Hundert Jahre Sonnenforschung

Autor(en): **Waldmeier, M.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft. Wissenschaftlicher und administrativer Teil = Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles. Partie scientifique et administrative = Atti della Società Elvetica di Scienze Naturali**

Band (Jahr): **144 (1964)**

PDF erstellt am: **27.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-90547

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Hundert Jahre Zürcher Sonnenforschung

Von Prof. Dr. M. WALDMEIER

Vor hundert Jahren hat die Schweizerische Naturforschende Gesellschaft ihre Jahresversammlung wie heute in Zürich abgehalten. Den äusseren Anlass bot die Vollendung der Bauten des Eidgenössischen Polytechnikums. Diese bestanden aus dem westlichen, der Stadt zugewandten Trakt des Hauptgebäudes, einem schon zu Beginn des Jahrhunderts wieder abgetragenen chemischen Institut und der einige hundert Meter weiter oben am Schmelzberg errichteten Eidgenössischen Sternwarte. Kurz nachdem Rudolf Wolf als Professor für Astronomie und Geodäsie an das 1855 gegründete Polytechnikum berufen worden war, beschloss der Schweizerische Schulrat: «Es sei Herr Prof. Wolf einzuladen, dem Schulrate ein Gutachten samt Kostenberechnung betreffend Erstellung und Einrichtung einer Sternwarte für den Fall, dass bloss das dringendste Bedürfnis für den Unterricht an der Anstalt befriedigt werden sollte, und hinwieder für den Fall, dass dem Fache der Astronomie eine weitergehende Beachtung eingeräumt würde, beförderlich vorzulegen.» Wolf setzte sich für ein Institut ein, das 1. für längere Zeit genügen und 2. wenigstens bescheidenere wissenschaftliche Arbeiten ermöglichen sollte. Erstens: für längere Zeit genügen. Mit unverhohlener Freude zeigte Wolf den im August 1864 hier versammelten Mitgliedern der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft die eben vollendete Sternwarte. Im Überschwang patriotischer Gefühle wog auch die peinliche Eröffnung, dass die Kosten doppelt so hoch waren als der Voranschlag, wenig. Ja die Experten erweckten bei den Behörden die tröstliche Überzeugung, das Werk lobe in gleicher Weise die Eidgenossenschaft wie den Baumeister.

Von der Sternwart her die Kuppel glänzt,
mahnt mich, wie oft ich dort geschwänzt,
wo der Wolf und auch sein Komparativ[1]
sahen solo oft durchs Perspektiv.

Der Glanz der Kuppel ist verblichen, aber noch nach hundert Jahren blickt der Semper-Bau unverändert vom Schmelzberg herab: für längere Zeit genügen. Zweitens: wenigstens bescheidenere wissenschaftliche Arbeiten ermöglichen. Und über diese möchte ich heute einiges berichten. Dabei muss ich weite Gebiete, die eine Pflege gefunden haben, übergehen:

[1] Sein Assistent hiess Wolfer

die geodätischen Arbeiten, die meteorologischen, den Zeitdienst und die langen Programme nächtlicher Beobachtungen. *Eine* Forschungsrichtung zieht sich in kontinuierlicher Folge durch das ganze Jahrhundert: die Sonnenforschung. Und hierauf haben sich mehr und mehr, heute sogar fast ausschliesslich, unsere bescheidenen wissenschaftlichen Arbeiten konzentriert. Rudolf Wolf war Direktor der Eidgenössischen Sternwarte von ihrer Gründung bis zu seinem 1893 erfolgten Tode. Ihm folgte von 1894 bis 1926 Alfred Wolfer und diesem von 1926 bis 1945 William Brunner.

