Hauptrolle. Sommer- und Wintersonnenwende sowie Tagundnachtgleiche markierten die kulturellen Höhepunkte des Jahres und die Feste zahlreicher Völker. Und selbst wenn wir die Sonne hinter den Wolken nicht sehen, ist sie doch da, um Wärme und Licht zu spenden. Nur weil die Sonne scheint, konnten wir irdischen Lebewesen unseren Sehsinn entwickeln, der es uns erlaubt, die Welt um uns herum zu betrachten.

Noch im Mittelalter hatten die Menschen keine Idee davon, dass die Sonne eigentlich ein ganz normaler Stern wie viele andere am Himmelszelt ist. Sie ist nicht, wie die anderen Sterne, als bloßer Lichtpunkt zu sehen, sondern als Scheibe, die unaufhörlich und mit großer Intensität leuchtet.

Dank seiner relativen Nähe ist dieser Stern so gut erforscht wie kein anderer. Wir wissen heute über unser zentrales Gestirn wahrscheinlich mehr als ein Automechaniker über das Auto, das ihm der Kunde in die Werkstatt fährt. Die Vorgänge in der Sonne sind sehr gut verstanden, und die gemachten Beobachtungen fügen sich hervorragend in die theoretischen Modelle ein.

Eine der beeindruckendsten Eigenschaften der Sonne ist ihre schiere Größe. Sie hat einen Durchmesser, der zehnmal so groß ist wie der Durchmesser des größten Planeten in unserem Planetensystem, Jupiter. Und Jupiter wiederum hat den zehnfachen Durchmesser der Erde. Man müsste die Erde also mehr als 100mal wie Perlen auf die Kette aneinanderreihen, um so den Durchmesser der Sonne zu erreichen.

Beeindruckender als der Vergleich der Durchmesser ist jedoch der Massevergleich. Auch hier nehmen wir Jupiter als Brücke zu Hilfe. Obwohl Jupiter schon das 300fache der Erdmasse besitzt, umfasst die Sonne mehr als 1000 Jupiter-Massen. Die Sonne enthält somit die 330.000fache Masse der Erde. Oder anders veranschaulicht: Während die Masse der Erde nur ein Prozent der nicht-leuchtenden Masse unseres Planetensystems ausmacht, stellen alle Planeten und dunklen Körper unseres Planetensystems zusammen nur 0,1 Prozent (!) der Masse des ganzen Sonnensystems dar.



## *Schwerefeld und Entweichgeschwindigkeit*

Die Masseunterschiede zwischen Erde, Jupiter und Sonne bestimmen natürlich auch deren Schwerefeld. Da man die Schwerkraft jedoch meist als Oberflächengravitation berechnet, sind die Unterschiede hier nicht so gravierend, weil die massereicheren Körper entsprechend größere Durchmesser haben und die Schwerkraft nach Isaak Newtons Gravitationsgesetz mit dem Quadrat der Entfernung vom Zentrum abnimmt. Die Oberflächenschwerkraft der Sonne ist rund 10mal so stark wie die Schwerkraft des Planeten Jupiter an dessen Oberfläche, und 28mal so mächtig wie die Schwerkraft auf der Erde.

Eine Folge der Oberflächenschwerkraft sind auch die Unterschiede bei den Entweichgeschwindigkeiten der jeweiligen Gestirne. Mit der Entweichgeschwindigkeit bezeichnet man die Fluchtgeschwindigkeit, die nötig ist, damit eine Rakete, die von der Oberfläche eines Himmelskörpers aus ins All startet, sich dem Einfluss seiner Schwerkraft ein für allemal entziehen kann. Je größer die Schwerkraft, desto höher muss natürlich die Entweichgeschwindigkeit sein. Die Entweichgeschwindigkeit hängt wie die Oberflächenschwerkraft nicht nur von der Masse des Himmelskörpers ab, sondern auch von seiner Größe und Dichte, denn je weiter weg die Oberfläche vom Zentrum entfernt ist, desto geringer ist die Entweichgeschwindigkeit.

