

aber erst später wurde die eigentliche Ursache für sie verstanden. Neben den Flecken zeigt die Sonne auch einige andere Phänomene wenn sie "aktiv" ist, diese werden alle unter dem Begriff "Sonnenaktivität" zusammengefaßt.

Ein Kennzeichen des 11-j. Aktivitätszyklus ist seine Unvorhersagbarkeit: Weder Intensität noch Dauer lassen sich mit befriedigender Genauigkeit einige Zeit im voraus bestimmen. Die bisher gefundenen langperiodischen Schwankungen in der Zyklenform sind noch nicht genau genug bekannt; gerade in jüngster Zeit widersprechen die Beobachtungen den Vorhersagen, die mit Hilfe der 80-jährigen Schwankung der Höhe der 11er- Zyklen gemacht werden können.

In dieser Arbeit habe ich die Sonnenfleckenzyklen aufgrund einer neuen Überlegung analysiert und Regelmäßigkeiten gefunden, die den 80-jährigen Zyklus und sein momentanes Verhalten erklären. Außerdem führten die Ergebnisse zu einer Erklärungsmöglichkeit des langen 900-jährigen Zyklus, der bisher nur ungenau untersucht werden konnte. Ich konnte seine Länge mit Hilfe der Beobachtungen aus China zu 960 Jahren bestimmen und zeigen, daß er sich in der Asymmetrie und der Höhe der 11-jährigen Zyklen ausdrückt.

Aus den Analyseergebnissen folgt eine langfristige Vorhersagemöglichkeit der 11-j. Zyklen. Zudem ist es wahrscheinlich, daß die "Waldmeier'schen Gesetze", in denen die Beziehung v. a. zwischen Höhe und Anstiegsdauer der bisherigen Zyklen formuliert sind, auf längere Sicht ihre Gültigkeit verlieren werden.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung
2. Die Sonnenaktivität
 - 2.1 Definition
 - 2.2 Auswirkungen
 - 2.3 Maßzahlen
 - 2.4 Periodizitäten
 - 2.4.1 Der 11-jährige Zyklus
 - 2.4.2 Der 80-jährige Zyklus
 - 2.4.3 Langer Zyklus
3. Verbesserungsversuche der Vorhersage
 - 3.1 Vorüberlegungen
 - 3.2 Vorgehensweise
 - 3.3 Erste Ergebnisse
 - 3.4 Hinweise auf den langen Zyklus
 - 3.4.1 Asymmetrieänderung
 - 3.4.2 Änderung der Maximumshöhen
 - 3.5 Rekonstruktionsversuch des Graphen A_1/φ_1
 - 3.6 Vorhersagemöglichkeit mit dem Graphen
4. Zusammenfassung
5. Literatur

1. Einleitung

In der vorliegenden Arbeit werden zunächst bereits bekannte Periodizitäten der Sonnenaktivität dargestellt; aus Platzgründen mußte ich die Ausführungen an einigen Stellen kürzen, es sei hier auf entsprechende Literatur verwiesen. Im zweiten Teil sind meine Versuche beschrieben, mit Hilfe der Analyse von Sonnenfleckenrelativzahlen die Vorhersagemöglichkeiten zu verbessern. Die Ergebnisse weisen auf einen langen Zyklus hin, der zwar bereits teilweise nachgewiesen, aber noch nicht genau untersucht wurde. Mit ihm ist es möglich, Vorhersagen über Asymmetrie und Maximumhöhe kommender Fleckenzyklen zu machen.

2. Die Sonnenaktivität

2.1 Definition

Die Strahlungsenergie der Sonne beträgt $3,84 \cdot 10^{23}$ kWh, wovon aber nur ein winziger Bruchteil die Erde trifft. Der Hauptteil besteht aus Licht- und Wärmestrahlung, welche nur geringe Schwankungen zeigt. Die ebenfalls von der Sonne ausgehende unsichtbare Wellen- und Teilchenstrahlung variiert dagegen viel stärker und ist eng mit Phänomenen im sichtbaren Licht verknüpft: Fleckengruppen, Fackelgebiete, Protuberanzen, Flares, Veränderungen der Koronastruktur. Diese Erscheinungen machen die "Sonnenaktivität" aus und treten in der Regel parallel auf. Sie zeigen die gleiche langfristige Schwankung in ihrer Häufigkeit.

Die auffälligsten Strukturen der Photosphäre sind die Sonnenflecken. Sie erscheinen im Vergleich zur Umgebung als schwarze Punkte oder Kerne (Umbra), die oft von einem helleren Saum (Penumbra) umgeben sind. Die Flecken sind Durchstoßpunkte von aufsteigenden magnetischen Flußröhren; die Flußdichte in den Flecken beträgt ca. 0,3 Tesla. Da innerhalb eines Magnetfelds weniger Energie an die Oberfläche gelangt, geben solche Gebiete auch weniger Energie

in den Raum ab und erscheinen deshalb dunkel. Die Flecken treten oft in Gruppen auf, deren Längenausdehnung bis zu 250.000 km betragen kann.

2.2 Auswirkungen

Die Auswirkungen der Sonnenaktivität auf die Erde sind vielfältig. Durch den aus geladenen Teilchen bestehenden Sonnenwind entstehen z.B. Polarlichter, die Erdatmosphäre kann sich ausdehnen, durch starke Eruptionen kann es zu Störungen im Erdmagnetfeld, im Mittel- und Kurzwellenfunk und sogar zum Zusammenbruch des letzteren kommen.

Eine Beeinflussung der Biosphäre durch die Sonne ist oft vermutet worden; es wurde z.B. versucht, sie an Baumringdicken nachzuweisen, allerdings mit fraglichen Erfolgen. Angebliche Zusammenhänge zwischen Krankheitsepidemien, psychischer Verfassung etc. (/19/) und der Sonnenaktivität sind spekulativ, es dürfte eher einen Zusammenhang zwischen letzterer und der Häufigkeit von Sensationsmeldungen in einigen Zeitungen und Zeitschriften geben. Grundsätzlich ist eine Beeinflussung des Klimas denkbar und auch wahrscheinlich, aber nur in langfristiger Hinsicht.

