Ueber die Ursache der Sonnenflecken.

Von Egon von Oppolzer.

Die Frage über die Ursache der Sonnenflecken ist noch nicht befriedigend gelöst; denn jede Sonnenflecken-theorie muss als unvollkommen angesehen werden, wenn sie nicht die Erscheinungen, die mit dem Wesen und der Ursache der Flecken so eng verknüpft sind, nämlich die Periodicität und die heliographische Vertheilung der Flecken, aus sich erklärt. Dies lässt sich aber von keiner der bis jetzt aufgestellten Theorien behaupten, so äussert sich Young über dieses Problem; es muss aber auch jede solche Theorie als unvollkommen angesehen werden, wenn sie nicht auch die eigenthümliche Rotation der Sonnenbreiten verständlich macht, denn diese geht ja Hand in Hand mit der Häufigkeit und Vertheilung der Flecken. Diese Entdeckung haben wir Spörer zu danken, sie wurde aber von den vielen Rotations-theorien viel zu wenig beherzigt. Das Resultat, das Spörer aus der Discussion der Fleckenbeobachtungen (1861-71) gezogen hat, war folgendes:¹⁾

»Das Jahr 1866, welches dem Jahre des Flecken-minimums voranging, ist dadurch merkwürdig, dass hier der gewöhnliche Gang der Rotationswinkel fast vollständig verschwindet. . . »Wer nur in einem solchen Jahre beobachtet, wo Verhältnisse obwalten wie im Jahre 1866, muss es durchaus für zulässig halten, die sämtlichen Rotationswinkel zu einem Mittelwerthe zu vereinigen. . . »dass in den beiden Jahren vor dem Fleckenmaximum die Mittelwerthe der Rotationswinkel mit ausgezeichneter Gleichmässigkeit nahe dieselbe Curve geben. . . »der Nachweis, dass

innerhalb der elfjährigen Periode bei den Jahrescurven der für verschiedene Breiten aufgestellten Mittelwerthe der Rotationswinkel charakteristische Verschiedenheiten (vor und nach dem Minimum) auftreten, schliesst vollständig den Gedanken aus, dass an der Sonnenoberfläche eigenthümliche Rotationsverhältnisse nach feststehenden Parallelzonen stattfinden könnten, und werden wir darauf hingewiesen, die vermittelst der Flecke gefundenen Rotationsverhältnisse solchen Strömungen zuzuschreiben, welche mindestens eben so veränderlich sind, wie die Häufigkeit der Flecke und deren Vertheilung.«

Dieses für die Sonnenphysik so wichtige Ergebniss findet sich wieder in der Bearbeitung der folgenden Perioden, wenn auch nicht gerade so ausgeprägt. Leider erstrecken sich die Beobachtungen Dunér's über die Rotation der Sonne²⁾ auf einen Zeitraum von zu geringer Sonnenthätigkeit (3 Jahre vor dem Minimum), um diese Erscheinung noch mehr zu bekräftigen, sie scheinen aber doch dafür zu sprechen. Wenn man den erstaunlich geringen wahrscheinlichen Fehler der Dunér'schen Beobachtungen berücksichtigt — er erreicht höchstens 0.03 km — so glaube ich, dass die folgenden Schlüsse eine gewisse Berechtigung haben: Dunér bildet für die Geschwindigkeiten v ³⁾ der einzelnen Zonen das Gesamtmittel aus den Jahren 1887, 1888 und 1889. Bildet man nun die Differenzen aus den Mittelwerthen der einzelnen Jahre und diesem Gesamtmittel, so erhält man folgende Differenzen (Mittel—Gesamtmittel):

φ	Fleckenzone					
	0°4	15°0	30°0	45°0	60°0	74°8
1887	+0.01	0.00	-0.02	+0.02	+0.03	-0.02
1888	-0.08	-0.08	-0.03	-0.03	-0.04	+0.05
1889	+0.07	+0.07	+0.06	0.00	0.00	-0.02

