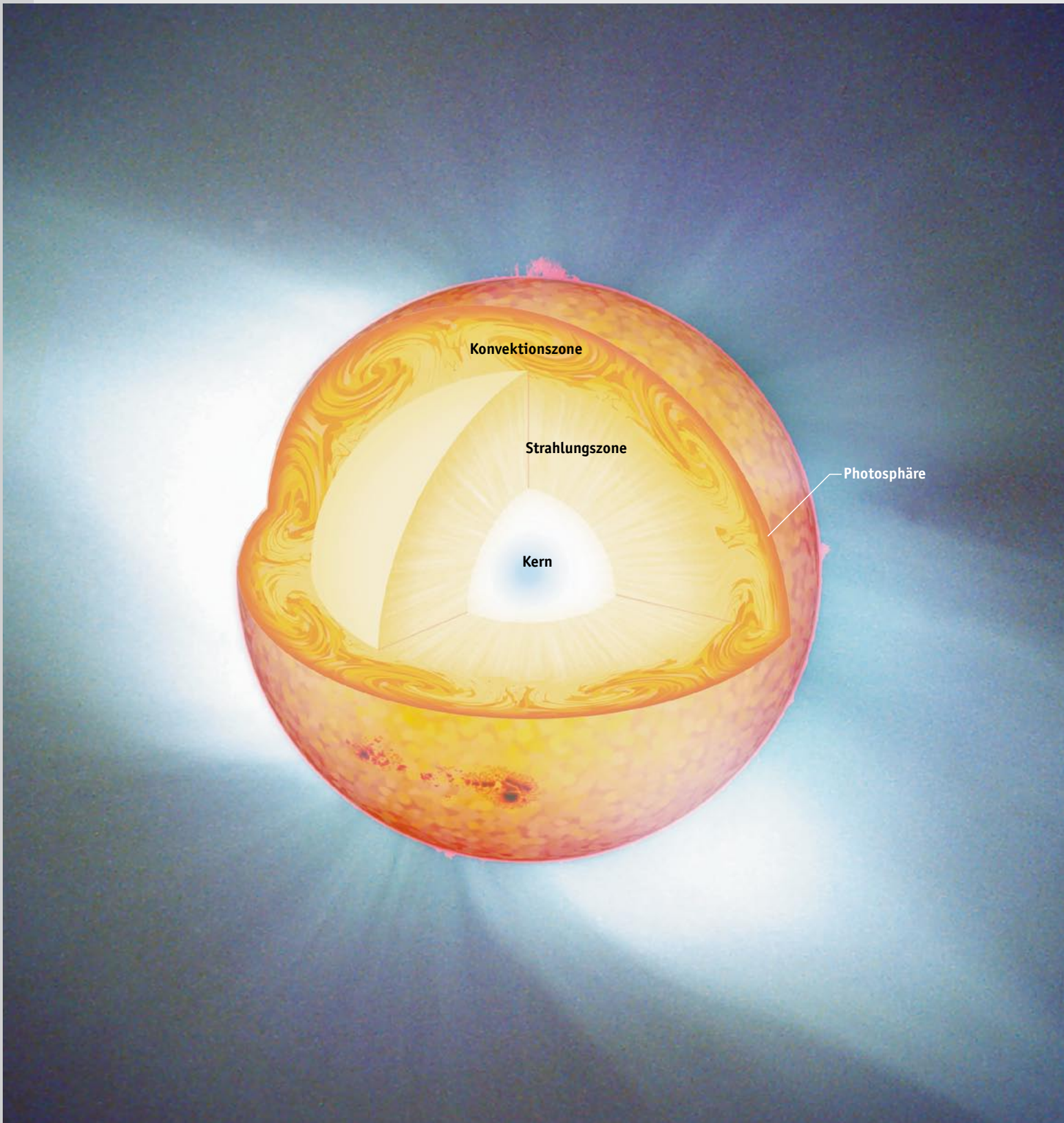
wis
wissenschaft in die schulen!
Didaktisches Material zu diesem Beitrag:
www.wissenschaft-schulen.de

Ein Blick ins Innere der Sterne

Vor hundert Jahren gelang eine berühmte Entdeckung

VON OLIVER SCHWARZ



Ohne die Überlegungen des Astronomen Karl Schwarzschild würden wir heute weder den inneren Aufbau noch die Entwicklung der Sterne verstehen. Diese Tatsache erscheint auf den ersten Blick etwas verwunderlich – wollte Schwarzschild doch eigentlich nur die etwa 300 Kilometer mächtige Photosphäre, die bei weitem dünnste Schicht unserer Sonne, analysieren.