Die Entweichgeschwindigkeit ist für die Raumfahrt der NASA und der europäischen Raumfahrtbehörde ESA von großer Bedeutung, wenn sie etwa Raumsonden zum Mond, Mars oder Jupiter schicken wollen. In diesem Fall müssen die Raketen, die diese Sonden ins All bringen sollen, die Entweichgeschwindigkeit aufweisen. Um mit einer Rakete einen Satelliten in die Erdumlaufbahn zu schießen oder die Raumstation ISS zu erreichen, darf eine Rakete, die von Cape Canaveral in Florida oder von Kourou in Französisch-Guyana aus startet, getrost unterhalb der Entweichgeschwindigkeit der Erde bleiben, da man ja im Einflussbereich der Erde bleiben will. Will man aber eine Sonde zum Mond oder Mars schicken, so muss die Rakete bzw. Raumsonde auf die irdische Entweichgeschwindigkeit beschleunigt werden, da sie sich nur so dem Gravitationsfeld der Erde entziehen kann.

Die Entweichgeschwindigkeit ist für uns aber auch deshalb wichtig, weil sie uns später noch helfen wird, einige der merkwürdigsten Phänomene unseres Weltalls und damit wichtige Aspekte unseres heutigen Weltbildes besser zu verstehen. Warum, das werden wir später sehen.

Aber werden wir konkreter: Um der Erde zu entfliehen, muss eine auf der Erde gestartete Sonde immerhin über 40.000 km in der Stunde schnell sein (oder 11,2 km/s); um der Schwerkraft Jupiters zu entkommen, müsste ein von dort gestartetes Raumschiff schon auf eine Geschwindigkeit von 215.000 km pro Stunde (oder 60 km/s) beschleunigt werden; und die Entweichgeschwindigkeit der Sonne beträgt (bezogen auf die Sonnenoberfläche) mehr als 2 Millionen km pro Stunde (oder 617 km/s). Das ist das 55fache der irdischen Entweichgeschwindigkeit! Dass die solare Entweichgeschwindigkeit nicht noch viel höher ist, verdanken wir, wie schon angedeutet, der enormen Ausdehnung der Sonne, da die Schwerkraft ja mit der Entfernung vom Sonnenmittelpunkt rapide abnimmt – nämlich mit dem Faktor 4 bei jeder Verdoppelung der Entfernung. Auf der Höhe der Erdumlaufbahn beträgt die solare Entweichgeschwindigkeit immer noch stattliche 150.000 km pro Stunde (oder 42 km/s). Sie ist also in Erdnähe noch fast dreimal so hoch wie die Entweichgeschwindigkeit aus dem Erdschwerefeld. Beschleunigt man eine auf der Erde gestartete Raumsonde so stark, dass sie das Schwerefeld der Erde verlassen kann, bleibt sie trotzdem im Anziehungsbereich der Sonne. Sie wird dann zwar nicht mehr um die Erde



kreisen, wohl aber um die Sonne. Nur wenige Raumsonden haben, wie etwa Voyager 10 und 11, Geschwindigkeiten erreicht, mit denen sie dem Schwerefeld der Sonne entfliehen konnten.

### *Die chemische Zusammensetzung der Sonne*

Wir wissen heute erstaunlich viel über die Zusammensetzung der Sonne und anderer Sterne. Das verdanken wir vor allem der Spektralanalyse des Lichts.

Nachdem der englische Chemiker William Wollaston 1802 und der deutsche Optiker Joseph von Fraunhofer 1814 die heute so genannten Fraunhoferlinien im Lichtspektrum entdeckt hatten, konnten die Deutschen Kirchhoff und Bunsen nachweisen, dass diese Linien den in der jeweiligen Lichtquelle enthaltenen chemischen Elementen entsprachen. Kirchhoff und Bunsen fanden heraus, dass wenn sie mit dem Fernrohr ein Feuer in der Ferne beobachteten und dieses Licht durch ein Prisma schickten, sie anhand der im Lichtspektrum vorhandenen Spektrallinien das Element ausmachen konnten, welches da im Feuer brannte. Wenn sie in gleicher Weise das Sonnenlicht durch das Prisma schickten, so entdeckten sie, dass in der Sonne Elemente enthalten waren, von denen man viele schon auf der Erde kannte. Diese Erkenntnis war damals ebenso sensationell wie es später die Einsteinsche Relativitätstheorie sein sollte. Die Entdeckung bedeutete nicht weniger, als dass man das Licht der Sonne oder jedes anderen Sterns nur mit Hilfe eines Prismas in sein Farbspektrum zerlegen musste, um an Hand der Spektrallinien zuverlässige Rückschlüsse auf die chemische Zusammensetzung des jeweiligen Gestirns ziehen zu können.

