

## Liebe Leserin, lieber Leser,

vor 75 Jahren, noch vor dem Höhepunkt des 18. Sonnenfleckenzyklus, schnellte eine bis dato ruhende Protuberanz binnen zweier Stunden von anfänglich 350 000 km bis auf 1,7 Millionen Kilometer über die Sonnenoberfläche empor. Dieser Urahn aller eruptiven Protuberanzen, „Granddaddy“ im Jargon der Sonnenforscher, war am 23. Mai am Ostrand der Sonne aufgetaucht und nichts deutete auf das plötzliche Verschwinden am 4. Juni 1946 hin.

Eine Protuberanz ist ein über der Sonne senkrecht schwebendes scheibenförmiges Gebilde relativ kühlen Gases. Sie leuchtet im Lichte der roten Wasserstofflinie ( $H_\alpha$ ) bei 656,3 nm und kann mit einem Protuberanzenfernrohr durch ein  $H_\alpha$ -Filter auch außerhalb einer Sonnenfinsternis am Sonnenrand als „Hervortretung“ beobachtet werden. Vor dem hellen Hintergrund der Sonnenscheibe, in der Draufsicht, macht sie sich durch  $H_\alpha$ -Absorption als ein dunkles schmales Filament von einigen Tausend Kilometern Dicke bemerkbar. Eine Protuberanz markiert die Grenze von magnetisch unterschiedlich gepolten Regionen auf der Sonne. Getragen wird der Milliarden-Tonner von einem arkadenförmigen Magnetfeld, das vom magnetischen Norden zum magnetischen Süden reicht und (wegen der Protuberanz Gewicht) eine Einsenkung aufweist. Stellt man sich die magnetischen Feldlinien als Gummiseile vor, so könnte man sagen, eine Protuberanz hängt in den Seilen. Ruhende Protuberanzen können ggf. in so einer Magnettasche Sonnenrotationen überdauern, wobei sie sich allerdings langsam drehen, was wiederum das Magnetfeld aufwickelt. Eine ruhende kann sich, wie vor 75 Jahren geschehen, zu einer eruptiven Protuberanz mausern. Ursache könnte rascher Gewichtsverlust sein. Gas fällt entlang magnetischer Feldlinien nach unten, das entlastete verdrillte Magnetfeld schnell nach oben und schleudert einen koronalen Massenauswurf (sog. CME) in den Raum.

Die mit gut fünftausend Grad recht kühlen Protuberanzen ragen in eine Millionen Grad heiße Sonnenkorona hinein. Vor 90 Jahren, im Juni 1931, erfuhr die Fachwelt von dieser Hitze. Seit dem wüsste sie gerne, was die Sonnenkorona so heiß macht? Dieser hochsommerlichen Frage geht nach

Ihr Hans-Erich Fröhlich

## Der Himmel im Juni

Venus ist Abendstern und der Abenddämmerung vorbehalten. Untergang am Monatsende ist gegen 23 Uhr MESZ.

Mars trödelnd und wird von der schnelleren Sonne eingeholt. Gegen Monatsende verschwindet er vom Abendhimmel. Am Jahresende hat er dann sein Come-back am Morgenhimmel.

Jupiter schleicht durch den Wassermann. Am 21. Juni kommt er zum Stillstand. Er begibt sich in seine diesjährige Oppositionsschleife. Saturn ist weiter. Er ist bereits rückläufig, und zwar im benachbarten Sternbild Steinbock.

Juni-Neumond ist am 10. um die Mittagsstunde, ein  $3/4$  Tag nachdem der Mond den aufsteigenden Knoten seiner Bahn passiert hat, die Schnittstelle mit der Ekliptik. Die Folge ist eine ringförmige Sonnenfinsternis, welche bei uns partiell ist. Ringförmig ist die Finsternis, weil der Mond just am 8. Juni den erdfernten Punkt seiner Bahn durchlaufen haben wird und deshalb noch zu klein am Himmel erscheint, als dass er die Sonne in Gänze abdecken könnte. Die Totalitätszone berührt übrigens den Nordpol. Am längsten dauert die Finsternis im hohen Nordwesten Grönlands.

Sommersonnenwende ist am 21. Juni, um 5 Uhr 32 MESZ.