Im Jahre 1843 hat Geheimrat Heinrich Schwabe, Apotheker in Dessau, auf Grund seiner eigenen, sich über 17 Jahre erstreckenden Beobachtungen der Sonnenflecken eine Notiz publiziert, nach welcher dieses Phänomen einer etwa zehnjährigen Periodizität zu unterliegen scheine. Hier hat Wolf eingesetzt. Durch die heute nach ihm benannte sogenannte Sonnenflecken-Relativzahl hat er ein quantitatives Mass eingeführt zur Erfassung der Menge der Flecken. Dieses Mass ist so beschaffen, dass ihm auch die vielen alten Sonnenfleckenbeobachtungen, denen der Historiker Wolf in Bibliotheken und Archiven nachgespürt hat, nutzbar gemacht werden konnten. Schliesslich war Wolf in der Lage, monatliche Mittelwerte der Relativzahl bis in die Mitte des 18. Jahrhunderts mitteilen zu können, Jahresmittelwerte sogar zurück bis ins Jahr 1700. Für die noch weiter zurückliegenden Zeiten bis zur Entdeckung der Sonnenflecken, 1610, konnte er wenigstens die Jahre der Maxima und Minima der Sonnenfleckenhäufigkeit ermitteln. Wolf hat bis zu seinem Tode durch eigene Beobachtungen die Sonnenfleckenstatistik gefördert und durch ein grosszügiges Vermächtnis ihre Fortsetzung sichergestellt. Unser Klima ist nicht sonderlich geeignet für ein derartiges Programm. Deshalb hatte sich Wolf überall in Europa nach Mitarbeitern an seiner Sonnenfleckenstatistik umgesehen. Dies war der Anfang zu der heutigen weltumspannenden Organisation, die auf der Zürcher Sternwarte zentralisiert ist, alle Aspekte der Sonnenaktivität umfasst und im «Quarterly Bulletin on Solar Activity» ihr eigenes Publikationsorgan besitzt. Um jederzeit und schnell über die Vorgänge auf der Sonne im Bild zu sein, haben wir 1957 als Aussenstation der Eidgenössischen Sternwarte in Locarno-Monti die «Specola Solare» erbaut. Da das Wetter auf den beiden Seiten des Alpenkammes häufig komplementär ist, enthalten die aus Zürich und Locarno kombinierten Reihen nur noch wenige Lückentage.

Die einzelnen etwa elfjährigen Zyklen der Fleckentätigkeit sind sowohl nach Länge als auch nach Intensität sehr verschieden. Nachdem eine hinreichend grosse Zahl von solchen Zyklen beobachtet worden war, konnte festgestellt werden, dass diese Variationen nicht den Charakter statistischer Streuungen besitzen, sondern bestimmten, mathematisch fassbaren Gesetzmässigkeiten unterliegen. Insbesondere zeigte sich, dass die Formen der einzelnen Fleckenkurven ein und demselben Schema angehören, einer im wesentlichen einparametrigen Kurvenschar, von der jede einzelne Fleckenkurve ein individuelles Exemplar ist. Dies hat zur Folge, dass durch ein kleines Stück einer Fleckenkurve deren ganzer

Verlauf festgelegt ist. So lässt sich aus einem kurzen Anfangsstück der Verlauf der Fleckentätigkeit für die kommenden 11 Jahre, insbesondere Zeit und Intensität des Fleckenmaximums, voraussagen. Als sich vor dreissig Jahren erstmals die Möglichkeit einer Sonnenfleckenprognose ergab, bestand dafür nur ein wissenschaftliches Interesse. Seither hat man erkannt, dass die kommerziell so wichtigen Kurzwellenverbindungen sehr stark von der Sonnenaktivität abhängen. Deshalb wurde auf der Eidgenössischen Sternwarte während des letzten Weltkrieges ein Prognosendienst über die Sonnenfleckentätigkeit eingerichtet. Seit 18 Jahren emittiert der Schweizerische Kurzwellensender allmonatlich die Sonnenflecken-Relativzahlen des abgelaufenen Monats sowie Prognosen für die kommenden sechs Monate, nach welchen Tausende von Kurzwellensendern auf der ganzen Erde ihre Wellenbänder festlegen.

Nicht nur die Menge der Sonnenflecken interessiert, sondern auch ihre Lage auf der Sonne, ihre Grösse, ihre Form und ihre Entwicklung. Diesem Ziele dienen tägliche Bilder der Sonne. Mit einem Fernrohr wird das Sonnenbild auf einen weissen Schirm projiziert, und auf diesem werden die Positionen der Flecken zeichnerisch festgehalten. Zu dieser noch immer unentbehrlichen Methode sind die täglichen Photographien der Sonne gekommen, denn nur das photographische Bild kann die überaus komplizierten Strukturen der Sonnenflecken naturgetreu wiedergeben. Solche bei sehr ruhiger Luft erhaltenen Aufnahmen zeigen die Sonnenoberfläche von granulierter Struktur. Die Granula sind helle Wolken von etwa 1000 km Durchmesser. Sie bestehen aus heissen, aus tieferen Schichten aufsteigenden Gaszellen. Zwischen den Granula sinken abgekühlte und deshalb weniger helle Gasströme in die tieferen Schichten zurück. Direkte Beobachtungen, die in unserer Klimazone nur sehr selten möglich sind und deshalb zu den schwierigsten gehören, haben für die Granula eine Lebensdauer von 5 bis 10 Minuten ergeben und die Beobachtungen des Dopplereffektes in ihrem Spektrum eine Aufstiegsgeschwindigkeit von 1 bis 2 km/s. In den der direkten Beobachtung zugänglichen Schichten der Sonnenatmosphäre herrscht somit ein dauerndes Brodeln. Die Ursache dieser Konvektion liegt im Temperaturgradienten, der in diesen Schichten den adiabatischen Gradienten übersteigt.