Auf diese Weise wissen wir heute mit großer Sicherheit, wie sich die Sonne chemisch zusammensetzt. Sie besteht zu 73,5 Prozent aus Wasserstoff, zu 25 Prozent aus Helium und zu 1,5 Prozent aus schweren Elementen einschließlich Eisen. Das Helium (von griech. *helios* für Sonne) hat man übrigens erst durch die Spektralanalyse der Sonne entdeckt. Vorher kannte man dieses Element überhaupt nicht.

Wasserstoff und Helium sind beides Gase, so dass die Sonne vor allem als Gasball zu betrachten ist. Auch wenn diese Gase aufgrund der enormen Masse und Schwerkraft dicht zusammengedrückt werden, bleibt die Sonne doch ein gasförmiger Körper, was erklärt, dass die mittlere Dichte der Sonne mit 1,4 Gramm pro cm weit unter der mittleren Dichte der Erde liegt. Man darf natürlich erwarten, dass gerade bei einem so massereichen Gaskörper wie der Sonne die Dichte im Innern weitaus höher ist als an der Peripherie, da jedes Gas die Tendenz hat, sich nach außen hin zu verflüchtigen. Und in der Tat hat man im Zentrum der Sonne eine Dichte von 150 Gramm pro cm errechnet, was mehr als das Zehnfache der Dichte im Innern der Erde ausmacht, obwohl der Erdkern ja immerhin aus Schwermetallen besteht. Es ist die solare Schwerkraft, die diese Dichte ermöglicht.

### *Die physikalischen Grundkräfte*

An dieser Stelle müssen wir einmal auf die vier grundlegenden Kräfte hinweisen, die allen physikalischen Phänomenen zugrunde liegen. Nichts geschieht in unserem physischen Universum, ohne dass diese vier Grundkräfte irgendwie beteiligt wären. Es sind dies die starke Kernkraft, die schwache Kernkraft, die elektromagnetische Kraft und die Schwerkraft. Mehr physikalische Kräfte kennen wir eigentlich nicht, und vieles, was sich im physischen Universum abspielt, lässt sich mit Hilfe dieser Kräfte erklären.





Obwohl die Schwerkraft oder Gravitation die mit großem Abstand schwächste dieser vier Wechselwirkungen ist, zeigt sich, dass sie am Ende doch in der Lage ist, alle anderen Kräfte zu überwinden und Weltmeister aller Klassen zu werden. Wir wollen uns nun anschauen, wie diese Kräfte innerhalb der Sonne wirken.

### *Die Vorgänge im Innern der Sonne*

Das große Rätsel, das die Physiker der letzten Jahrhunderte umtrieb, war die Frage, warum die Sonne überhaupt leuchtet oder brennt, was diesen Brennprozess antreibt, und wie lange er sich schon abspielt.

Lange Zeit ging man davon aus, dass die Sonne nichts anderes als ein glühender, brennender Körper sei. Allerdings hätte der dafür notwendige Brennstoff selbst bei der enormen Größe der Sonne nur für einige tausend Jahre ausgereicht – vielleicht gerade genug, um eingefleischte Biblizisten zufrieden zu stellen, für die die Welt erst seit wenigen tausend Jahren existierte. Doch das stimmte ganz und gar nicht mit den Befunden von längeren Zeiträumen überein, mit denen sich die Geologen hier auf der Erde konfrontiert sahen.

Sir William Thomson, besser bekannt als Lord Kelvin (1824-1907), stellte die keinesfalls abwegige Vermutung an, dass die Schwerkraft die ungeheure Sonnenmasse auf einen engen Raum zusammengepresst habe und aufgrund der so entstandenen Bewegungsenergie (=kinetische Energie) jene Hitze erzeugt habe, die seither als Licht abgestrahlt würde. Auf diese Weise, so errechnete Kelvin, würde die Sonne bis zu hundert Millionen Jahre lang ihre Energie abgeben können. Damit kam er den Geologen weit entgegen, deren Datierungen jedoch in die Milliarden gingen.