In dem 1907 erschienenen Buch »Gaskugeln«, einem der ersten und zugleich bedeutendsten Lehrwerke zum inneren Aufbau der Sterne, lesen wir folgende Mitteilung: »In einer kürzlich erschienenen Arbeit hat K. Schwarzschild einen Gleichgewichtszustand einer Atmosphäre untersucht, den er Strahlungsgleichgewicht nennt, und die der Photosphäre auflagernden Schichten der Sonne nach diesem Gesichtspunkt behandelt.«

Robert Emden, der Autor des Buchs, war mit dem damaligen Göttinger Sternwartendirektor Karl Schwarzschild befreundet und bald darauf auch verwandt, denn er heiratete im Jahre 1908 dessen Schwester Klara. Emden war die Bedeutung der Entdeckungen, die seinem Freund Schwarzschild ein Jahr zuvor gelungen war, nicht entgangen.

Mit der Anfang 1906 publizierten Arbeit »Über das Gleichgewicht der Sonnenatmosphäre« gelang Karl Schwarzschild ein schlüssiger Beweis für die seit langem gehegte Vermutung, dass eine physikalische Beschreibung der Sonne unbedingt auch die Analyse von Strahlungsprozessen einschließen muss. Das Hauptaugenmerk des Astronomen galt der Sonnenphotosphäre. Trotz ihrer geringen vertikalen Ausdehnung, von nur 0.04 Prozent des Sonnenradius, spielt die Photosphäre für die Sonne eine wichtige Rolle: Praktisch die gesamte elektromagnetische Strahlung, die von unserem Zentralgestirn ausgeht, stammt aus dieser Schicht. Die Sonne gibt die tief in ihrem Inneren durch Kernfusion anfallende Energie über die Photosphäre an den umgebenden Weltraum ab.

Über viele Jahrtausende hinweg war die Sonne ein stets beliebtes, aber auch heftig umstrittenes Objekt wissenschaftlicher Spekulationen. Wirklich ändern sollte sich diese Situation erst, als mit der im 19. Jahrhundert aufkommenden Astrophysik die ersten Beobachtungsverfahren entwickelt wurden, durch die man die Zusammensetzung der von der Sonne emittierten Strahlung und die Oberflächentemperatur der Sonne ermitteln konnte. Dagegen blieb das Innere der Sonne, in dem sich das Geheimnis der solaren Energiequelle verbirgt, direkten Beobachtungen verschlossen und war nur theoretischen Analysen zugänglich.

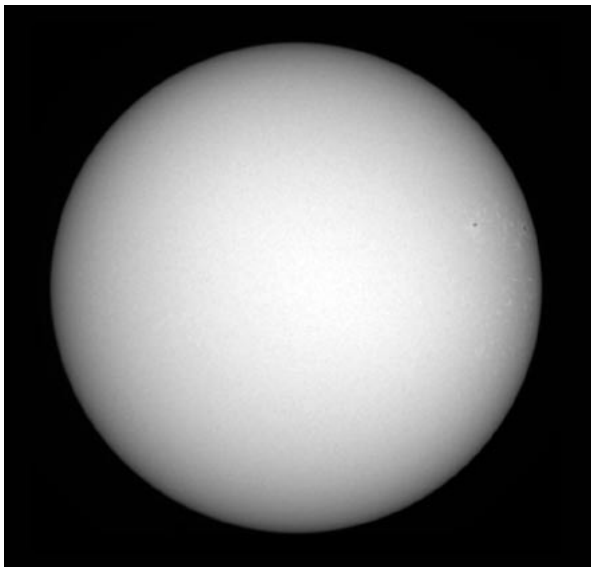


Abb. 2: Die Mitte-Rand-Verdunklung der Sonne lässt sich bereits mit kleinsten Teleskopen beobachten.

Funktioniert die Sonne wie die Erdatmosphäre?

Um beispielsweise festzustellen, in welchem Maße die Temperatur selbst in den obersten Sonnenschichten mit zunehmender Tiefe ansteigt, benötigt man eine annähernd richtige Vorstellung von den physikalischen Vorgängen, die sich dort abspielen. Doch woher sollte diese Vorstellung kommen? Die nahe liegende Idee bestand zunächst darin, die Photosphäre der Sonne für eine Art Gashülle zu halten, eine Atmosphäre, die unser Zentralgestirn ähnlich wie die Erdatmosphäre umgibt. Durch Messungen von Ballonfahrern standen den Forschern für die irdische Gashülle recht gute Daten zur Verfügung, aus denen man entnehmen konnte, wie sich Temperatur, Dichte und Druck mit wachsender Höhe ändern.