Die Sonnenflecken treten gruppenweise auf, wobei eine einzige Gruppe bis einige Hundert Einzelflecken enthalten kann. Das Archiv der Sternwarte enthält die Entwicklung von weit über 10000 Fleckengruppen. Diese Entwicklung folgt einem festen Schema, von dem aber jede individuelle Gruppe mehr oder weniger starke Abweichungen aufweist. Nie sind zwei Fleckengruppen völlig gleich. Unter den Flecken einer Gruppe dominieren nach Grösse zwei, welche an dem im Sinne der Rotation der Sonne vorausgehenden und nachfolgenden Ende der Gruppe stehen. Die Fleckengruppen besitzen somit eine bipolare Struktur. Auf dem Mount-Wilson-Observatorium in Kalifornien ist 1908 die bedeutende Entdeckung gemacht worden, dass es sich um eine magnetische Bipolarität handelt, indem von den beiden Hauptflecken der eine ein magnetischer Nordpol,

der andere ein magnetischer Südpol ist. Der vorangehende Hauptfleck übertrifft nach Grösse und Lebensdauer den nachfolgenden. Deshalb besteht die Fleckengruppe im Endstadium nur noch aus dem vorangehenden unipolaren Hauptfleck, der zu dieser Zeit eine runde Gestalt angenommen hat, nach und nach kleiner wird und schliesslich verschwindet. Kleinste Flecken können sich schon nach wenigen Stunden wieder auflösen, grosse Gruppen erreichen eine Lebensdauer von einigen Monaten. Das umfangreiche Beobachtungsmaterial unserer Sternwarte wurde und wird verwendet zum Studium der Verteilung der Flecken auf der Sonne, zur Bestimmung der Sonnenrotation, vor allem aber zur Untersuchung der Struktur und der Metamorphose der Fleckengruppen. Vielfach haben wir die Sonnenflecken als Sonden verwendet, die durch ihre Eigenbewegung Zirkulation und Strömungen in der Sonnenatmosphäre zu erkennen geben. Häufig genügen die Beobachtungen von Tag zu Tag nicht, um ein lückenloses Bild von der Entwicklung der Fleckengruppen zu erhalten. Deshalb wurde während des Internationalen Geophysikalischen Jahres 1957/58 auf der Eidgenössischen Sternwarte ein Programm zentralisiert, wonach alle 2 bis 3 Stunden irgendwo auf der Erde, wo die Sonne gerade schien, die Sonnenflecken photographiert wurden. Nachdem der normale Entwicklungsgang der Fleckengruppen bekannt war, haben wir uns speziell für diejenigen Gruppen interessiert, welche sich in irgendeiner Hinsicht abweichend verhalten: sei es, dass die Achsenneigung der Fleckengruppe das falsche Vorzeichen hat, sei es, dass die Hauptflecken zu nahe beisammenstehen oder verkehrte magnetische Polaritäten aufweisen oder die Eigenbewegungen anomale Strömungsverhältnisse anzeigen. Wir haben nämlich vermutet, dass sich unter diesen anomalen Fleckengruppen jene befinden, welche besonders aktiv sind, das heisst besonders viele und heftige Eruptionen erzeugen, die ihrerseits wieder von entsprechenden terrestrischen Auswirkungen begleitet sind. Es scheint, dass wir damit einen gangbaren Weg beschreiten.