Man sieht sofort aus dieser Tabelle, dass das Jahr 1887, das vom Minimumjahr am meisten absteht, für das Gesamtmittel das ausschlaggebende war; sämtliche Abweichungen liegen innerhalb der Fehlergrenze; das Jahr 1888 zeigt grosse negative Abweichung, also kleinere Geschwindigkeit hauptsächlich in der Fleckenzone; dementsprechend treten im Jahre 1889, dem Jahr vor dem Minimum, grosse positive Abweichungen, also grössere Geschwindigkeiten auf, und zwar nur in der Fleckenzone; in

den höheren Breiten machen sich hingegen schon wieder Verhältnisse geltend, wie sie im Jahre 1887 in allen Breiten bestanden, Verhältnisse, die die Geschwindigkeiten zu hemmen trachten. Ganz dieselben Erscheinungen, wie sie hier der auf der Sonnenoberfläche befindliche Eisendampf bezüglich seiner Bewegung um die Sonne zeigt, treten in den Fleckenbewegungen zu Tage; auch die Thatsache, dass, wenn zur Zeit des Minimums der Fleckenzug in höheren Breiten beginnt, dort sofort andere Verhältnisse Platz greifen und zwar

¹⁾ Spörer, Publ. der Astr. Gesellsch. XIII, S. 148-153; 1874.

²⁾ Dunér, Nov. acta reg. soc. Ups. Ser. III, Vol. XIV, 1891.

³⁾ In km pro Secunde.

solche, wie sie der gewöhnliche Gang der Rotationswinkel erfordert, findet sich hier wieder und deutet schlagend darauf hin, wie innig die Rotationsbewegung der Sonnenbreiten mit der heliographischen Vertheilung zusammenhängt, und giebt uns damit zugleich einen deutlichen Fingerzeig, wo wir die Ursache zu der der Sonne eigenthümlichen Rotation zu suchen haben, und worin die Ursache besteht, nämlich in einer Hemmung der Geschwindigkeiten.

Nach diesen einleitenden Erörterungen wollen wir zum Wesen der Flecken übergehen. Die Flecken und vor allem ihr Kern sind Gas- und Dampfmassen, die durch ihre niedrigere Temperatur eine verstärkte Absorption des von der Photosphäre ausgestrahlten Lichtes ausüben. Diese offenbart sich im Fleckenspectrum, was zuerst Young¹⁾ und neuerdings Dunér²⁾ entdeckt hat, neben der Verstärkung und Verbreiterung vieler Linien des Sonnenspectrums durch das Auftreten unzählig vieler dicht nebeneinander stehenden Linien, die im gewöhnlichen Sonnenspectrum wegen ihrer Feinheit und Blässe nicht zum Vorschein kommen, und deren Unbeweglichkeit auf grosse Ruhe in den absorbirenden Massen schliessen lässt, so dass sich Dunér aus diesem Grunde mehr der Secchi'schen als der Faye'schen Hypothese zuneigt. Dass die Flecken in der Photosphäre eingesenkt sind oder, und es genügt für unsere Frage, eingesenkt sein können, ist auch als eine genügend erhärtete Thatsache anzusehen. Selbst Spörer sieht sich in seiner letzten Sonnenfleckenbeobachtungen-Publication³⁾ S. 427 dies anzunehmen veranlasst, wenn er schreibt: »Für diese Flecke muss angenommen werden, dass die scheinbare Kernoberfläche entschieden tiefer lag, als es durchschnittlich der Fall ist, wenn man nicht in diesen und anderen Fällen die Abweichungen allein den Beobachtungsfehlern oder den Gestaltsverhältnissen der Flecke zuschreiben will.« Fassen wir alle diese Ergebnisse zusammen, so ergibt sich folgendes Bild eines Flecks: In den condensirten Dämpfen der Photosphäre ist eine Einsenkung, auf deren Boden eine erkaltete Dampfschicht liegt. Wie ist denn überhaupt erklärlich, dass sich eine derartige Vertiefung von einigen hundert Meilen in diesen condensirten Dampfmassen bilden und dazu noch Monate lang bestehen bleiben kann, und ebenso dass sich eine derartige Temperaturdifferenz zwischen dieser erkalteten Dampfschicht und der Photosphäre eben so lange erhält? Eine derartige Vertiefung ist nur denkbar, wenn sich in derselben Gase oder Dämpfe von höherer Temperatur befinden, die eine Condensation der photosphärischen Dämpfe verhindert. Wir müssen also in einem Fleck eine extreme Temperaturumkehrung vor uns haben; dafür sprechen ja das häufige Schmälerwerden der Linien, welche in die höchsten Regionen der Chromosphäre hinaufgehen, und deren häufige Umkehrung; dafür die jüngst angestellten Beobachtungen Frost's, dass Flecken gelegentlich wärmer sein können, als die sie umgebende Photosphäre.⁴⁾ Ueber der abgekühlten Dampfschicht herrscht eine für die betreffende Höhe über der Sonnenoberfläche anormale Hitze;