Ein Teil der damaligen Atmosphärenforschung ist heute längst Schulstoff. So lernt man zum Beispiel im Geographieunterricht, dass die Temperatur in der unteren Erdatmosphäre beim Durchschreiten von hundert Höhenmetern um etwa ein Grad Celsius abnimmt – auf hohen Bergen ist es üblicherweise recht kühl. Der berühmte Lord Kelvin konnte sogar begründen, warum es zu dieser Temperaturabnahme kommt. Er hatte dabei zu Recht die Konvektionsbewegung als »Täter« in Verdacht: Über dem erhitzten Erdboden steigen warme Gasmassen auf, kühlen sich dabei ab und sinken irgendwann nach unten zurück. Insgesamt wird dadurch die oberflächennahe Erdatmosphäre gut durchmischt. Ist sie dann ordentlich »verrührt«, so weist sie auch ziemlich genau die oben erwähnte Temperaturabnahme auf.

Diesen Schichtungszustand der Atmosphäre nennt man *Konvektionsgleichgewicht* oder *adiabatisches Gleichgewicht*. Mangels Alternativen, aber auch aufgrund handfester Überlegungen, nahmen die Physiker an, dass auch auf der Sonne die Konvektion eine bedeutende Rolle spielen muss. Damit kam die große Stunde der Meteorologen und Atmosphärenforscher, die ihre Kenntnisse auf die Sonne übertrugen und damit der

Abb. 1: Die in der Zentralregion der Sonne durch Kernfusion erzeugte Energie wird im Inneren durch Strahlung und weiter außen durch Konvektion transportiert. Diese Erkenntnis ist keineswegs selbstverständlich, da nur die dünne, leuchtende Außenschicht (Photosphäre) der Beobachtung zugänglich ist.

»Sterne und Weltraum« im Physik-Unterricht

Wie man aus diesem Beitrag lernt, gehören Konvektionsvorgänge zum irdischen Alltag. Als Ergänzung hierzu zeigen wir Ihnen unter der Adresse **www.wissenschaft-schulen.de** im Internet, wie man in Modellversuchen mit Salzwasserschichtungen die Konvektion in Flüssigkeiten ausschalten und sich dabei das Prinzip, das dem Schwarzschildkriterium zu Grunde liegt, veranschaulichen kann. Die Folgen einer unterdrückten Konvektion sind dabei in Salzwasserschichtungen ähnlich wie im Inneren der Sonne: Die Energie aus den tiefer gelegenen Schichten wird nicht mehr so schnell abtransportiert.

Unser Projekt »Wissenschaft in die Schulen!« führen wir in Zusammenarbeit mit der Landesakademie für Lehrerfortbildung in Donaueschingen durch. Es wird von der Klaus Tschira Stiftung gGmbH großzügig gefördert.

Astrophysik etwas auf die Sprünge halfen. Auch Robert Emden war Professor für Meteorologie in München und pflegte ein herrliches Hobby: Er war begeisterter Ballonfahrer...

Wärmestrahlung und Mitte-Rand-Verdunklung

Bei Sonnenbeobachtungen oder auf Sonnenphotos erkennt man eine Helligkeitsabnahme zum Sonnenrand hin, die so genannte Mitte-Rand-Verdunklung (Abb. 2). Dieses Phänomen war natürlich schon vielen Sonnenbeobachtern aufgefallen, erst Schwarzschild kam aber auf die Idee, den Helligkeitsverlauf der Mitte-Rand-Verdunklung aus einem Strahlungsmodell der Photosphäre vorherzusagen und mit Beobachtungen zu vergleichen. Zunächst hatte auch er ein konvektives Modell erwogen, doch die daraus abgeleitete Helligkeitsabnahme passte so gar nicht zu der gemessenen. So wandte er sich einem weiteren Modell zu und entdeckte, dass eine Gasschichtung, in der ein spezieller Strahlungszustand der Sonnenmaterie die entscheidende Rolle spielt, die Helligkeitsabnahme sehr gut zu erklären vermag. Schwarzschild gab diesem Strahlungszustand die Bezeichnung *Strahlungsgleichgewicht*.