Direkte Beobachtung oder Photographie der Sonne liefert ein Bild ihrer leuchtenden oberflächlichen Schichten, der sogenannten Photosphäre. Deren vertikale Ausdehnung beträgt nur wenige hundert Kilometer. Nach aussen nimmt die Dichte der Sonnenatmosphäre und damit ihre Lichtemission rasch ab. Spektroskopische Beobachtungen haben zu einer formalen Dreiteilung der Sonnenatmosphäre geführt: über der Photosphäre liegt in einer Mächtigkeit von rund 10000 km die Chromosphäre, an welche sich nach aussen die Korona anschliesst. Diese ist ohne Begrenzung und geht allmählich in das interplanetare Medium über. Die Chromosphäre liefert tausendmal, die Korona millionenmal weniger Licht als die Photosphäre. Darin liegt die Schwierigkeit der Beobachtung dieser höheren Atmosphärenschichten. Der Weg, der gestattet, das Chromosphärenlicht aus dem sehr viel intensiveren Photosphärenlicht auszusieben, wird durch das Sonnenspektrum gewiesen. Dieses besteht aus einem Kontinuum, etwa entsprechend einer Planckschen Kurve für die Temperatur von 6000 °; es ist durchzogen von den dunkeln soge-

nannten Fraunhoferschen Linien. Im Zentrum einer Linie ist der Absorptionskoeffizient des für die Linie verantwortlichen Gases sehr viel höher als am Rande der Linie oder ausserhalb derselben. Das Licht des Zentrums der Linien entstammt somit den höchsten, dasjenige des Kontinuums den tiefsten beobachtbaren Schichten. Die Linien erscheinen dunkler als das Kontinuum, weil die höheren Schichten eine niedrigere Temperatur und damit eine geringere Lichtemission aufweisen als die tieferen. Mit Spektrohelioskop, Spektroheliograph und monochromatischen Filtern gelingt es, Bereiche von nur wenigen Zehnteln Ångström Breite aus dem Sonnenspektrum zu selektionieren. Die Aufnahme von monochromatischen Bildern der Chromosphäre im Lichte verschiedener Linien bildet heute einen der Schwerpunkte des Sonnenbeobachtungsprogrammes der Eidgenössischen Sternwarte. Durch Verschiebung des Durchlassbereiches kann man Bilder von der höchsten Chromosphäre bis zur tiefsten Photosphäre erhalten.

Die Chromosphärenbilder zeigen zahlreiche Erscheinungen, welche bei direkter Beobachtung unsichtbar sind. Es seien hier nur erwähnt die Fackelgebiete, die Filamente, die Protuberanzen und die Eruptionen. Die Fackelgebiete sind helle Felder, die in Verbindung mit Fleckengruppen auftreten, aber weit über diese hinausreichen und noch wochenlang sichtbar bleiben, wenn die zugehörigen Flecken schon wieder verschwunden sind. Dass es sich um Erscheinungen in einem höheren Niveau handelt, folgt schon aus dem Umstand, dass diese Fackelwolken die Flecken – wenigstens die kleineren – vollständig zudecken. Teile dieser langsam und stetig sich entwickelnden Fackelgebiete können plötzlich an Helligkeit in wenigen Minuten enorm zunehmen, im Verlaufe einer halben Stunde wieder verblassen. Derartige Eruptionen können sich über Fleckengruppen in Intervallen von Stunden vielfach wiederholen. Es sind die brillantesten Erscheinungen auf der Sonne, und trotzdem ist ein solcher Blitz nur eine optische Begleiterscheinung eines hochenergetischen Prozesses, der explosionsartigen Emission von Röntgenstrahlen, Radiowellen, Elektronen und Protonen mit einer Energie bis zu einer Milliarde Elektronenvolt. Die Filamente sind dunkle, fadenförmige Gebilde, die im Laufe von Wochen und Monaten bis zu Längen von einigen hunderttausend Kilometern anwachsen können, gelegentlich sogar die halbe Sonne umspannen. Wenn sie durch die Rotation der Sonne an den Rand gelangen, sieht man sie als Protuberanzen weit über den Sonnenrand hinausragen. Auch wenn ihre äussere Form stationär bleibt, herrschen in ihrem Innern Strömungen von 10, 50 oder 100 km/s. Eruptive Protuberanzen können mit Geschwindigkeiten bis zu mehr als 1000 km/s von der Sonne in den Weltraum hinausfliegen.