2.3 Maßzahlen

Die vielfältigen Erscheinungen der Sonnenaktivität lassen es nicht zu, eine alles umfassende "Aktivitätszahl" zu definieren; vielmehr muß eine solche für jedes Phänomen getrennt bestimmt werden. Dies geschieht entweder durch direkte und dadurch objektive Messungen (v.a. bei Strahlung), oder durch Feststellung einer, meist mittels Abzählung und Gewichtung einzelner Größen gewonnener, sogenannten Relativzahl. So ist z.B. die Sonnenfleckenrelativzahl definiert als

$$R_e = (10 \cdot g + f) \cdot k,$$

wobei g die Zahl der sichtbaren Fleckengruppen und f die Zahl der Flecken bedeutet; k stellt einen für jeden Beobachter festzustellenden Korrektionsfaktor dar, der von vielen Bedingungen abhängig ist. Dies zeigt, daß solche

Relativzahlen "subjektiver" als die von Geräten gemessene Größen sind; trotzdem wird gerade die Fleckenrelativzahl wegen ihrer einfachen Definition häufig von Beobachtern verwendet.

Sie wurde 1848 von dem Züricher Astronomen Rudolf Wolf eingeführt; er beobachtete selbst die Sonne und sammelte die Beobachtungen anderer Sternwarten zur Auswertung. Es gelang ihm, aus alten Beobachtungen die Relativzahlen in früherer Zeit zu rekonstruieren: Monatsmittel sind ab 1749, Jahresmittel ab 1700 bekannt; aus den wenigen Beobachtungen vor 1700 versuchte Wolf, die Zeiten der Zyklenextrema zu bestimmen. Die Unsicherheit der alten Daten ist zum Teil recht groß. Die Züricher Beobachtungsreihe wird bis heute fortgesetzt und deckt mit 240 Jahren einen beachtlichen Zeitraum ab (allerdings werden die "offiziellen" Relativzahlen seit 1981 vom SIDC in Belgien ermittelt). Aus diesem Grund wird sie häufig in statistischen Untersuchungen verwendet und bildet auch die Grundlage dieser Arbeit.

2.4 Periodizitäten

Die im Folgenden dargestellten Perioden und Gesetze gelten eigentlich nur für Sonnenflecken; da diese ja aber nur Ausdruck einer erhöhten Sonnenaktivität sind, dürfte sich Ähnliches auch bei anderen Erscheinungsformen derselben ergeben.

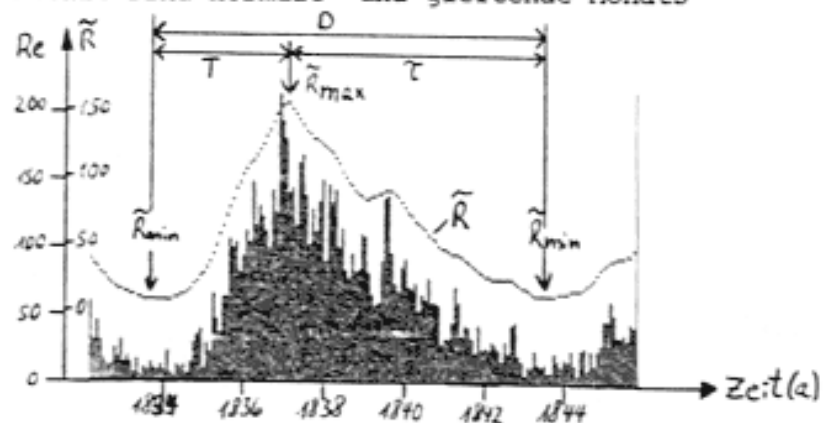
Seit der Entdeckung des wichtigsten (11-jährigen) Fleckenzklus sind viele Versuche unternommen worden, weitere periodische Schwankungen nachzuweisen. ^{Sie} Diese sind zwar aufgrund des menschlichen Dranges, Ordnung zu schaffen und Vorhersagen treffen zu können verständlich, könnten aber durchaus vergeblich sein (s. 3.1)! Die gefundenen Dauern lassen sich in langperiodische (25 bis 2000 Jahre), mittlere (7-25 J.) und kurzperiodische (unter 7 Jahre) Schwankungen einteilen. Letztere sind meist zwangsläufige Ergebnisse umstrittener Fourier-Analysen oder auf ausgeprägte Aktivitätsgebiete zurückzuführen, die infolge der Sonnenrotation eine entsprechende Periode vortäuschen (Leuchtturmeffekt). Die Schwankungen mittlerer Dauer stehen meist mit dem 11-jähr-

igen Fleckenzklus in Zusammenhang; die langfristigen mit Änderungen der Zyklengestalt, sie wurden aber auch mit Kometenhäufigkeiten, Baumringdicken, Polarlichtern, Klimaveränderungen etc. in Zusammenhang gebracht. Die Ablagerungen eines australischen präkambrischen Sees, ließen vor wenigen Jahren einen Zusammenhang mit der Sonnenaktivität vermuten ("Elatina-Zyklus"!)). Inzwischen wurden jedoch andere Erklärungsmöglichkeiten gefunden (s./10/). Insgesamt werden in /14/ ca. 100 verschiedene Perioden aufgeführt, die angeblich gefunden wurden.

2.4.1 Der 11-jährige Zyklus

In den Jahren 1610/11 wurden von Galilei, Harriot, Fabricius und Scheiner mit dem gerade erfundenen Fernrohr erste Beobachtungen der Sonnenflecken gemacht. Nachdem das Interesse auf diesem Gebiet vorübergehend erlahmt war, entdeckte erst 1843 Samuel H. Schwabe mit dem 11-jährigen Fleckenzklus die fundamentale Periode der Sonnenaktivität. Die daraufhin von Wolf rekonstruierten Daten zeigten, daß sie mindestens seit 1700 bestand. Er numerierte die Zyklen, wobei er mit dem Zyklus begann, der sein Maximum 1761 hatte. Ein typischer Zyklus ist Nr. 8 (dargestellt sind normale und gleitende Monatsmittel (s. 3.2)).

Abb.1: Wesentliche Merkmale der Sonnenfleckenzyklen



Die wichtigsten Merkmale eines Zyklus sind die Höhe des Maximums \tilde{R}_{max} , die Anstiegszeit T und die Abstiegszeit τ . Als Asymmetrie des Zyklus wird die Größe $a = 1 - \frac{T}{\tau}$ bezeichnet. Die Dauer D des Zyklus ist die Zeit zwischen den Minima, in welcher auch das Maximum liegt.