Was ist eigentlich unter diesem Begriff zu verstehen? Jeder erhitzte Körper sendet eine als Wärmestrahlung bezeichnete elektromagnetische Strahlung aus. Die Intensität dieser Strahlung und deren spektrale Verteilung hängen von der Temperatur des Körpers ab. Halten wir unsere Hand seitlich *neben* einen Ofen oder Heizkörper, dann können wir über die Hitzerezeptoren unserer Haut einen gewissen Infrarotanteil der Wärmestrahlung wahrnehmen. Halten wir die Hand *über* den Ofen, dann nehmen wir die Strahlungs- *und* die Konvektionswärme wahr. Ein weiterer Bestandteil der Wärmestrahlung kann aber auch sichtbares Licht sein, wie man an heiß glühenden Gegenständen erkennen kann.

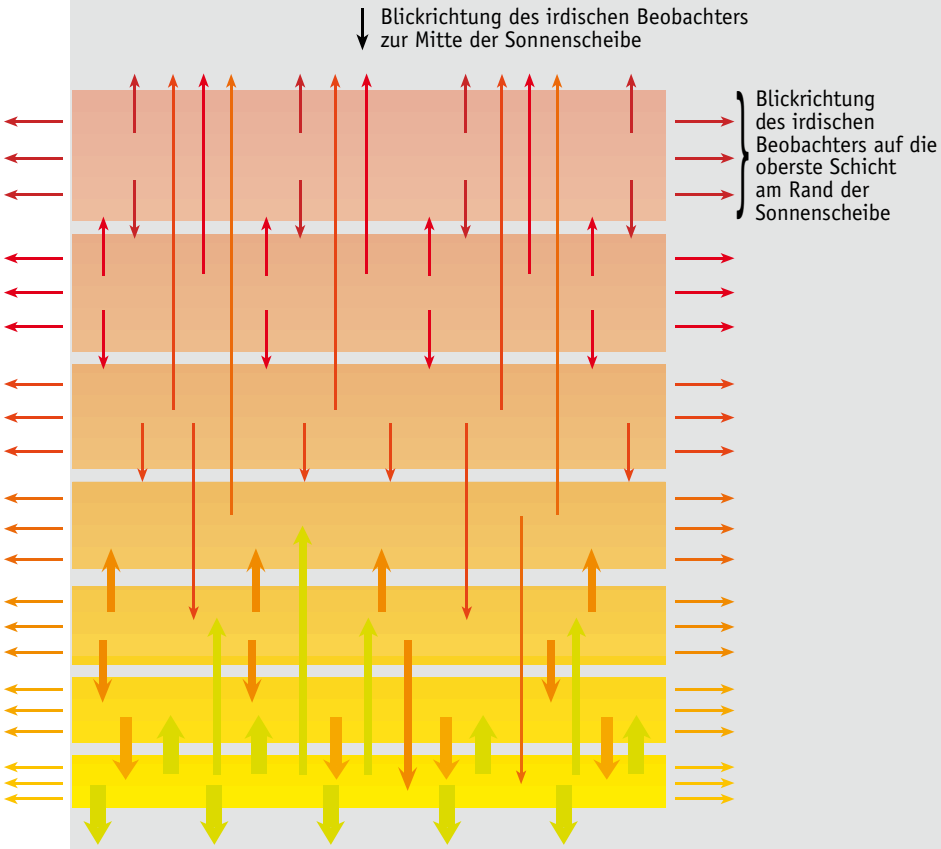
Stellen wir uns zwei identische, aber unterschiedlich stark erwärmte Metallscheiben vor, die einander unmittelbar gegenüber stehen. Die heißere Scheibe wird der kühleren natürlich mehr Strahlung zusenden, wodurch sich die kühlere Scheibe allmählich erwärmt. Die kühlere sendet der wärmeren hingegen anfangs relativ wenig Strahlung zu, sodass die heiße Scheibe mehr Energie abstrahlt als sie aufnimmt. Die heiße Scheibe wird kühler, die kühle erwärmt sich. Irgendwann besitzen beide die gleiche Temperatur und senden sich gegenseitig pro Zeiteinheit genau die gleiche Energiemenge zu. Ist dieser Zustand erreicht, so herrscht zwischen den Körpern ein Strahlungsgleichgewicht.