Die Korona ist so lichtschwach, dass sie im Streulicht der irdischen Atmosphäre und des Beobachtungsinstrumentes völlig untergeht. Sie gelangt jeweils für wenige Minuten zur Sichtbarkeit, wenn bei einer Sonnenfinsternis der Mond die millionenmal hellere Photosphäre zudeckt und zudem die Atmosphäre im Umkreis von rund 100 km um den Beobachter beschattet. Auch ohne Sonnenfinsternis können wenigstens

die inneren, helleren Teile der Korona beobachtet werden, wenn erstens ein streulichtfreies Instrument verwendet und zweitens in so grosser Höhe gearbeitet wird, dass auch das atmosphärische Streulicht kein unüberwindliches Hindernis mehr bietet. Vor einem Vierteljahrhundert hat die Eidgenössische Sternwarte zur Erforschung der Sonnenkorona, die damals noch voller Rätsel war, auf dem Tschuggen bei Arosa in über 2000 m Höhe ein Observatorium erbaut. Dessen Errichtung verdanken wir letzten Endes wiederum Rudolf Wolf. Als nämlich die Eidgenössische Sternwarte gebaut werden sollte, kam ein Vertrag zustande, wonach die Eidgenossenschaft den Bau übernahm, der Kanton Zürich dagegen einen geeigneten Bauplatz zur Verfügung zu stellen und für die ständige Freihaltung der Beobachtungssphäre, insbesondere in der Meridianrichtung, zu sorgen hatte. Dieses Servitut musste der Kanton ablösen, bevor zum Neubau des Kantonsspitals geschritten werden konnte. So kam es zum Verkauf des Meridians, aus dessen Erlös das Aroser Observatorium gebaut worden ist. Mit der Koronaforschung hat die Eidgenössische Sternwarte ein überaus interessantes und äusserst fruchtbares Forschungsgebiet aufgegriffen.

Das Licht der Korona ist zu 99% gestreutes Sonnenlicht. Das restliche Prozent ist die koronale Eigenstrahlung in Form von etwa 30 Emissionslinien. Diesen Linien galt unser besonderes Interesse; sooft der Himmel klar genug war, wurden ihre Intensitäten, die sich örtlich und zeitlich als stark variabel erwiesen, um die ganze Sonne herum und in verschiedenen Abständen vom Sonnenrand gemessen. Keine der koronalen Emissionslinien war damals identifiziert, und die sich häufenden Beobachtungen blieben vorerst noch ohne physikalische Interpretation. In kurzer Zeit hat sich das Bild von der Korona in ungeahnter Weise erweitert. Aus Dopplerverschiebungen wurden die Strömungen in der Korona analysiert und ihre Rotation bestimmt. Die täglichen Beobachtungen offenbarten den zonalen Aufbau der Korona und die Fortführung dieses Beobachtungsprogrammes über einen elfjährigen Zyklus die grossräumige Zirkulation dieser Zonen. Messungen der vertikalen Ausdehnung liessen die Pulsation der Korona und die Veränderungen ihrer Form im elfjährigen Zyklus erkennen. Zufolge der Rotation der Sonne gelangen jeden Tag wieder andere Gebiete der Korona zur Beobachtung. Wenn das Wetter gestattet, an vierzehn aufeinanderfolgenden Tagen die Korona zu beobachten, ist jeder Meridian einmal an den Sonnenrand gekommen, und es ist dann möglich, eine Abwicklung der Sonne, eine heliographische Karte der Korona zu entwerfen. Solche Karten haben gestattet, die Entwicklung der koronalen Emissionsgebiete zu studieren und die Beziehungen zu entdecken, welche zwischen den Erscheinungen der Korona und denjenigen der tieferen Schichten, der Chromosphäre und der Photosphäre, also den Fackeln, den Protuberanzen und den Flecken bestehen. Die Photometrie der Korona zeigt im allgemeinen einen starken Helligkeitsabfall nach aussen. Gelegentlich aber wurde ein Helligkeitsanstieg beobachtet, indem in der Korona in Höhen von 50000 bis 100000 km über der Photosphäre helle Knoten oder Strukturen, welche an die Formen

gewisser Protuberanzen erinnern, auftreten. Wir haben sie Kondensationen genannt. Es sind Verdichtungen in der Korona über den Aktivitätszentren. In den Flecken- und Fackelgebieten sehen wir die flächenhafte Ausdehnung der Aktivitätszentren, sozusagen ihre Grundfläche, in den koronalen Kondensationen dagegen ihre dreidimensionale Struktur. Gewisse Emissionen im ganz langwelligen und ganz kurzwelligen Sonnenspektrum haben in den Kondensationen ihre Erklärung gefunden.