## Koronaheizung

Warum die Sonnenkorona 200-mal heißer ist als die Sonnenoberfläche? – Wir wissen es immer noch nicht! Auf das Mysterium der extremen Koronatemperatur stieß der Potsdamer Walter Grotrian (1890–1954) bei der Auswertung von Koronaspektren, gewonnen während der Sumatra-Sonnenfinsternis am 9. Mai 1929. Eigentlich sollte es um die Einstein'sche Lichtablenkung im Schwerfeld der Sonne gehen. Profitiert aber hatte die Koronaforschung von der Expedition nach Takengon, nahe dem Äquator. Aus der Verwaschenheit der Fraunhoferlinien im Spektrum der K-Korona – die dunklen Linien sind derart verbreitert, dass sie als solche kaum noch erkennbar sind – schloss Grotrian auf eine hohe thermische Geschwindigkeit der lichtstreuenden<sup>1</sup> Elektronen. Das Ganze ist einigermaßen paradox: Wie wir wissen,

---

<sup>1</sup>Die innere Korona leuchtet im Optischen nicht selbst. Es handelt sich vielmehr um gestreutes Sonnenlicht, wie ein anderer prominenter Potsdamer, Karl Schwarzschild (1873–1916), richtig vermutet hatte.

strömt Wärme vom Warmen zum Kalten. Fiele nicht die Temperatur vom Sonnenzentrum zum Sonnenrand, könnte die Wärme aus dem Innern der Sonne nicht hinaus! Gleich oberhalb der Photosphäre („Lichtkugel“) aber beobachten wir eine Temperaturumkehr. (Bei der Erdatmosphäre sprechen Meteorologen dann von einer Inversionswetterlage.) Je mehr man sich von der Sonnenoberfläche entfernt, desto heißer wird’s. Möglich wird das, weil der optisch dünne Fall vorliegt. Die Atmosphäre oberhalb der Photosphäre ist *per definitionem* durchsichtig. (Wir sehen nahezu unbehelligt von außen bis zur Sonnenoberfläche.) Die Temperaturumkehr vollzieht sich bereits in rund 500 km Höhe, wenn wir mit der Höhe 0 das Niveau bezeichnen, wo die optische Tiefe 1 wird. Die Minimaltemperatur in der Sonnenatmosphäre liegt bei 4200 K. Das sind über Zweitausend Grad weniger als die Photosphären-temperatur beim Nullniveau, 6400 K. In der dünnen Chromosphäre werden Temperaturen von 10 000 bis 20 000 Grad erreicht. Die Chromosphäre („Farbkugel“) macht sich bei einer Sonnenfinsternis für Sekunden bemerkbar. Sie sorgt für den farbigen Lichtsaum um die vom Monde verdeckte Sonne.

Oberhalb der Chromosphäre schnellte die Temperatur auf eine Million Grad und mehr hoch. Im Gegenzug stürzt die Dichte ab. Die dünne Korona ist ein schlechter Strahler. Stöße, die zur Aussendung von Strahlung führen, sind wegen der Dünne selten. (Die Stoßwahrscheinlichkeit geht mit dem Quadrat der Dichte!) Dafür ist ihr Wärmeleitvermögen hoch<sup>2</sup>. Die relativ dichte Chromosphäre hingegen strahlt gut. Man kann sagen, die Korona verliert Energie dadurch, dass sie – von oben! – die Chromosphäre heizt.

Wie es zu der Temperaturinversion kommt? Nun, zunächst dachte man an eine Heizung durch Schallwellen, denn auf der Sonne geht es laut zu. In der Korona dominiert der magnetische Druck über den thermischen. Also zog man „magnetischen“ Schall in Betracht. Bei der Absorption von Wellen wird Wärme frei. Viele Forscher sehen allerdings in der punktuellen Vernichtung (Annihilation) von magnetischem Feld beim Vorliegen spezieller Feldkonfigurationen die Hauptheizquelle.

Zwar ereignen sich in Zeiten aktiver Sonne gelegentlich gewaltige Sonneneruptionen, sog. Flares, wo magnetische Feldenergie in Bewegungsenergie und letztlich thermische Energie überführt wird, aber solch sporadische Aktionen reichen bei weitem nicht aus, die Korona durchgehend zu heizen. Auch in Zeiten „ruhiger“ Sonne zielt diese der Strahlenkranz. Im Zeitalter von UV- und

---

<sup>2</sup>Eine Protuberanz ist durch den Magnetfeldmantel wärmeisoliert und gegen die Koronahitze gefeit.