In Minimumszeiten kann beobachtet werden, daß Fleckengruppen in getrennten Zonen beiderseits des Äquators auftreten. Die Gruppen in Äquatornähe gehören noch zum auslaufenden Zyklus, während die Zone in hohen heliographischen Breiten zum gerade beginnenden Zyklus gehört; sie verlagert sich, genau wie die Vorgängerzone, im Laufe eines Zyklus immer näher zum Äquator (Spörer'sches Gesetz). Aus diesem Grund ist eine genaue Bestimmung von Beginn und Ende eines Zyklus nicht möglich, es werden meist die Minimumszeiten dazu verwendet.

Häufig wird die Zeit zwischen Maximum und dem Zeitpunkt, zu dem die gleitenden Mittel den Wert 7,5 erreichen, als Abstiegszeit θ definiert. Diese steht zwar mit \tilde{R}_{\max} in Beziehung (im Gegensatz zu τ), ich sehe An- und Abstiegszeit aber als "gleichberechtigt" an, genauso gut könnte der Zyklusbeginn ab $R = 3,14$ definiert werden.

Es ist nun so, daß die Zyklen nicht gleichförmig ablaufen; sämtliche Merkmale variieren in einem mehr oder weniger großen Bereich. Trotzdem haben die bisherigen Zyklen eines gemeinsam: Die Maximumhöhe hängt eng mit dem restlichen Verlauf eines Zyklus zusammen. 1935 fand Max Waldmeier dazu fünf Gesetze; deren wesentlicher Inhalt ist: "Je höher das Maximum, desto kürzer die Anstiegszeit". Mit Hilfe von hieraus abgeleiteten Gleichungen ist es möglich, relativ bald nach Beginn eines Zyklus' dessen Maximumhöhe und -zeitpunkt vorherzusagen (s. /1/).

Die Ursache des 11-jährigen Zyklus wird in der differentiellen Rotation der Sonne gesehen: Durch die schnellere Bewegung des Sonnenäquators werden die im Plasma "eingefrorenen" Magnetfeldlinien deformiert und im Laufe der Zeit um die Sonne gewickelt. Nach dem Maximum bricht dieses Feld zusammen und ein neues (mit umgekehrter Polarität) wird aufgebaut; somit dauert der magnetische Zyklus 22 Jahre. (s. /4/, S. 175f.)

2.4.2 Der 80-jährige Zyklus

Der 11-jährigen Periode ist ein ca. 80-jähriger Zyklus überlagert, der sich in der Änderung der Maximumhöhen und anderer Eigenschaften ausdrückt. Er wurde von Wolfgang Gleissberg nachgewiesen und kann für langfristige Prognosen benutzt werden; allerdings fügen sich die letzten Fleckenzyklen scheinbar nicht in die Vorhersage ein, da die Maximumhöhen wieder sinken müßten.

Nach /8/ konnte der 80-j. Zyklus zurück bis 390 n.Chr. nachgewiesen werden. (Zum 80-jährigen Zyklus s. auch /6/ und /7/, S. 36ff.)

2.4.3 Langer Zyklus

Ein langer Zyklus von 900 Jahren bestimmt nach /9/ die Variationsbreite der Dauer der 11-jährigen Zyklen (von Minimum zu Minimum). Henkel benutzte zu einem wesentlichen Teil die "Schöve'schen Daten" (s. 3.4).

3. Verbesserungsversuche der Vorhersagen

3.1 Vorüberlegungen

Der Anstoß zu meiner Untersuchung kam, als ich vor einiger Zeit die faszinierenden Möglichkeiten der Fourieranalyse erkannte. Außerdem hatte ich gelesen, daß mit ihrer Hilfe bereits versucht wurde, die bisherigen Fleckenzyklen im Ganzen zu analysieren (s. Hinweise in /13/) und so als Überlagerung mehrerer Sinuswellen darzustellen (Superpositionhypothese). Nach Waldmeier sind die Zyklen aber unabhängig voneinander, so daß sie nur aufeinanderfolgende Ausbrüche der Sonnenaktivität darstellen (Eruptionshypothese) und nicht vorhersagbar sind. Hierzu gehören auch neueste Untersuchungen, in denen die Sonnenfleckentwicklung als chaotisches System erklärt wird (/18/). Für beide Hypothesen gibt es Argumente, wobei die Fourieranalyse letztlich keine überzeugenden Ergebnisse geliefert hat. Gegen die alleinige

Gültigkeit der Eruptionshypothese spricht aber z.B. die Existenz des 80-jährigen Zyklus.

Meine ursprüngliche Idee war nun, zwar jeden Zyklus für sich zu betrachten, ihn aber doch durch die Überlagerung periodischer Vorgänge darzustellen. Dazu wollte ich jeden Zyklus (von Minimum zu Minimum) getrennt einer Fourieranalyse unterziehen. Mit der Annahme, es gäbe nur den gerade untersuchten Zyklus, wäre eine Vorausberechnung der Fleckenrelativzahl kein Problem. Dies ist natürlich nicht der Fall, aber das unterschiedliche Aussehen der Zyklen müßte sich in einer Änderung der Parameter der Harmonischen zeigen. Ich wollte nun sehen, ob es in der zeitlichen Entwicklung dieser Parameter eine Regelmäßigkeit gibt, die ein Abschätzen und damit eine Vorhersage des nächsten Zyklusses erlaubt.

3.2 Vorgehensweise

Das Thema dieser Arbeit ist recht theoretisch, da es fast ausschließlich auf bereits vorhandenen Daten, Fakten, Zahlen etc. aufbaut. Mein Arbeitsmaterial bestand folglich aus einer Menge Papier und einem Computer, mit dem ich die Daten auswertete. Dazu mußte zunächst das "Rohmaterial", d.h. die 2.880 Monatsmittel der Sonnenfleckenrelativzahlen der letzten 240 Jahre, eingegeben und für die Auswertungsprogramme aufbereitet werden (auf Verwendung der ca. 70.000 Tagesrelativzahlen zur Untersuchung kurzfristiger Prognosemöglichkeiten habe ich verzichtet ...). Da die zufälligen Schwankungen der Monatsmittel eine genaue Bestimmung der Zyklusextrema nicht zulassen, mußte ich zuerst ein Programm entwickeln, das sie "glättete", also nur die langfristigen Tendenzen herausstellte. Als Glättungsmethode wählte ich die "P-Mittelung" (s. /12/), bei der die Gewichte von Nachbarmonaten mit dem Polynom $(1 - x^2)^3$ bestimmt werden; als Mittelungszeitraum wählte ich 17 Monate (= 19 Sonnenrotationen, hat sich bewährt). Die Zeiten der Extrema wurden automatisch bestimmt und die geglätteten Mittel der Zyklen von einem modifizierten Programm zur Fourieranalyse aus /15/ weiterverarbeitet.