dies lässt sich nur und ganz ungezwungen durch einen von der Chromosphäre auf die Photosphäre niedergehenden atmosphärischen Strom erklären. Ueber die Wirkung eines solchen kann die neuere Meteorologie vollkommen Aufschluss geben; vor allem sind es die grundlegenden Arbeiten Hann's⁵⁾ auf diesem Gebiete, denen ich Gedanken für Gedanken hier folgen will. Nach diesen ergibt sich für einen absteigenden Luftstrom folgendes:

Die mittlere Temperatur der Luftsäule, in welcher die nach abwärts gerichtete Bewegung auftritt, ist hoch über dem gewöhnlichen Mittel; die Luft ist darinnen von ausserordentlicher Klarheit und Trockenheit. In einer gewissen Entfernung von der Erdoberfläche muss die absteigende Bewegung natürlich aufhören und in eine ebenso langsame horizontale übergehen; in diesem Theile ihrer Bahn erkaltet die Luft durch Wärmestrahlung, welche durch die gleichzeitige Heiterkeit und Trockenheit der höheren Luftschichten ausserordentlich begünstigt wird. In Folge dieser starken Erkaltung entstehen jene dichten Bodennebel, welche bei dem Eintreten derartiger Verhältnisse die Niederungen erfüllen. In der sinkenden Luftsäule herrscht ein anormal hoher Luftdruck.

Haben wir hier nicht nach den obigen Erörterungen ein fast vollständiges Analogon? Die Klarheit der Photosphäre, die Ruhe der tieferen Schichten und deren intensive Erkaltung! Nachdem noch zur Genüge durch Beobachtungen bewiesen ist, dass eine aus der Höhe auf den Fleck hin gerichtete Bewegung stattfindet, — ja es hat sogar Spörer zahlreiche Fälle beobachtet, bei denen derartige Ströme den Fleck geradezu hervorriefen⁶⁾ — so scheinen wir zu einer derartigen Erklärung der Flecken gezwungen, wenn wir noch dazu bedenken, dass auf der Sonne diese Wirkungen von viel grösserer Intensität begleitet sein müssen als wie auf unserer Erde. Der grösste Theil der von der Photosphäre ausgehenden Strahlung wird von den auf ihr liegenden Gasen und Dämpfen absorbiert, und vor allem spielen dabei die am tiefsten lagernden Metaldämpfe mit ihren zahlreichen Linien die grösste Rolle; die höheren Schichten der Chromosphäre bestehen aus Gasen und Dämpfen von verhältnissmässig geringem Absorptionsvermögen, dazu gehört das Helium, der Wasserstoff, das Natrium und Calcium. Einen Strom, der hauptsächlich aus diesen letzteren Stoffen besteht und Dämpfe, so z. B. Eisendämpfe, nur in stark überhitzter Form mit sich führt, will ich »trocken« nennen, im Gegensatz zu solchen Strömen, welche mit Dämpfen gesättigt sind und »feuchte« heissen sollen. Steigt nun so ein feuchter Strom aus der Photosphäre in die Chromosphäre auf und senkt er sich natürlich als trockener irgendwo wieder herab, so wird er eine viel höhere Temperatur mitbringen als diejenige war, mit welcher er die Photosphäre verlassen hat; dies rührt daher, weil er bei seinem natürlich mit Abkühlung verbundenen Aufstieg fortwährend Dämpfe condensiren muss, die ihm dadurch ihre Condensationswärme zuführen und

¹⁾ Young, Amer. Journ. of Sc. Ser. III, Vol. XXV.