Röntgenastronomie ist ein Flare gewöhnlich eine auffällige Erscheinung. Flares der X-Klasse bringen es bis auf die Titelseiten von Illustrierten. (Die von diesen Eruptionen ausgehenden Plasmageschosse (CMEs) sind, so sich ihnen die irdische Magnetosphäre in den Weg stellt, für eine Hightech-Zivilisation sogar gefährlich.) Doch scheint die Sonne bzgl. Koronaheizung der Devise „Kleinvieh macht auch Mist“ zu huldigen. Es sind, wie’s scheint, die unspektakulären Mini-Flares, welche unabhängig von der Sonnenaktivität, allein aufgrund ihrer Überzahl, die Korona heizen.

Um diese Mini-Flares zu sehen, die wie verstreute „Lagerfeuer“ hier und da aufflammen, bedarf es eines Adlerblicks im extremen Ultravioletten (EUV). Und über den verfügen moderne Sonnenweltraumteleskope, die durch den interplanetaren Raum treiben. So kann der Solar Orbiter bei einer Sonnenentfernung von 0,6 AE noch Details von 400 km ausmachen. Tatsächlich sind auf EUV-Aufnahmen helle Punkte zu erkennen, welche sekundenlang nur aufleuchten. Das ist sicherlich nur die Spitze des Eisbergs.

Im täglichen Leben, wenn es nicht gerade um’s Geld geht, herrscht die Normalverteilung (Gaussverteilung), auf der Sonne aber die Pareto-Verteilung<sup>3</sup>. Angesichts der Tatsache, dass auf rare Extremereignisse, X-Flares, im gleichen Zeitraum viele „normale“ Flares und sicherlich eine Unzahl von Mini-Flares entfallen, gibt es da s Flare nicht. Ein Mittelwert wäre nichtssagend. Ob die vielen Mini-Flares für die Koronaheizung aufkommen oder nicht, hängt einzig und allein von dem Parameter der Pareto-Verteilung ab (und der Minimalstärke<sup>4</sup> von Flares). Übersteigt der Zahlenwert des Exponenten einen kritischen Wert, überwiegt der Energieeintrag durch die Kleinen, andernfalls wären nur die paar Großen wichtig. Das Dilemma, auf das der Börsianer und Epistemologe Nassim N. Taleb (geb. 1960) hinweist: die empirische Ermittlung des Exponenten. Um beurteilen zu können, ob man ausreichend Daten hat, den Zahlenwert dieses Exponenten zweifelsfrei zu ermitteln, müsste man die Verteilung bereits kennen! Und – lassen sich überhaupt alle Eruptionen in einen Pareto-Topf werfen? Bei diesem Geschäft kommt es auf höchste räumliche und zeitliche Auflösung an.

Mit empfindlichen Radioteleskopanlagen, sog. Arrays, auf der Erde kann man im Meter-Band Mini-Flares auf der Sonne registrieren, ohne sie genau orten

---

<sup>3</sup>Was nichts mit der Sonne zu tun hat! So wie wir überall auf die Normalverteilung stoßen, ist auch die Pareto-Verteilung, ein Potenzgesetz, allgegenwärtig und an keine spezielle Sparte gebunden. Sie beschreibt die Reichtumsverteilung, die Rangfolge von Familiennamen, die Verkaufszahlen von Bestsellern auf dem Buchmarkt, die Größenverteilung von Städten, die Häufigkeit des Schweregrades von Lawinen, Erdbeben, Wirbelstürmen und in der Astronomie die Größenverteilung der Mondkrater, die Masseverteilung unter den Sternen, die Heftigkeit von Sternbeben auf Neutronensternen etc.

<sup>4</sup>Zum Vergleich: Ein Nano-Flare hat mindestens die Sprengkraft der russischen Zar-Bombe, der mit 50 Mt stärksten jemals von Menschenhand gezündeten H-Bombe.

zu können (was für eine Statistik solcher Mini-Explosionen ausreicht).