Kelvins Berechnungen hatten zudem einen Haken, den der deutsche Physiker Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894) offenlegte. Er errechnete nämlich, dass die Sonne, wenn sie denn ihre Hitze allein von der kinetischen Energie bezöge, sich innerhalb von 25 Millionen Jahren von einer Größe von ursprünglich 300 Millionen Kilometer Durchmesser auf ihre heutige Größe hätte zusammenziehen müssen. Dies würde jedoch bedeuten, dass die Sonne einmal so groß hätte gewesen sein müssen wie die Erdumlaufbahn – mit der Folge, dass die Erde nicht älter als 25 Millionen Jahre sein durfte. Da passte also nicht viel zusammen!

Die Lösung des Problems bahnte sich dann Anfang des 20. Jahrhunderts an, als man mehr und mehr über den inneren Aufbau der Atome lernte. Bis zum heutigen Tag besteht eine enge Korrelation zwischen unserem Wissen über Atome und Atomkerne einerseits und unserem Verständnis von Gestirnen und astronomischen Vorgängen andererseits. Die Gesetzmäßigkeiten, welche die Welt der kleinsten Teilchen beeinflussen, bestimmen auch die Vorgänge von Planeten, Sonnen und Galaxien.

Eine der bedeutenden Entdeckungen hinsichtlich der Atome war die Erkenntnis, dass sie vorwiegend aus leerem Raum bestehen und dass der weitaus größte Teil ihrer Masse im Atomkern steckt. Zwischen Atomkern und den im Außenbezirk rotierenden Elektronen wirken zwar Kräfte, aber der Raum selbst ist absolut leer. Uns erscheint es oft nur so, als hätten wir es bei den Atomen mit fester Materie zu tun. Könnten wir ein Atom auf die Größe des Kölner Doms aufblähen, so hätte der Kern die Größe einer Fliege. Man bräuchte eine Billiarde Fliegen, um das ganze Atom auszufüllen. Man hat die Größenordnung des Atoms auch mit der Sonne und der Erdumlaufbahn verglichen: Die Hauptmasse steckt im Kern, das Elektron ist ganz weit draußen, und dazwischen ist nichts als leerer Raum.



Bei ausreichendem Druck auf die Elektronenschalen haben die winzigen Elektronen also zum Kern hin noch genügend Platz, um auszuweichen. Es muss somit nicht wundern, wenn im Erdinnern die Atome vom Gewicht der Erdmasse so zusammengepresst werden, dass die Elektronen der Hülle um 15 Prozent näher an den Atomkern heranrücken. Weiter trauen sie sich nicht heran, weil sie – die doch negativ geladen sind – von den positiv geladenen Protonen des Atomkerns abgestoßen werden. Die Elektronen im Erdinnern stecken also, wie die Angelsachsen sagen würden, „between a stone and a hard place“: Sie müssen von zwei Seiten enormem Druck standhalten. Sie stöhnen und ächzen, aber sie halten aus, wie der mythische Atlas, der unter der Last der Erde zwar schwer gebeugt ist, aber nicht unter ihr zusammenbricht. Im Innern des Jupiter werden die Elektronen übrigens durch den ungleich höheren Druck noch weiter an den Kern gepresst, jammern und klagen hier noch mehr, ohne dass irgendjemand sie hören würde, aber auch hier harren sie gerade noch aus und halten das Gleichgewicht zwischen Druck und Gegendruck.