Soll dieses Modell auf die Photosphäre der Sonne übertragen werden, so sind einige Änderungen nötig (siehe auch den Kasten »Strahlungstransport und Randverdunklung«):

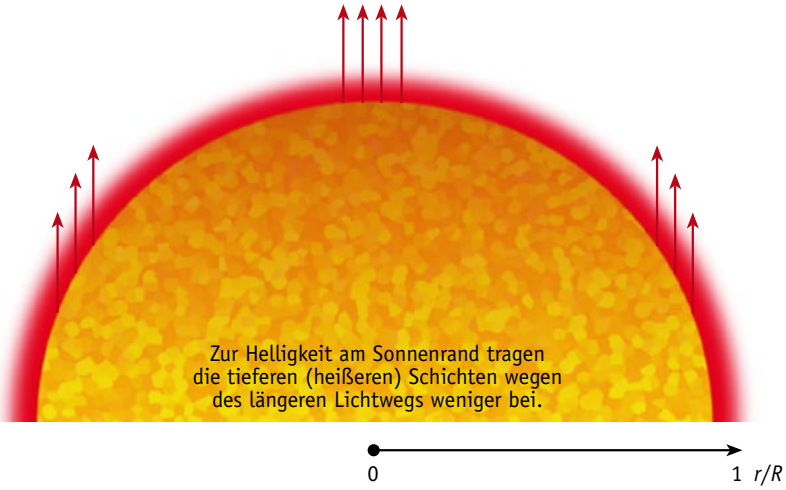
Erstens ist die gasförmige Materie für Strahlung teilweise durchlässig. Deshalb kann die Strahlung nicht schon zwischen zwei unmittelbar benachbarten Schichten vollständig aufgenommen und wieder emittiert werden. *Zweitens*

Strahlungstransport und Randverdunklung

Die einzelnen photosphärischen Schichten emittieren in alle Richtungen und befinden sich im Strahlungsgleichgewicht. Je näher eine Gasschicht der Oberfläche des Sterns ist, desto weniger wird die von ihr emittierte Strahlung auf dem Weg in den Weltraum geschwächt. Die von den unteren Schichten emittierte Strahlung (grüne Pfeile) wird zum größten Teil von den darüber liegenden Schichten aufgenommen und von dort teilweise an sie zurück gesendet. Die von weiter oben gelegenen Schichten emittierte Strahlung wird zu einem geringeren Teil innerhalb der Sonne absorbiert, ein größerer Teil verliert sich im Weltraum. Sie erhalten daher nicht so viel Strahlung wie die tiefer gelegenen zurück. Deshalb muss die Temperatur der oberen Schichten geringer sein als die der tieferen. Blickt man senkrecht auf die Sonnenoberfläche, dann sieht man ein Gemisch aus Strahlungsanteilen, welche die tiefen, heißen Schichten, und die oberen, kühleren Schichten emittieren. Blickt man hingegen in Richtung zum Sonnenrand, dann sieht man nur die aus den oberen, kühlen Schichten kommenden Strahlungsanteile. Deshalb erscheint einem Beobachter die Sonnenscheibe zum Rand hin dunkler als in der Mitte.



Die Skizze zeigt ein einfaches Modell des Strahlungstransports an der Sternoberfläche. Den Energietransport durch Strahlung symbolisieren die eingezeichneten Pfeile. Alle Schichten strahlen nicht nur nach oben und unten, sondern auch seitlich. Heißere Schichten sind gelb, kühlere orange beziehungsweise rot gefärbt. Den intensiven Energietransport zwischen benachbarten heißen Schichten symbolisieren zahlreiche kurze, grüne Pfeile. Den schwächeren direkten Strahlungstransport von den tiefen, heißen Schichten zu den höher gelegenen roten Schichten symbolisieren die wenigen langen Pfeile.



$\frac{r}{R}$	Messung.	Strahlungs-gleichgew.	Adiabat. Gleichgew.
0.0	1.00	1.00	1.00
0.2	0.99	0.99	0.98
0.4	0.97	0.95	0.92
0.6	0.92	0.87	0.80
0.7	0.87	0.81	0.71
0.8	0.81	0.73	0.60
0.9	0.70	0.63	0.44
0.96	0.59	0.52	0.28
0.98	0.49	0.47	0.20
1.00	(0.40)	0.33	0.00

senden die Gasschichten ihre Strahlung nicht einseitig, sondern nach allen Richtungen aus. *Drittens* entschwindet ein Teil der Strahlung an der Obergrenze der Photosphäre in den Weltraum. Damit ein Gleichgewicht zwischen den einzelnen Schichten herrscht, müssen wir unterstellen, dass dieser Strahlungsverlust exakt und beständig aus dem Sonneninneren kompensiert wird.