Eine Fourieranalyse der Monatsmittel ohne P-Mittelung wäre nicht möglich gewesen, da Beginn und Ende des Zeitraums wegen fehlender Minimabestimmung nicht bekannt gewesen wären.

3.3 Erste Ergebnisse

Ein Vergleich der ermittelten Extremzeiten und -höhen mit den in /1/ gegebenen ergab zunächst eine schlechte Übereinstimmung, bis ich feststellte, daß sich in meinem Programm zur P17-Mittelung ein Fehler eingeschlichen hatte. Nach dessen Beseitigung lagen als erstes Ergebnis die Amplituden und Phasenverschiebungen der Harmonischen für jeden Zyklus vor, die ich mit A_n und φ_n bezeichnete (n = Nummer der Harmonischen eines bel. Zyklus).

Die graphische Darstellung der Parameteränderung von Zyklus zu Zyklus zeigte keine neuen Regelmäßigkeiten, nur die Amplitude der Grundschiwingung (A_1) zeigte den 80-jährigen Zyklus. Dies war auch aufgrund der linearen Beziehung zwischen R_{\max} und A_1 zu erwarten:

$$R_{\max} = 2,236 \cdot A_1 + 8,191, \quad \text{Korrelation } r = 0,969 \quad (1)$$

Ich suchte mit Regressionsprogrammen nach weiteren Zusammenhängen verschiedener Zyklenparameter und Harmonischen und fand:

$$T = -0,549 \cdot (A_1 \cdot \sin(\varphi_1 - 243)) + 70,676, \quad r = -0,787 \quad (2)$$

$$T = -0,443 \cdot \varphi_1 + 179,492, \quad r = -0,672 \quad (3)$$

$$\tau = 0,595 \cdot \varphi_1 - 92,508, \quad r = 0,716 \quad (4)$$

$$A_2 = 0,311 \cdot A_1 - 3,824, \quad r = 0,737 \quad (5)$$

Aus (3) und (4) ist ersichtlich, daß T und τ in Beziehung zu φ_1 stehen; also müßte auch a (s. 2.4.1) mit φ_1 korreliert sein:

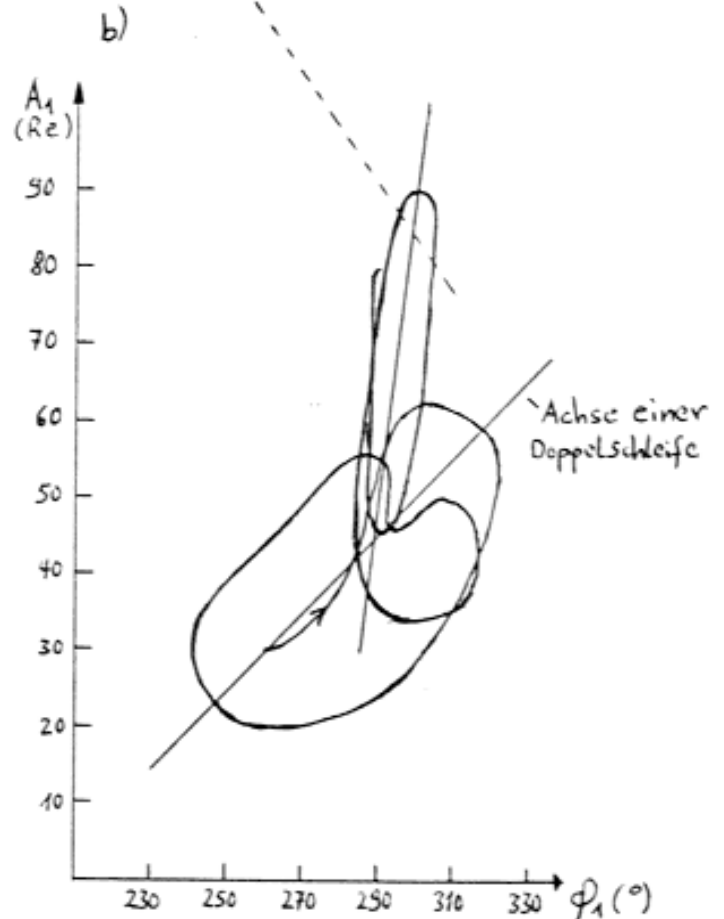
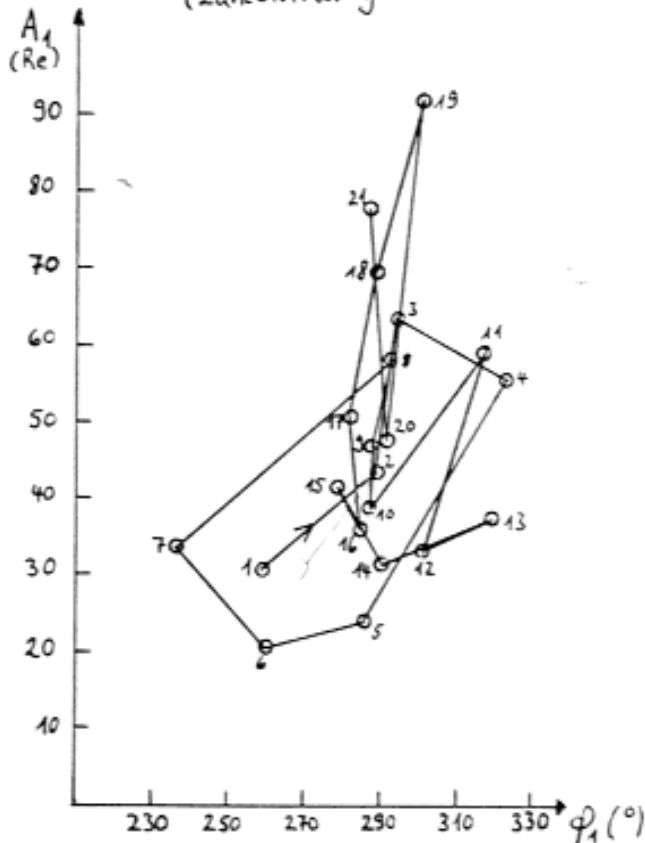
$$a = 0,01162 \cdot \varphi_1 - 3,03868, \quad r = 0,784 \quad (6)$$

A_1 entspricht also R_{\max} , φ_1 der Asymmetrie a .