Anders im Innern der Sonne. Dort sind die Elektronen nicht mehr in der Lage, dem ungeheuren Druck der Schwerkraft und der übermächtigen Last der Sonnenmasse standzuhalten. Sie kapitulieren. Die Elektronenschalen werden „geknackt“, so dass die Elektronen nicht mehr brav auf ihren Atomhüllen verharren, sondern heimatlos werden und als ungebundene Teilchen umherirren. Man spricht von „entarteter Materie“, die von hoher Dichte geprägt ist, sich aber dennoch gasförmig verhält. Dieses dichte Gas besteht nur noch aus den Atomkernen und freien Elektronen; das Gas ist, wie die Physiker sagen, „ionisiert“, weil den Elektronenschalen die Elektronen abhanden gekommen sind. Man hat errechnet, dass durch den Druck der eigenen Schwerkraft das Innere der Sonne von einer enormen Dichte ( $100\text{g/cm}^3$ ) geprägt ist und dass die solare Zentraltemperatur eine unvorstellbare Hitze von 15 Millionen Grad entwickeln muss, damit der Sonnenkern dem Druck der darüber liegenden Schichten widerstehen und damit die Sonne im Gleichgewicht halten kann. Dabei bleiben jedoch die Atomkerne nach wie vor intakt, da sich die Kraft der Kerne als sehr viel stärker denn die Schwerkraft erweist. Während die Elektronen heimatlos und obdachlos umherirren, halten die Atomkerne ihr Haus noch in Ordnung, jedenfalls im Großen und Ganzen.

„Im Großen und Ganzen“ deshalb, weil aufgrund der enormen Hitze und dem nahen Beieinander der Wasserstoffkerne es doch hin und wieder zu dem sonderbaren und relativ seltenen Vorgang kommt, bei dem sich vier Wasserstoffkerne in einen Heliumkern verwandeln. Der Kern eines Wasserstoffatoms enthält lediglich ein Proton, womit der Wasserstoff das schlichteste von allen Elementen ist. Ein Heliumatom benötigt jedoch im Kern zwei Protonen, die positiv geladen sind, und zwei Neutronen, die eine neutrale Ladung aufweisen. Vier Wasserstoff-Protonen verbinden sich bei diesem „Wasserstoffbrennen“ zu einem Heliumkern. Eigentlich ist die Temperatur im Innern der Sonne etwas zu niedrig, um diesen Fusionsprozess in Gang zu setzen, aber aufgrund der Quantenmechanik kommt es trotzdem dazu.

Obwohl diese Umwandlung „relativ“ selten passiert, werden doch aufgrund der ungeheuren Masse an Wasserstoffatomen pro Sekunde rund 700 Millionen Tonnen Wasserstoff zu 695 Millionen Tonnen Helium fusioniert, wobei zwischen 4 und 5 Millionen Tonnen Energie freigesetzt werden, die vor allem in Form von Photonen, also Licht, aber auch als Neutrinos abgestrahlt werden. Während die massearmen (oder masselosen) Neutrinos in der Lage sind, die Sonne nahezu ungehindert zu durchschießen, stoßen die Photonen immer wieder mit den dicht gedrängten Atomkernen zusammen, so dass sie häufig ihre Richtung ändern müssen und darum etwa 10 Millionen Jahre benötigen, um die



Sonne endlich verlassen zu können. Das Licht, das die Sonnenoberfläche verlässt und das wir dann nur acht Minuten später zu sehen bekommen, entstand also bereits rund 10 Millionen Jahre zuvor im Kern der Sonne. Aber Vorsicht: Könnten wir im Kern nachschauen, käme uns das Sonneninnere trotzdem stockfinster vor, weil die dort erzeugte Strahlung noch außerhalb der Wellenlänge des sichtbaren Lichts liegt. Das Licht hingegen, das die Sonnenoberfläche, die Photosphäre, verlässt, entspricht vor allem jenen Wellenlängen, welche die meisten Tiere und Menschen zu sehen in der Lage sind.

Das Alter der Sonne, ihre Entstehung und Entwicklung sowie ihr Ausbrennen lassen sich heute anhand der Gesetze der Physik und der Kenntnis kernphysikalischer Prozesse aus Laborexperimenten (z.B. der Kernforschungszentren CERN in Genf oder DESY in Hamburg) im Computer recht genau modellieren, so dass die Physiker heute von einem Alter der Sonne von 4,6 Milliarden Jahren ausgehen. Damit stimmt das errechnete Alter der Sonne mit dem errechneten Alter der Erde und der Meteoriten überein. Das alte Problem der Altersbestimmung von Erde und Sonne ist somit als gelöst zu betrachten.