Die koronalen Emissionslinien sind nie im Laboratorium beobachtet worden; es handelt sich um sogenannte verbotene Linien, die nur in extrem verdünnten Gasen auftreten können. Die Dichte der Korona ist selbst in ihren innersten Teilen billionenmal kleiner als diejenige der atmosphärischen Luft. Verbotene Linien, auch wenn nicht beobachtbar, können den Termschemata der Atome und Ionen entnommen werden. Aber auch in diesen ist man den Koronalinien nicht begegnet. Der Grund liegt darin, dass die Koronalinien sehr hohen Ionisationsstufen angehören, die man irdisch noch nicht hat erzeugen können und deren Termschemata deshalb noch unerforscht sind. Die meisten Koronalinien gehören dem Eisen an, darunter auch die beiden am häufigsten untersuchten Linien, die rote Linie 6374 Å von Fe X und die grüne Linie 5303 Å von Fe XIV. Für die Erzeugung der in der Korona beobachteten Ionen sind Energien von 200 bis 800 eV notwendig. Diese Energien entsprechen, thermisch interpretiert, einer Temperatur von rund 2000000 °. Dieses Resultat war so völlig unerwartet, beträgt doch die Temperatur der Photosphäre «nur» rund 6000 °, dass es noch anderer Temperaturbestimmungen bedurfte, um das Resultat glaubwürdig zu machen. Zahlreiche Bestimmungen des Profils der grünen Koronalinie ergaben für diese stets eine Breite von 1 Å. Diese Breite kann nur durch Dopplereffekt erklärt werden. Aus der Verbreiterung folgt die Geschwindigkeit der Eisenionen, und aus dieser ergibt sich wieder eine Temperatur von 2000000 °. Von den zahlreichen Temperaturbestimmungen sei hier nur noch die augenfälligste erwähnt. In einer statischen Atmosphäre ist der Dichtegradient um so kleiner, die Ausdehnung der Atmosphäre somit um so grösser, je höher die Temperatur. Aus der gewaltigen Ausdehnung der Korona, verglichen mit derjenigen der Photosphäre, folgt eine Koronatemperatur, die etwa 300mal höher ist als die Photosphärentemperatur, womit wir wieder auf rund 2000000 ° kommen. Die Aufheizung der Korona gehört noch zu den ungelösten Problemen. Die meisten Vorstellungen stimmen darin überein, dass sie durch mechanische Energie erfolgt, die aus der schon erwähnten Konvektion in den tieferen Schichten stammt und durch akustische Wellen, Stosswellen oder hydromagnetische Wellen in die Korona hineingetragen wird.

Die hohe Koronatemperatur bedingt sowohl in den Linien als auch im Kontinuum eine intensive Ausstrahlung bei sehr kurzen Wellen, nämlich im Gebiet der weichen Röntgenstrahlen. Damit ergeben sich für die Spektralkurve der Sonnenstrahlung zwei Maxima: das längst bekannte im visuellen Bereich, herrührend von der photosphärischen Strahlung, und ein zweites, herrührend von der Korona bei etwa 30 Å. Als wir dieses

Ergebnis 1943 veröffentlicht haben, gab es noch keine oder jedenfalls keine direkten Prüfungsmöglichkeiten, indem diese Röntgenstrahlen schon in Höhen über 100 km in unserer Atmosphäre vollständig absorbiert werden. Später haben amerikanische Raketenaufstiege die solare Röntgenstrahlung entdeckt, gemessen und die Voraussagen bestätigt. Diese Strahlung ist zeitlich variabel, indem ihr Hauptanteil von den in wechselnder Zahl und Grösse vorhandenen koronalen Kondensationen stammt.