Vor einem Jahr kam ich dann auf die Idee, A_1 und φ_1 in ein Koordinatensystem einzutragen und aufeinanderfolgende Punkte zu verbinden, so daß die zeitliche Entwicklung beider Parameter abzulesen war. Es zeigte sich folgendes Bild:

Abb. 2: Graph A_1/φ_1

a) (Zahl: Nr. d. Zyklus)



In Abb. 2a) fallen zunächst 3 Dinge auf (zur Verdeutlichung in Abb. 2b) schematisiert):

- Ließe man einen Punkt von Nr. 1 bis 21 laufen, bewegte er sich fast immer im Uhrzeigersinn.
- Die Bewegung ergibt verschiedene "Schleifen", die ineinander übergehen (1-7; 7-15; 15-20/21). Zwei Schleifen gehören vermutlich jeweils zusammen (1-15 und 15-29?) und bilden so einen Zyklus von ca. 160 Jahren.
- Es gibt zwei unterscheidbare Achsenrichtungen, in denen die Schleifen ablaufen (Verbindungsline z.B. 7-8 bzw. 19-20).

Dieses Ergebnis überraschte mich; es kamen mir sofort einige Gedanken und Fragen: Läßt diese Regelmäßigkeit eine Abschätzung der Parameter für zukünftige Zyklen zu? Offensichtlich drückt sich der 80-jährige Zyklus in den Schleifen aus, und zwar sowohl in der Amplitude (Z.höhe) als auch in der Phasenverschiebung (Asymmetrie). Die derzeit hohen Zyklen, die den 80-jährigen Zyklus in Frage stellen, wären damit zu erklären, daß der 80-j. Zyklus im Moment einfach auf einem höheren Niveau abläuft. Setzt man die Achsendrehung fort, kommt man zu einer in sich geschlossenen Figur, was die Existenz eines noch längeren Zyklusses vermuten ließe. Sollte dies der 900-jährige Zyklus sein? Er wäre dann nachweisbar nur aus den Daten ab 1749 (im Gegensatz zu /9/). Denkt man sich die Figur näherungsweise als nahezu regelmäßiges Vieleck, hätte die ^{Doppel-}Schleife an einer Seite eine Dauer von ca. dreizehn 11-j. Zyklen; bei einer mittleren Länge von 11,14 Jahren also ca. 145 Jahre. Dies ist ungefähr der sechste Teil von 900 Jahren, also müßte das Vieleck sechs Seiten haben. Die Figur hätte alle 450 Jahre Extrema: Maxima um die Jahre 2150, 1250, 350; Minima um 1700, 800. In diesen Zeiten wären die Maxima der Fleckenzyklen besonders hoch (mit $A_1 = 110$ und (1): \tilde{R}_{\max} ca. 250) bzw. niedrig. Sollten das Minimum um 1700 und das Maximum 1250 der Grund für die damaligen Klimaanomalien ("Kleine Eiszeit" bzw. "mittelalterl. Optimum") gewesen sein?

Ich stellte also zunächst die Frage der Vorhersage zurück und versuchte, mehr über den langen Zyklus herauszufinden.

3.4 Hinweise auf den langen Zyklus

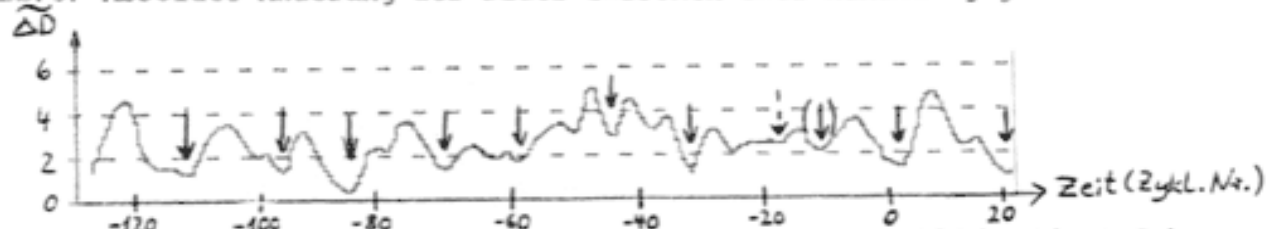
3.4.1 Asymmetrieänderung

Als nächstes suchte ich nach Literatur mit Hinweisen auf den langen Zyklus. Ich stellte fest, daß die langfristige Asymmetrieänderung bereits von Gleissberg (/6/) bemerkt wurde. Später stieß ich auf die "Schove'schen Daten": In den 50er Jahren versuchte D.J. Schove, aus alten Berichten v.a. von Sonnenflecken- und Polarlichtbeobachtungen die Maxima, Minima und unge-

fähre Stärke der 11-jährigen Zyklen bis ins Jahr 648 v. Chr. zu bestimmen (/16/, /17/). Aufgrund der Einbeziehung von Polarlichtern ist die Arbeit zwar teilweise umstritten, aber doch zur Grundlage von anderen Untersuchungen geworden (s. z.B. 2.4.3!).

Ich stellte zunächst folgende Überlegung an: Sähen alle Fleckenzyklen gleich aus (egal wie asymmetrisch), wäre die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Maxima gleich der mittleren Dauer von 11,14 Jahren. Diese Zeit würde aber ansteigen, wenn die Asymmetrie des folgenden Zyklus abnähme, und umgekehrt. Eine Abnahme von ϕ_1 bedeutet eine Abnahme der Asymmetrie (s. Gl. (6)). Große und häufige Änderungen von ϕ_1 (große Sprünge im Graphen A_1/ϕ_1) bewirken also große Änderungen der Dauer zwischen zwei Maxima (diese Dauer schwankt um den Mittelwert von 11 Jahren; in diesen Fällen ist die Schwankungsbreite also besonders groß). Da die Schleifen des Graphen mit großen Sprüngen verbunden sind und die Zeit zwischen ihnen offenbar mit geringen (Nr. 12-17), müßten sie anhand der Schove-Daten nachweisbar sein. Ich fütterte also den Computer mit den entsprechenden Daten ab dem Jahr 300 (davor schienen sie mir zu unsicher) und ließ die absolute Änderung der Dauer zwischen zwei Maxima (von einem Zyklus zum nächsten) berechnen; diese Daten glättete ich anschließend mit der P7-Methode (s. 3.2):

Abb. 3: Absolute Änderung der Dauer zwischen zwei Maxima (geglättet)



Mit dieser Vorgehensweise vermied ich ein Problem: In /16/ bestimmt Schove die meisten Maxima zwar nach historischen Berichten über o.g. Erscheinungen, die Minima aber teilweise aus den Maxima durch Regeln, die auf den Waldmeier'schen Gesetzen beruhen (je stärker das Maximum, desto näher liegen Maximum und Minimum zusammen). Es ist jedoch keineswegs sicher, ob dieses Gesetz schon immer so galt. In Abb. 3 sind deutliche Minima der ΔD -Werte markiert; zwischen ihnen liegt meist jeweils ein kleineres. Eine Autokorrelation der Daten in Abb. 3 liefert Zyklen der Dauer von 14, 28 und 86


elfj. Zyklen also 156, 312 und 960 Jahre; im ersten Wert zeigen sich offenbar die Doppelschleifen (s. 3.3), der letzte ist die Gesamtdauer des langen Zyklus.