²⁾ Dunér, die vorerwähnte Arbeit, S. 12.

³⁾ Spörer, Publ. d. Astroph. Obs. z. Potsd. Bd. IV, St. 4; 1886.

⁴⁾ Frost, A. N. Bd. 130, Nr. 3105-06, S. 143; 1892.

⁵⁾ Hann, Zeitschr. f. Meteorol. Bd. X, S. 210, 1875; Bd. XI, S. 129-135, 1876; Denkschr. d. W. Ak. d. Wiss. Bd. LVII, 1890.

⁶⁾ Spörer, Publ. d. Astroph. Obs. z. Potsd. Bd. I, St. 1, Nr. 1, S. 79; 1878.

dadurch die Abkühlung stark verzögern.¹⁾ Absteigende Ströme sind daher immer mit grosser Hitze und Trockenheit verbunden, da die Dämpfe, die sie etwa nur in starker Ueberhitzung enthalten, keinen nennenswerthen Einfluss üben. Trifft daher ein solcher Strom auf die Photosphäre, in die er sich noch fortsetzt, so wird er in Folge seiner bedeutend höheren Temperatur die hier lagernden condensirten Dämpfe auflösen, dieselben mit sich wegführen und durch fortwährendes Zuströmen grosse Trockenheit in seiner Bahn hervorrufen; die Folge davon wird eine an dieser Stelle auftretende Klärung der Photosphäre sein, die einer trichterförmigen Vertiefung gleichen muss; schliesslich wird der verticale Strom sich in horizontale Ströme verzweigen, und unterhalb dieser Verzweigungsstelle, wo die Gase stagniren müssen, haben wir jetzt geeignete Bedingungen zu einer mächtigen Ausstrahlung; hier erfolgt eine beträchtliche Temperaturerniedrigung, die die als Kernfleck auftretende Gas- oder Dampfschicht erzeugt. Die Wände des Trichters erleiden natürlich auch eine Ausstrahlung, jedoch in viel geringerem Maasse, da sie ja gegen die Sonnenoberfläche geneigt sind, und bilden den Hof des Flecks. Ich will hier nicht näher darauf eingehen, wie die directen und die Spectralbeobachtungen mit diesen Auffassungen übereinstimmen; dies soll an einem anderen Ort geschehen.

Wir sind eigentlich mit der uns gestellten Aufgabe, die Ursache der Flecken zu erklären, fertig; ich möchte aber mir doch noch anzudeuten erlauben, wie diese Sonnenfleckentheorie die an jede solche zu stellenden Anforderungen erfüllt; sie kann nämlich die Rotation und die heliographische Vertheilung der Flecken erklären. Wenn wir die Sonnenflecken als Gebiete niedergehender Ströme auffassen, die naturgemäss irgendwo anders aufsteigende erfordern, und ferner erwägen, dass sich die Flecken in Zonen anordnen, so deutet dies auf einen gemeinsamen Ursprung hin, der zwar am Aequator vermuthet werden kann, aber nicht dort, sondern in den polaren Regionen zu suchen ist, da eine Fleckenzone in niederen Breiten, auch ganz am Aequator ziehen kann, während in den höheren Breiten — und dies ist ja um die Zeit des Minimums immer der Fall — schon ein neuer kräftiger Fleckenzug beginnt. In den polaren Regionen herrschen also aufsteigende Ströme wie in unserer Erdatmosphäre am Aequator, die in einer gewissen Höhe als horizontale Ströme gegen die niederen Breiten in lang gezogenen Spiralen ziehen, wo sie als Ostwinde auftreten und, wenn sie sich senken, als Flecken. Bis ein Stromzweig vom Pol nach den niederen Breiten gelangt, können Monate, vielleicht Jahre vergehen, dies hängt von der Geschwindigkeit des Aufstroms ab. Denkt man sich den polaren Aufstrom in seiner Intensität bald wachsend, bald abnehmend, so ergibt sich, wie leicht einzusehen ist, die Ursache der heliographischen Vertheilung der Flecken: Wenn er zur Zeit des Minimums anwächst, so werden sich zu dieser Zeit die Flecken schon in höheren Breiten senken; mit seiner stetig