Der Flaremechanismus selbst ist etwas obskur; hat mit Plasmaphysik zu tun, etwas Hochkompliziertem. Während in der Photosphäre ein Magnetfeldlinienbündel vom Gas mitgerissen und beispielsweise verdrillt wird, wodurch mechanische Energie in das Magnetfeld eingespeist und gespeichert wird, dirigiert umgekehrt in der dünnen Korona das Magnetfeld den Gasfluss. (Oberhalb der Photosphäre ist deshalb der Stoff „fädig“.) Geraten nun in der Korona Magnetfeldbögen mit unterschiedlichen in der Photosphäre verankerten Nord- und Südpolen miteinander ins Gehege, kommt es ggf. zu Stromflächen<sup>5</sup> zwischen anti-parallel verlaufenden Feldlinienbündeln. Klingt der Strom durch Ohm'sche Verluste (Stromheizung) ab, verschwindet dort das Magnetfeld. Es kommt quasi zu einer Neuverknüpfung magnetischer Feldlinien. Man spricht von *R e k o n n e x i o n*. Die Topologie des Feldes ändert sich abrupt. Das Magnetfeld „schnappt“ (relaxiert<sup>6</sup>) in eine energetisch günstigere Konfiguration, wobei magnetische Feldenergie impulsiv frei gesetzt wird: Geladene Teilchen werden auf fast Lichtgeschwindigkeit beschleunigt! Jets, die nach unten gerichtet sind, prallen bei den Fußpunkten der in der Photosphäre verankerten Nord- und Südpole auf die Sonnenoberfläche, was dort zu heißen Stellen und zur Aussendung von UV- und Röntgenstrahlung führt.

Man stelle sich zwei Paare vor, die, jedes für sich, durch ein Gummiseil miteinander verbandelt sind. Die gespannten Seile stehen für magnetische Feldlinien und bilden eine Andreaskreuzartige Anordnung. Die Nordpole nähern sich nun den fremden Südpolen, wodurch die kreuzenden Gummiseile über eine gewisse Strecke einander nahe kommen. Die den Seilen entsprechenden magnetischen Feldlinien verlaufen anti-parallel. Dort, wo sie sich fast berühren, verbinden wir die beiden gespannten Seile fest miteinander und zerschneiden anschließend die Verbindung in der Mitte. Entlastet, schnellen die neuverknüpften Gummiseile zurück. Ihre gespeicherte Energie entlädt sich schlagartig. Magnetpartnertausch macht's möglich.

Doch wie kommt's überhaupt zu diesem magnetischen Tohuwabohu? Das solare Magnetfeld ist, wie das irdische, dynamogenerated. Antreiber ist letztlich eine „Wärme kraftmaschine“. Im Falle der Sonne ist es der enorme Temperaturunterschied zwischen der unteren Begrenzung der Sonnenkonvektionszone (bei 0,7 Sonnenradien) und der Sonnenoberfläche, der eine effektive Umwandlung eines Teils des Wärmestroms aus dem Sonneninnern in Bewegungsenergie

---

<sup>5</sup>Ein von Strom durchflossenes Blech erzeugt außerhalb, senkrecht zur Stromrichtung, ein Magnetfeld, dessen Richtung bei Seitenwechsel sich sprunghaft umkehrt.

<sup>6</sup>Womit die Vereinfachung der Magnetfeldstruktur gemeint ist. Wegen der Wärmeproduktion spricht man von „topologischer Dissipation“.

gie erlaubt. Heiße Gasblasen steigen aus den Tiefen der Sonne auf, geben ihre Energie ab und sinken, abgekühlt und des Auftriebs verlustig gegangen, ins Sonneninnere zurück. Die Granulation an der Sonnenoberfläche kündigt noch von dem tieferliegenden Rumor.

Dass wir den nicht hören, verdanken wir allein der Leere des Raumes. Schallwellen bedürfen eines Mediums, Lichtwellen aber keines Äthers. Wir sehen die Sonne, hören sie aber nicht.

An freier (nutzbarer) Energie besteht kein Mangel! Ein Zehntausendstel der in der Granulation steckenden Konvektionsenergie reichte aus, die Korona auf die gemessenen Millionen Grad aufzuheizen. Die Frage ist, welche Wandlungen die Energie erfährt, bevor sie als Wärme in der Korona endet. Sicherlich spielt (Joule'sche) Stromwärme dabei eine Rolle, aber halt auch eben die Bewegungsenergie der Plasmageschosse, welche bei der Relaxation magnetischer Felder abgefeuert werden. Dass Magnetfeldern als Zwischenspeicher eine Rolle zukommt, steht außer Frage.

Konvektion im Verein mit differentieller Rotation stellt eine Siemens'sche Dynamomaschine dar. Magnetfeld wird ständig generiert, durch Verdrillung und Turbulenz klein-skaliig verwirbelt und schließlich durch die turbulenzbedingt endliche Leitfähigkeit vernichtet. Im Falle der Sonne haben wir es, wie vor gut einem halben Jahrhundert Jenaer und Potsdamer Magnetohydrodynamiker herausfanden, mit einem Wechselfeldynamo zu tun. Aller elf Jahre wechselt im Mittel die Polarität des Sonnendipols, was den Sonnenfleckenzyklus als ein magnetisches Phänomen entlarvt.