Daher sendet jede photosphärische Schicht in Richtung der Sternoberfläche etwas mehr Strahlung aus, als sie aus dieser Richtung empfängt. Das funktioniert freilich nur dann, wenn tiefer gelegene Schichten heißer als die über ihnen liegenden sind, die Temperatur also mit wachsender Sonnentiefe beständig *zunimmt*. Allerdings ist die nach dieser Vorstellung zu erwartende Temperaturzunahme in der Photosphäre anders als diejenige, die man im Konvektionsmodell vorhersagen würde. Die Entscheidung zwischen beiden Modellen wird durch die gemessene Mitte-Rand-Verdunklung gefällt.

Nimmt man – ohne überhaupt an ein ganz bestimmtes Modell zu denken – an, dass die Temperatur der Photosphäre von außen nach innen, also mit zunehmender Tiefe, zunimmt, und unterstellt man ferner, dass die Gasmassen der Photosphäre für elektromagnetische Strahlung teilweise durchsichtig sind, dann erwartet man geradezu eine Helligkeitsabnahme zum Sonnenrand hin. Dies ergibt sich aus der Geometrie der Beobachtung (Abb. 3).

Beim Blick auf die Sonnenmitte schaut man in tiefere und somit heißere Schichten der Sonne, aus denen intensives Sonnenlicht zum Beobachter gelangt. Der eher streifende Blick in Richtung Sonnenrand durchdringt weniger tief gelegene Schichten der Sonne. Die von dort stammende Strahlung der relativ kühlen Gasmassen ist weniger intensiv. Die in der Abb. 3 gezeigte Tabelle stammt aus Schwarzschilds Veröffentlichung von 1906. Sie zeigt die gemessene und die berechnete relative Helligkeitsabnahme von der Mitte der Sonnenscheibe zum Sonnenrand hin. Die Entscheidung, welches das richtige Modell ist, fällt eindeutig zugunsten des Strahlungsgleichgewichts aus.

Strahlung oder Konvektion?

Man muss nicht unbedingt an die Weihnachtspyramide denken, um sich zu vergegenwärtigen, dass die Konvektion auf der Erde ein Alltagsphänomen ist. Die Wolkenbildung, die morgendlichen Hangaufwinde in den Bergen, schlechthin der Wärmetransport in der Atmosphäre, aber auch ein großer Teil der Wärmeabgabe des menschlichen Körpers werden über die Luftkonvektion in der Gashülle der Erde reguliert. Hinzu kommt die immer vorhandene Wärmestrahlung, die man nur unterbinden könnte, indem man einen erhitzten Körper mit einer vollständig reflektierenden Hülle umgeben würde. Konvektion und Strahlung sind auf der Erde allgegenwärtig und treten zumeist gemeinsam auf. Ist es denkbar, dass irgendwo in den Sternen die Energie ausschließlich durch Strahlung abgeführt wird?

Auch diese Frage beantwortete Schwarzschild im Jahre 1906. Der entscheidende Punkt seiner Überlegungen lässt sich relativ leicht nachvollziehen: Angenommen, eine Gasschicht habe eine gewisse Temperatur-, Druck- und Dichteverteilung. Wird eine Gasblase am Grund dieser Schicht erwärmt, dann expandiert sie, ihre Dichte sinkt und sie beginnt wie ein Heißluftballon zu steigen. Beim Steigen dehnt sie sich noch weiter aus und wird dabei kühler. Jetzt kommt es darauf an, wohin der »Heißluftballon« gestiegen ist. Bewegt er sich durch Gasschichten, die heißer sind als er und damit auch eine geringere Dichte haben, dann wird er zwangsläufig herabsinken: Die Konvektion wird unterdrückt.

Abb. 3: Die Skizze zeigt die Beobachtungsgeometrie der Mitte-Rand-Verdunklung. Blicken wir in die Mitte der Sonnenscheibe, dann sehen wir Strahlung aus tieferen, heißeren Schichten als am Rand der Sonnenscheibe. Die Tabelle wurde aus Schwarzschilds Beitrag »Über das Gleichgewicht der Sonnenatmosphäre«, erschienen 1906 in den »Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen«, entnommen.

Abb. 4: Karl Schwarzschild (1873–1916) gehört zu den vielseitigsten Astrophysikern des beginnenden 20. Jahrhunderts. Er untersuchte die Gesetzmäßigkeiten bei der Belichtung photographischer Platten, beschäftigte sich mit der Sonnenphysik und fand als erster eine geschlossene Lösung von Einsteins Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie (die Schwarzschild-Lösung).