anwachsenden Intensität wird er bewirken, dass die niederen Breiten von Flecken übersät werden; es wird das Fleckenmaximum eintreten, und der Strom kann schon fast erloschen sein; die Flecken werden in höheren Breiten verschwinden, während die um die Sonne noch kreisenden Ostwinde sich schliesslich als Minimumflecken in der Nähe des Aequators senken werden; einstweilen beginnt schon wieder das frühere Spiel. Dieser Aufstrom erklärt also die heliographische Vertheilung in äusserst einfacher Weise, aber zugleich auch die eigenthümliche Rotation der Sonnenbreiten. Die von den Polen herabkommenden Ströme bringen kleine Geschwindigkeiten und mithin kleine Rotationswinkel mit, da nach Zöppritz²⁾ und Wilsing³⁾ die Reibung an den unteren Schichten von sehr geringem Einfluss ist, und behalten sie demnach auch lange Zeit; wenn sie aber die Sonne einige mal umkreist haben, so wird sich doch ein solcher Einfluss geltend machen, der bewirkt, dass die in den niederen Breiten herrschenden Ostwinde einen grösseren täglichen Rotationswinkel zeigen, als die in höheren Breiten auftretenden, die der Reibung viel weniger ausgesetzt waren.⁴⁾ Auch die Erscheinungen auf der Sonnenoberfläche sprechen mit grosser Wahrscheinlichkeit für einen an den Polen vorhandenen Aufstrom: Die polaren Regionen sind die Calmen der Sonne; die oft riesige Dimensionen, namentlich in horizontaler Richtung zeigenden Wolkenprotuberanzen, deren durchschnittliche Höhe die aller anderen übertrifft, die über der Photosphäre frei schweben und sich doch ohne sichtbaren Zusammenhang »von unten her erneuern«, zwar hier und da durch kleine Säulen verbunden, erhalten sich hauptsächlich in der Nähe der Pole während einer ganzen Umdrehung und scheinen doch auch für diese Hypothese zu sprechen. Wenn nicht die höhere Temperatur der Pole Ursache dieses Polstroms ist, so müsste dieser jedenfalls die Pole erwärmen. Die Pole werden also zu gewissen Zeiten heisser als die aequatorialen Gegenden sein; dies wird, wenn überhaupt nachweisbar, zur Zeit des Minimumjahres, wenn der Fleckenzug in höheren Breiten beginnt, am stärksten hervortreten. Für diese Behauptung spricht das sonst ganz räthselhafte Verhalten der Chromosphäre, dass sie zu jener Zeit »Anhäufungen« an beiden Polen zeigt, während sie das Jahr vor dem Minimum eine bezüglich ihrer Höhe über alle Breiten sich erstreckende Constanz zeigt.

Es erscheint durch diese Sonnenfleckentheorie das Problem der Rotation der Sonne, der Häufigkeit der Flecken, sowie ihrer heliographischen Vertheilung auf ein einziges zurückgeführt zu sein, nämlich auf das Problem eines in den polaren Gegenden periodischen Aufstroms.

Die vielen weiteren Belege zu den hier nur angedeuteten Auffassungen und die weiteren Consequenzen, zu denen mich die Theorie bezüglich der Constitution und Temperatur der Sonne, der Natur und des Wesens der verschiedenen Protuberanzen führt, beabsichtige ich in einer bald vollendeten Arbeit zu bringen.

Wien 1892 November.

Egon von Oppolzer.

¹⁾ Eine gesättigt feuchte aufsteigende Luft erleidet für 100 m bei 10° eine Wärmeabnahme von 0°54, eine trockene eine solche von fast genau 1°, also beinahe die doppelte einer feuchten.

²⁾ Zöppritz, Wied. Ann. N. F. Bd. III, S. 582; 1878.

³⁾ Wilsing, A. N. Bd. 127, Nr. 3039, S. 233; 1891.

⁴⁾ Es ist dies derselbe Gedanke, der der Rotationstheorie Zöllner's zu Grunde liegt.