3.4.2 Änderung der Maximumshöhen

Der Graph A_1 / φ_1 deutet darauf hin, daß sich der lange Zyklus nicht nur in der Asymmetrieänderung ausdrückt, sondern auch in unterschiedlichen Maximumshöhen der Fleckenzyklen. Um 1250 war demnach die Sonnenaktivität alle 11 Jahre besonders hoch. Dies bedeutet, daß entweder viele Fleckengruppen zu sehen waren, oder einige Gruppen riesige Ausmaße erreichten (oder beides).

Die in /20/ zu findende Auflistung historischer Sonnenfleckensbeobachtungen mit bloßem Auge (vor allem aus dem damals hochentwickelten China, wo das Sonnenlicht wohl häufiger durch Dunst oder Staub abgeschwächt wurde) enthält hierüber sehr interessante Informationen. Die beobachteten Flecken lassen sich nach der Bezeichnung in drei Klassen einteilen:

- a) ein oder mehrere Flecken
- b) Eierform, Äpfel, Pfirsiche, Pflaumen, Datteln
- c) Vogelform, "dreibeiniger Vogel" oder (nach /4/, S.65) dreizehige Vogelkralle, fliegende Schwalben, "wie ein Mensch"

Flecken der Klasse a) waren in Wirklichkeit natürlich riesige H-Flecken oder F-Gruppen auf der Sonne, wie sie auch heute in Maximumsjahren zu beobachten sind. Um Pfirsich- und Eierformen von diesen diffusen kleinen Punkten zu unterscheiden, müssen die Gruppen jedoch schon große Ausdehnungen erreichen; solche Flecken sind heute recht selten. Klasse c) faßt strukturierte Flecken oder -gruppen zusammen; es handelte sich dabei um extrem große Einzelgruppen oder um einen Komplex von Gruppen, der wie ein Fleck erschien. Auffallend ist, daß die verschiedenen Bezeichnungen zu einer Form passen, die ungefähr so aussehen könnte: 

Durch eigene Versuche mit Sonnenscheibenmodellen habe ich festgestellt, daß die Länge eines solchen Komplexes mindestens 350.000 km betragen muß, um mit

bloßem Auge als strukturiert erkannt zu werden; die Flächen erreichen dann Größenordnungen von bis zu 20.000 Mio.stel Hemisphären (2% der Sonnenhalbkugel!). Die entsprechenden Spitzenwerte der Fleckenrelativzahl lägen dabei um 600-800, Maximumhöhen der Zyklen von 250 (s. 3.3) wären also durchaus vorstellbar.

Die historischen Beobachtungen zeigen nun eine Häufung von Flecken im Zeitraum um 300 und zwischen 1070 und 1370. Speziell Flecken der Klasse c) traten nur zu diesen Zeiten auf. Es sind aber gerade die Zeiten, die für Maxima des Graphen A_1/ϕ_1 in Frage kommen. Die Beobachtungslücke zwischen 1277 und 1369, in der kein einziger Fleck von China aus beobachtet wurde, bereitete mir zunächst einiges Kopfzerbrechen, bis ich in einem Geschichtsatlas fündig wurde: 1268-1279 eroberte der Mongolenherrscher Kublai Khan (ein Enkel Dschingis Khan's) das Sung-Reich (im Süden). Die chinesische Kultur blühte erst 1368 wieder auf, nachdem der letzte Mongolenkaiser vertrieben war. Es ist also höchst wahrscheinlich, daß die Beobachtungslücke nicht real ist, sondern durch politische Repressionen verursacht wurde. Andere fleckenfreie Perioden lassen sich aus der chinesischen Geschichte nicht erklären und dürften daher tatsächlich durch geringe Sonnenaktivität begründet sein.

Beim Durchsehen weiterer Literatur stellte ich fest, daß bereits J.A. Eddy in /2/ auf die Häufung der Flecken hindeutete. In seinem Artikel wies er außerdem die Existenz des Maunder-Minimums nach. Dieses war eine Zeit sehr geringer Sonnenaktivität zwischen 1650 und 1700, in der fast keine Flecken beobachtet wurden. Daß der elfj. Zyklus gänzlich aussetzte, denke ich aber nicht; es dürfte nur der Graph A_1/ϕ_1 entsprechend tief verlaufen sein.

Eddy stützt sich in /2/ und /3/ auch auf Untersuchungen des C14-Gehalts in alten Baumringen. Ist er geringer als aufgrund der Theorie zu erwarten wäre, weist dies auf erhöhte Sonnenaktivität hin, da diese die Erde vermehrt vor den kosmischen Strahlen abschirmt, welche für die Bildung des C14 in der höheren Atmosphäre verantwortlich sind (C14 wird dann via Photosynthese fixiert). Die Daten zeigen neben dem Maunder-Minimum und dem mittelalter-