Eine andere Folgerung der hohen Koronatemperatur ist die intensive solare Emission im Gebiet der Radiowellen. Diese Emission ist aber – im Gegensatz zur Röntgenstrahlung – von niemandem vorausgesehen, sondern zufällig während des Krieges mit englischen Radargeräten entdeckt worden und blieb eines der bestgehüteten Geheimnisse. Im Gebiet der Radiowellen ist die thermische Emission nach dem Planckschen Strahlungsgesetz proportional der Temperatur. Da die Intensitätsmessungen im Gebiet der Meterwellen auf eine Temperatur von etwa einer Million Grad führten, stand sofort fest, dass diese Strahlung nicht von der Sonne, sondern von ihrer Korona kommen musste. In der Radioastronomie der Sonne hat man somit eine neue Methode der Koronaforschung. Da es unserer Sternwarte nicht möglich gewesen ist, experimentell auf diesem neuen Gebiet zu arbeiten, haben wir es theoretisch getan, indem wir uns Gedanken gemacht haben über das, was an andern Orten beobachtet und gemessen worden ist. Die Dezimeterwellen entstammen der innersten, die Meterwellen äusseren Teilen der Korona. Mit verschiedenen Wellenlängen lassen sich somit die Emissionen verschiedener Schichten der Korona separieren, was im optischen Gebiet nicht möglich ist. Ungleich der Wärme- und Lichtstrahlung unterliegt die Radioemission zeitlichen Schwankungen. Im Gebiet der Dezimeterwellen folgt die variable Komponente sehr genau und ohne zeitliche Verschiebung der Häufigkeit der Sonnenflecken. Da aber die Strahlung nicht von den Flecken, sondern von der Korona stammt, müssen die koronalen Gebiete über den Flecken, die koronalen Kondensationen, die Quelle der variablen Komponente sein.

Nachdem sich die Aroser Koronabeobachtungen über einen ganzen Zyklus erstreckt hatten, verlagerte sich unser Interesse mehr auf die äussere Korona, die auch heute noch nur bei totalen Sonnenfinsternissen beobachtbar ist. In den letzten zwölf Jahren hat die Eidgenössische Sternwarte acht Expeditionen in alle Erdteile unternommen. Ich möchte hier dankbar die Institutionen erwähnen, die durch ihre Unterstützung diese Unternehmungen ermöglicht haben: die Schweizerische Naturforschende Gesellschaft, die Eidgenössische Technische Hochschule, die Universität Zürich, der Schweizerische Nationalfonds und die Landeslotterie. Die Korona reicht weit über die Erdbahn hinaus, ja man kann förmlich sagen, die Erde sei in die Korona eingebettet, indem sie ständig von den koronalen Strahlen umflossen wird. Es genügt nicht, bei einer Finsternis die Helligkeit der Korona zu messen, bei einer andern die Elektronendichte zu bestimmen oder das Spektrum oder die Polarisation

zu beobachten. Nur wenn man alle diese Informationen für ein und dieselbe Korona und für möglichst viele Punkte derselben besitzt, kann der physikalische Zustand der Korona in seiner Gesamtheit erschlossen werden. Das war die Konzeption unserer ersten Expeditionen, die aus diesem Grunde sehr umfangreich waren. Die späteren haben sich mit spezielleren Problemen befasst, insbesondere mit der strahligen Struktur der Korona. In der Umgebung der Sonnenpole zeigen sich Büschel von gekrümmten Strahlen, die man als materialisierte magnetische Feldlinien deuten kann. Die Veränderung der Form dieser Strahlen von einer Finsternis zur nächsten zeigt die Veränderungen, denen das solare Magnetfeld im elfjährigen Zyklus unterliegt. Da die kurzen Polarstrahlen kontinuierlich in die langen Strahlen niedrigerer Breite übergehen, müssen auch diese magnetische Feldlinien sein; sie frisieren die Korona, indem sie die solare Korpuskularstrahlung bündeln und kanalisieren.