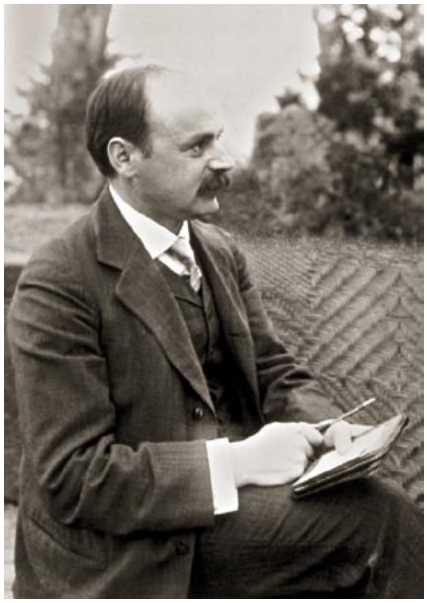
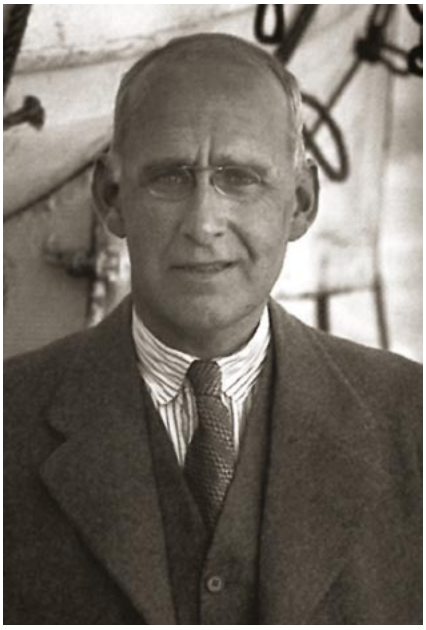


Abb. 5: Schwarzschilds Schwager Robert Emden (1862–1940) gilt als Pionier bei der Erforschung des inneren Aufbaus der Sterne. Der aus der Schweiz stammende Physiker und Meteorologe übertrug später die an der Sonne gewonnenen Erkenntnisse seines Freundes Schwarzschild zum Strahlungsgleichgewicht auf die obere irdische Atmosphäre. Emden war, wie auch Schwarzschild, Jude und musste nach der Machtergreifung der Nazis in die Schweiz flüchten.



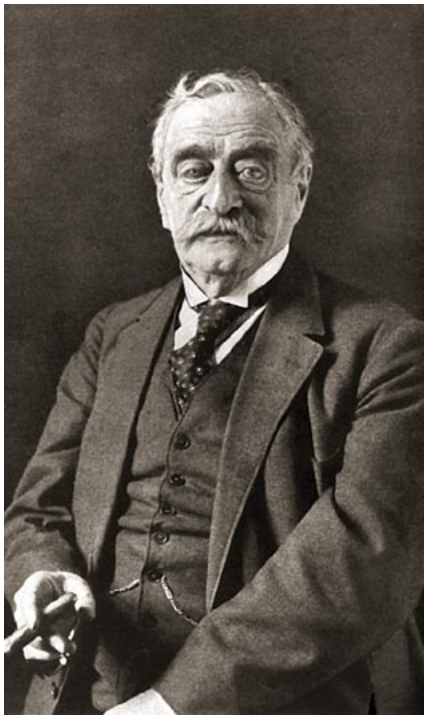


Abb. 6: Arthur Stanley Eddington (1882–1944) griff Schwarzschilds Überlegungen zum Strahlungsgleichgewicht auf. Gemäß seinen Erkenntnissen musste sich die Zone, in der die Konvektion unterdrückt wird und allein die Strahlung regiert, tief im Inneren der Sterne befinden. Mit diesem Schritt begründete Eddington die moderne Theorie des inneren Aufbaus der Sterne.

Aber warum sollten höher gelegene Schichten derart hohe Temperaturen besitzen? Vielleicht, weil die Wärmestrahlung dem Ballon ein Schnippchen schlägt und das über ihm befindliche Gas so aufheizt, dass er, wohin er auch gelangt, stets kühler als seine Umgebung ist. Für Ballonfahrer eine wahrhaft schauderhafte Vorstellung! Schwarzschild konnte berechnen, bei welchem Temperaturgefälle die Konvektion unterdrückt wird und die Wärmestrahlung die alleinige Herrschaft über den Energietransport im Stern ergreift. Ihm zu Ehren nennen wir dieses Entscheidungskriterium heute das *Schwarzschildkriterium*. Auch wenn wir seine Rechnung hier nicht nachvollziehen können, sind wir doch in der Lage, die physikalische Argumentation zu veranschaulichen.