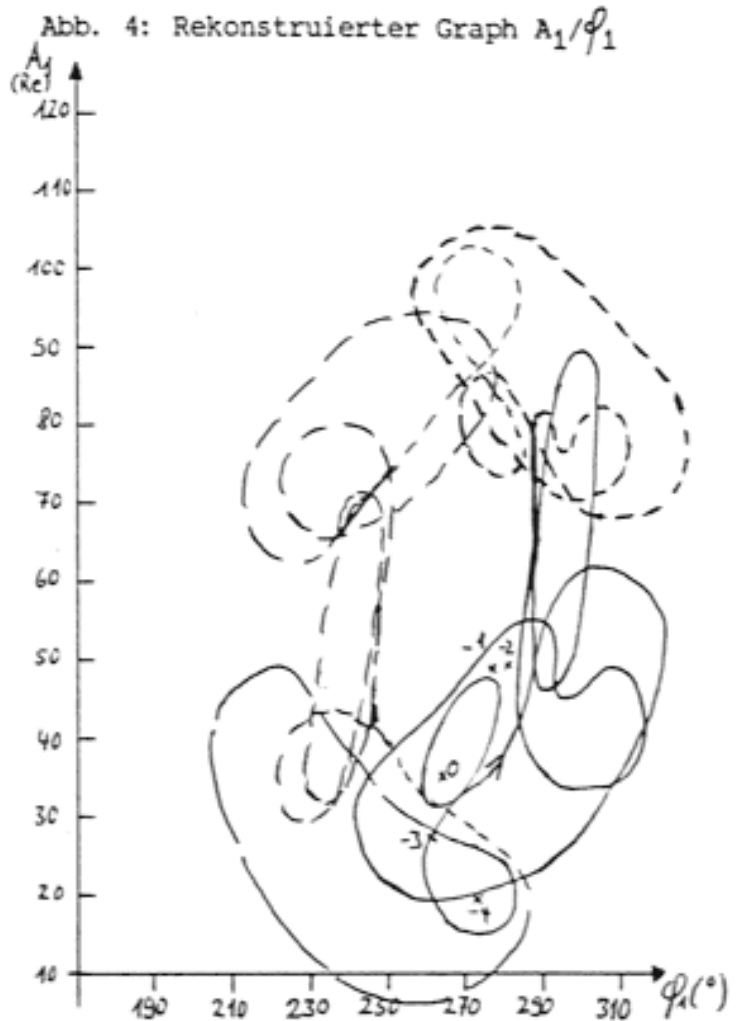
lichen Maximum auch noch mehrere andere Maxima und Minima in historischer Zeit, die an der Beständigkeit des langen Zyklus zweifeln lassen könnten; ich weiß aber nicht, wie zuverlässig und genau die C14-Daten sind. Sicher scheint aber das Spörer-Minimum um 1500 zu sein.

Ein weiterer Hinweis auf erhöhte Sonnenaktivität im Mittelalter und niedrigere um 1685 sind die bereits erwähnten Warm- bzw. Kaltzeiten. Da die Sonne bei erhöhter Aktivität offenbar heller scheint (trotz Flecken!, s. /11/) und die Erde so mehr Energie erhält, könnte eine Häufung hoher Maxima durchaus zu einer leichten Zunahme der Durchschnittstemperatur über Jahrzehnte hinweg führen, obwohl die auftretenden Schwankungen der Strahlung sehr klein sind (ca. 0,12% während z.B. des Zyklus 21). Entsprechendes gilt auch umgekehrt.

3.5 Rekonstruktionsversuch des Graphen A_1/ϕ_1

Nachdem ich sicher war, daß sich der 960-j. Zyklus in A_1 und ϕ_1 zeigt (die Regelmäßigkeit zeigt sich nicht in der graphischen Kombination der Entsprechungen \tilde{R}_{\max} und a), wollte ich wieder mein ursprüngliches Ziel, die Vorhersage der Fleckenzyklen, ins Auge fassen. Mir war inzwischen klar, daß eine allzu genaue Prognose niemals möglich sein würde, da der Aktivitätsverlauf von zufälligen Schwankungen überlagert wird. Es ist nur möglich, aus den Regelmäßigkeiten im bisherigen Verlauf des Graphen A_1/ϕ_1 auf sein zukünftiges Verhalten zu schließen und damit Aussagen über die wichtigsten Parameter der Zyklen zu machen. Der grundsätzliche, 960-jährige Kreislauf scheint festzustehen; er ergibt sich aus den Überlegungen in Abschnitt 3.4. Ebenfalls sehr wahrscheinlich ist, daß die Doppelschleifen von ca. 160 Jahren Länge auftreten (s. 3.3, 3.4.1), also 6 aufeinanderfolgende in 960 Jahren. Der genaue Verlauf der Schleifen läßt sich, bis auf die Bewegung im Uhrzeigersinn, nur abschätzen und stellt damit eine Unsicherheit dar, die erst nach Ablauf der nächsten Zyklen geklärt werden kann. Ich habe trotzdem versucht, den Graphen zu rekonstruieren. Dabei bezog ich noch Daten der Zyklen -4 bis 0 ein; eine Fourieranalyse der Jahresrelativzahlmittel anderer

Zyklen ergab, daß die berechneten ersten Harmonischen nur wenig von denen abwichen, die aus den P17-Monatsmitteln bestimmt wurden, so daß eine Verwendung der Jahresmittel von 1700 bis 1748 möglich schien. Aus den An- und Abstiegszeiten der Zyklen -12 bis -5 konnte ich auf die φ_1 -Werte schließen; die Amplituden schätzte ich nach der Abb. in /18/, S.82 ab. Ich nahm dabei an, daß die geringen Jahresrelativzahlen zwischen 1600 und 1710 nicht nur auf das Maunder-Minimum zurückzuführen sind, sondern auch auf eine geringere Aufmerksamkeit der Beobachter. Die Jahresrelativzahlen scheinen nach der o.g. Abb. zwischen 1645 und 1670 besonders niedrig gewesen zu sein (Zyklen -9 und -8). Der restliche Verlauf des Graphen (gestrichelt) kann nicht genau bestimmt werden, er soll nur qualitativ angedeutet werden. Vielleicht könnte hier eine genauere Untersuchung der Abb. 3 weiterführen um eine Formel zur Berechnung des Graphen zu entwickeln.



3.6 Vorhersagemöglichkeit mit dem Graphen

Mit der gefundenen Regelmäßigkeit lassen sich nun Vorhersagen für kommende Zyklen machen.

Grundsätzlich wird der Graph A_1/φ_1 noch steigen; da φ_1 im Laufe der nächsten 300 Jahre sinken wird, werden die Zyklen also a) sehr hoch sein und b) immer längere Anstiegszeiten haben. Dies bedeutet, daß die fundamentalen Waldmeier'schen Gesetze ihre Gültigkeit verlieren.

Für die nächsten 4-5 Zyklen läßt sich sagen, daß die ausgeglichenen Maximumrelativzahlen nicht mehr unter ca. 110 fallen können. Die Asymmetrie wird noch etwas zunehmen und mit Nr. 25 oder 26 das vorläufige Maximum erreicht haben.