Kurz nach dem Bekanntwerden der Periodizität der Sonnenflecken wurde im Jahre 1852 die erste solar-terrestrische Beziehung entdeckt, indem der parallele Gang zwischen der Häufigkeit der Sonnenflecken und derjenigen der erdmagnetischen Störungen festgestellt wurde. Wolf war zwar an dieser Entdeckung beteiligt, doch kann ihm die Priorität nicht zuerkannt werden. Seither haben die Untersuchungen über solar-terrestrische Beziehungen in den Veröffentlichungen der Sternwarte einen breiten Raum beansprucht, insbesondere die klassischen Untersuchungen über die Häufigkeit des Polarlichtes. Bemerkungen hingegen, wie etwa: die Weinlese erfolge um so früher, je weniger Flecken es auf der Sonne habe, schiessen weit über das Ziel hinaus, auch wenn die Behauptung für dieses Jahr, wo die Fleckentätigkeit auf dem Nullpunkt angekommen ist, zutrifft. Die terrestrischen Wirkungen der solaren Vorgänge sind in den hohen Schichten der Atmosphäre zu suchen. In den erwähnten erdmagnetischen Stürmen kann man morphologisch zwei ganz verschiedene Typen unterscheiden: einmalige, sporadische und solche, welche mehrmals in Intervallen von 27 Tagen, das heisst, wenn uns die Sonne wieder dieselbe Seite zukehrt, auftreten. In beiden Fällen sind solare Korpuskularströme die Ursache. Die sporadischen treten in Verbindung mit solaren Eruptionen auf. Man sieht auf der Sonne sozusagen das Mündungsfeuer vom Abschuss einer Geschossgarbe. Etwa einen Tag später erfolgt der Einschlag auf der Erdatmosphäre und damit der Beginn der magnetischen und ionosphärischen Störungen und der Polarlichter. Hartnäckiger erwies sich die Aufklärung der periodischen Störungen. Man macht sich die Vorstellung, dass von gewissen Gebieten der Sonne während Monaten Korpuskeln abströmen und dass das irdische Magnetfeld jedesmal in Unordnung gerät, wenn dieser Strahl nach je einer Umdrehung der Sonne wieder über die Erde hinwegfegt. Die Quellgebiete dieser Strahlung haben sich bis jetzt jeder optischen Beobachtung entzogen. Wir vermuten, dass diese Strahlung das letzte Stadium in der Entwicklung eines Aktivitätszentrums ist und auftritt, wenn die Flecken und Fackeln aus diesen Zentren bereits wieder verschwunden sind, ohne dass an derselben Stelle neue derartige Störungen auftreten. Gestützt wird diese Ansicht durch

eine enge Beziehung zwischen den stationären Protuberanzen, welche ein sehr vorgerücktes Entwicklungsstadium der Aktivitätszentren darstellen, und den periodischen magnetischen Störungen. Dieses Bild hat schon 1947 gestattet, die Geschwindigkeit dieser Partikelströme, die man heute Sonnenwind nennt, zu 500 km/s zu bestimmen, was in den letzten Jahren durch amerikanische Raumsonden, welche solchen Partikelströmen begegnet sind, eine Bestätigung erfahren hat.

Von den solaren Röntgenstrahlen war schon die Rede, auch wurde erwähnt, dass sie in den hohen Schichten der Erdatmosphäre steckenbleiben. Dort geben sie ihre Energie ab und ionisieren die Atome und Moleküle der Luft. Die dadurch entstehende ionisierte Schicht reflektiert die irdischen Radiowellen zur Erde zurück, und erst dadurch sind Radioverbindungen von Kontinent zu Kontinent um die gekrümmte Erde herum möglich. Aus den mit Radiowellen sondierten Reflexionseigenschaften der Ionosphäre lässt sich ihre Elektronendichte berechnen und aus dieser die Intensität der von der Sonne einfallenden ionisierenden Strahlung. Diesen Weg haben wir vor 20 Jahren beschritten, in Ermangelung einer Möglichkeit, die solare Röntgenstrahlung direkt zu beobachten. Bei ruhiger Sonne stammt diese Strahlung von der ungestörten Korona, bei aktiver Sonne zusätzlich von den koronalen Kondensationen.

Nach diesem Rückblick auf einige der «bescheidenen wissenschaftlichen Arbeiten», welche Wolf vorgeschwebt haben mögen, versuchen wir, die Marschrichtung für das zweite Jahrhundert abzustecken. Die Eidgenössische Sternwarte besitzt die älteste Tradition auf dem Gebiet der Sonnenaktivitätsstatistik und hat dieser auch die breiteste Grundlage gegeben durch Einbeziehung von photosphärischen, chromosphärischen und koronalen Erscheinungen. Es muss unsere erste Aufgabe sein, dieses Erbe zu wahren und zu mehren. Wert und Nutzen dieser Tätigkeit wird vielfach erst späteren Generationen zugute kommen. Traditionsgebundene Programme enthalten die Gefahr des Veraltens und Verkümmerns. Immer wieder müssen neue Ideen und neue Methoden sie frisch beleben. Es wird deshalb immer wieder die Aufgabe der Eidgenössischen Sternwarte sein, eine Verbindung zu finden zwischen moderner und traditionsgebundener Sonnenforschung.