Für die Erdatmosphäre hatte bereits Lord Kelvin ausgerechnet, bei welchem Temperaturgefälle die Wärmekonvektion gerade einsetzt. Seine mathematische Anweisung hierzu war denkbar einfach: Teile den Zahlenwert der Fallbeschleunigung, $g = 10\ \mathrm{m/s^2}$, durch den (in jeder physikalischen Datensammlung nachschlagbaren) Zahlenwert der Wärmekapazität von Luft bei konstantem Druck, $c = 1000\ \mathrm{kJ/(kg\ K)}$, und du findest das kritische Temperaturgefälle in der Einheit Kelvin pro Meter. Auf der Erdoberfläche erhält man als Resultat 0.01 K/m, das heißt ein Kelvin pro hundert Meter. Diese Zahl stimmt gut mit der tatsächlichen Temperaturabnahme in der Erdatmosphäre überein – das ist zu erwarten, denn hier findet ja die Wärmekonvektion statt. Wäre die Temperaturabnahme mit wachsender Höhe jedoch geringer, dann würde sich in der Gashülle der Erde keine Wärmekonvektion ausbilden können. Ein Kelvin pro 100 Meter entspricht 0.001 Kelvin pro Dezimeter oder 0.0001 Kelvin pro Zentimeter. Somit setzt auf der Erde eine Konvektion bereits dann ein, wenn ein Volumenelement der Luft nur um einen aberwitzig kleinen Temperaturbetrag heißer als die Luft in seiner Umgebung ist.

Der Gradient entscheidet!

Sollte das nicht auf den Sternen genauso sein? Eben nicht, denn Sterne sind zwar sehr heiß, aber auch sehr groß. Wir wissen, dass in ihrem Inneren die Kernfusion abläuft, die Temperaturen von etwa zehn Millionen Kelvin erfordert. In der Sonnenmitte ist es also sehr heiß. Dividieren wir aber die Temperatur im Sonnenzentrum durch den Sonnenradius, dann erhalten wir die mittlere Temperaturabnahme in unserem Zentralgestirn pro Meter – sie beträgt etwa 0.014 Kelvin pro Meter, also etwa so viel wie in der unteren Erdatmosphäre, etwa ein Kelvin pro 100 Meter. Dieses relativ *kleine mittlere* Temperaturgefälle legt zumindest die Vermutung nahe, dass die Temperaturunterschiede irgendwo im Sonneninneren so klein sein könnten, dass dort die Konvektion vollständig unterdrückt wird.

Schwarzschild selbst glaubte nicht daran, dass dies irgendwo tief im Sonneninneren der Fall sein könnte, denn er schrieb als Resümee seiner Untersuchung: »Es wird daher hier die Vorstellung nahe gelegt, dass eine äußere Schale der Sonnenatmosphäre sich in stabilem Strahlungsgleichgewicht befindet, während sich vielleicht in der Tiefe eine dem adiabatischen Gleichgewicht angenäherte Zone auf- und absteigender Ströme erstreckt, die dann zugleich die Entnahme der Energie aus ihren eigentlichen Quellen besorgen wird.« Schwarzschilds Sternmodell war im Inneren konvektiv, genau wie alle anderen Gaskugelmodelle, die man bereits um 1900 erwogen hatte.

Etwa zehn Jahre später griff der berühmte Astrophysiker Arthur Stanley Eddington Schwarzschilds Gedanken über das Strahlungsgleichgewicht erneut auf und kam zu dem Schluss, dass – im Gegensatz zu Schwarzschilds Auffassung – gerade tief im Inneren eines jeden sonnenähnlichen Sterns – eines so genannten Hauptreihensterns – eine Zone existiert, in der die Energie lediglich durch elektromagnetische Strahlung transportiert wird. Diese Einsicht markierte die Geburtsstunde der modernen Theorie des inneren Aufbaus der Sterne. Doch das ist bereits eine andere Geschichte... □

Oliver Schwarz bildet an der Universität Koblenz-Landau Lehrer aus. Ihn beschäftigt die Frage, wie man jungen Menschen physikalisch-astronomische Erkenntnisse effizient vermitteln kann, ohne dass dabei die Begeisterung für die Schönheit der Natur verloren geht.