Anhand der Zyklen Nr. 22 und 23 soll die Vorgehensweise bei einer genaueren Vorhersage gezeigt werden. Es ist anzumerken, daß ich für Nr. 22 bis vor Kurzem A_1 zu 85 und ϕ_1 zu 280 annahm. Die Beobachtungen zeigen aber, daß der Graph nicht nach links oben, sondern nach rechts unten abknickt; also entspricht der Sprung von 20-21 dem von 7-8 und der von 21-22 dem von 8 nach 9 oder 10.

	<u>Nr. 22</u>	<u>Nr. 23</u>
A_1/ϕ_1 (geschätzt)	70/297	80/303
\tilde{R}_{\max} nach (1)	165 ± 5	187 ± 6
a nach (6)	$0,412 \pm 0,089$	$0,482 \pm 0,104$
T nach (2)	40 ± 8 Monate	33 ± 7 Monate
τ mit a und T	68 "	64 "
Dauer D ($\tau + T$)	128 "	97 "

Bei den letzten beiden Größen dürfte der Fehler recht groß sein, da bereits a und T eine mehr oder weniger große Abweichung haben können. Insgesamt dürfte die Genauigkeit der Werte auch nicht sehr groß sein, da die Korrelationen in den Gleichungen (2) bis (6) nicht gerade optimal sind; hier wären Verbesserungen nötig. Auch läßt sich der genauere Verlauf des Zyklus erst berechnen, wenn eine Möglichkeit gefunden werden kann, weitere Parameter der Harmonischen zu bestimmen; für ϕ_2 habe ich erste Versuche mit Hilfe der Phasendifferenz zwischen ϕ_1 und ϕ_2 gemacht.

4. Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, daß die durch die Fourieranalyse einzelner Sonnenfleckenzyklen gewonnen Parameter der Grundschwingung (1. Harmonische) eine Regelmäßigkeit in ihrer zeitlichen Entwicklung zeigen, wenn man sie graphisch gegeneinander aufträgt. Die Form des Graphen läßt auf einen langen Zyklus schließen, der sich in einer Formänderung der 11-jährigen Zyklen ausdrückt. Hinweise auf diesen langen Zyklus wurden zusammengetragen und seine Länge zu 960 Jahren bestimmt. Neben der Rekonstruktion des Graphen $A_1/1$ wurden Möglichkeiten der langfristigen Prognose der 11-j. Zyklen aufgezeigt, die aber nicht in der ursprünglich erhofften Genauigkeit machbar ist. Eine Formel zur Berechnung von A_1 und 1 in Abhängigkeit von der Zeit müßte noch gefunden werden. Auf die aus den Ergebnissen zu folgernde Ungültigkeit der Waldmeier'schen Gesetze ab ungefähr Zyklus Nr. 27 wurde hingewiesen.

Die Extrema des Graphen stimmen mit dem mittelalterlichen Maximum und dem Maunder-Minimum überein; das vermutlich ebenfalls existente Spörer-Minimum läßt sich nicht erklären.

An dieser Stelle möchte ich jenen herzlich danken, die mich bei der Beschaffung von Daten und Literatur unterstützt haben: Martin Götz (Pfullingen), Günter Jenner (Wien), Elmar Junker (Bonn), Hans Ulrich Keller (Zürich) und Pietro Zollino (Ditzingen).

5. Literatur:

- /1/ Bendel, U.; Staps, D. (1980): Kurzfristige Sonnenfleckenprognose mit der P17-Mittelung, SONNE Nr. 14, 4, 50-55
- /2/ Eddy, J.A. (1976): The Maunder Minimum, Science, 192, 1189-1202
- /3/ Eddy, J.A. (1977): The Case of the Missing Sunspots, Scient. Amer., 236 No. 5, 80-89
- /4/ Ekrutt, J.W.: Die Sonne, Verlag Gruner + Jahr AG & Co., Hamburg, 1981

- /5/ Giovanelli, R.G.: Geheimnisvolle Sonne, VCH Verlagsges. mbH, Weinheim, 1987
- /6/ Gleissberg, W.: Die Häufigkeit der Sonnenflecken, Akademie-Verlag, Berlin, 1952
- /7/ Gleissberg, W. (1974): Gesetz und Zufall im Ablauf der Sonnentätigkeit, Veröffentlichungen des astron. Inst. d. Univ. Frankfurt (Main), Nr. 52
- /8/ Gleissberg, W. (1975): Gibt es in der Sonnenfleckenhäufigkeit eine 179jährige Wiederholungstendenz?, Veröffentlichungen des astron. Inst. d. Univ. Frankfurt (Main), Nr. 57
- /9/ Henkel, R. (1972): Evidence for an ultra-long cycle of solar activity, Solar Physics 25 498-499
- /10/ Hilbrecht H.; Fischer, D. (1990): Sonnenfleckenzyklen, Mondzyklen?, Sterne und Weltraum 29, 501-505
- /11/ Hüttemeister, S. (1988): Wird die Sonne immer dunkler?, SONNE Nr. 47, 12, 71f.
- /12/ Karkoschka, E. (1979): Neue Relativzahl-Mittelung, SONNE Nr. 9, 33-37
- /13/ Kiral, A. (1961): La méthode d'autocorrélation et les cycles de l'activité solaire, Publications of the Istanbul University Observatory, No. 10
- /14/ Kuklin, G.V. (1975): Cyclical and secular variations of solar activity, IAU-Symposium 1975 (Prag), No. 71
- /15/ Linnemann, P. (1987): Die Darstellung beliebiger Funktionen durch eine Fourierreihe unter Einsatz eines Microcomputers, Praxis der Naturwissenschaften - Physik, 36 S. 2ff.
- /16/ Schove, D.J. (1955): The sunspot cycle, 649 B.C. to A.D. 2000; Journal of Geophysical Research, 60, 127-146
- /17/ Schove, D.J.; Ho, P.Y. (1967): Chinese records of sunspots and aurorae in the fourth century A.D., J. Amer. Orient. Soc., 87, 105-112
- /18/ Shen, M.; Yang, C.-P. (1990): Fractal dimension and prediction of the sunspot number, Chin. Astron. Astrophys.
- /19/ Sigel, F.: Schuld ist die Sonne, Verlag Harri Deutsch Thun, Frankfurt/M 1975
- /20/ Wittmann, A. (1978): The Sunspot Cycle before the Maunder Minimum, Astronomy and Astrophysics, 66, 93-97