

Erklärung für die Erniedrigung der Aktivierungsenergie angebracht zu sein.

Die Ausführung dieser Arbeit wurde durch die Unterstützung des Bundeswirtschaftsministeriums ermöglicht, wofür wir auch an dieser Stelle unseren Dank aussprechen möchten. Unser Dank gilt besonders Herrn Dr. E. WEISMANN für gute Ratschläge beim Aufbau der Ver-

suchsanordnung und für die Überlassung eines Radiometers und ebenso Fräulein R. GRÜNIG für die sorgfältige Durchführung der Permeationsmessungen. Ferner möchten wir Herrn Dr. O. HERRMANN von der Fa. Kalle AG., Wiesbaden, für die Terylenproben und Herrn Dr. B. VON FALKAI, Farbenfabriken Bayer, Dormagen, für die Herstellung des isotaktischen Polypropylens herzlich danken.

Über eine jährliche Variation der Dichte der höchsten Erdatmosphäre

Von H. K. PAETZOLD

Technische Hochschule München

(Z. Naturforsch. 16 a, 50—56 [1961]; eingegangen am 10. Oktober 1960)

Herrn Prof. Dr. W. Hanle zum 60. Geburtstag gewidmet

Die Beobachtung erdnaheer künstlicher Satelliten hat erhebliche Schwankungen ihrer Abbremsung durch die hohe Erdatmosphäre ergeben. Die daraus folgenden Variationen der Luftdichte haben verschiedene Ursachen: solare Wellen- und Korpuskelstrahlung, Wechsel von Tag und Nacht und ein jährlicher Effekt. Dieser hängt vermutlich mit dem Zustand der interplanetaren Materie zusammen und läßt vielleicht auf das Vorhandensein eines interstellaren Windes schließen.

1. Einführung

Für den Aufbau der höchsten Erdatmosphäre ist der Verlauf der Luftdichte mit der Höhe von ausschlaggebender Bedeutung. Schon früher hat der Verfasser darauf hingewiesen, daß die Luftdichte der höchsten Erdatmosphäre am vorteilhaftesten mittels Abbremsung erdnaheer künstlicher Satelliten gemessen werden kann¹. Seit dem Start des ersten Erdsatelliten am 4. Oktober 1957 sind zahlreiche weitere Satelliten nachgefolgt. Ihre Beobachtung hat ein reiches Material über die Luftdichte und ihre Schwankungen der hohen Erdatmosphäre ergeben.

Im allgemeinen gilt die einfache Beziehung²:

$$\frac{dP}{dn} = - (1 + 2 \varepsilon) 3 P \frac{\bar{F}}{M} \oint_{\text{Bahn}} \varrho(h) ds. \quad (1)$$

Dabei bedeuten dP/dn die pro Umlauf beobachtete Abnahme der Umlaufszeit P , \bar{F} den mittleren Querschnitt des Satelliten senkrecht zur Bahntangente, M die Satellitenmasse, $\varrho(h)$ die Luftdichte in der Höhe h und ε die Bahnexzentrizität.

In dem Bahnintegral in Gl. (1) trägt der Höhenbereich in der Umgebung des Perigäums wegen des exponentiellen Abfalles der Luftdichte mit der Höhe den entscheidenden Anteil bei. Es ist daher vorteil-

haft, Gl. (1) umzuschreiben in

$$\frac{dP}{dn} = - (1 + 2 \varepsilon) 3 P \frac{\bar{F}}{M} \varrho(h_{Pe}) 2 \pi (R + h_{Pe}) c(\varepsilon, H') \quad (2)$$

mit dem Erdradius R und der Höhe des Perigäums h_{Pe} . H' bedeutet die Skalenhöhe der Luftdichte, d. h. die Höhenstufe, in der dieselbe auf den e -ten Teil abnimmt. Der Faktor c ändert sich nur langsam mit ε und H' . Falls Satelliten mit verschiedenen Perigäums Höhen beobachtet werden, so kann mit Gl. (1) und (2) durch numerische Approximation die gesuchte Funktion $\varrho(h)$ bestimmt werden. Da sich ferner die Lage des Perigäums wegen der Präzession der Bahnebene und der Drehung der Apsidenlinie laufend verschiebt, kann die Luftdichte in verschiedenen geographischen Breiten, auf der Tag- und Nachthemisphäre usw., bestimmt werden.

Über die nun schon dreijährige Beobachtungszeit zeigten sich beträchtliche Variationen der Luftdichte in Höhen oberhalb von 200 km, so daß die Aufstellung eines einheitlichen Modelles der Hochatmosphäre keinen Sinn mehr hat. Es können mehrere Effekte unterschieden werden, deren Trennung aber nur durch die Beobachtung genügend zahlreicher Satelliten über einen längeren Zeitraum möglich ist.

¹ H. K. PAETZOLD, Tagungsber. Dtsch. Phys. Ges. 63, München 1956.

² H. K. PAETZOLD, Raketentechnik und Raumfahrtforschung 3, 45 [1959].



Die hauptsächlichen Effekte sind:

1. Ein solarer „Welleneffekt“ und verbunden damit eine ausgeprägte Tag – Nacht-Variation.
2. Ein Korpuskeffekt (Magnetische Stürme).
3. Ein jährlicher Effekt.

Daneben sind die meridionalen und jahreszeitlichen Unterschiede nur gering. Nach den amerikanischen Discoverer-Satelliten, deren Bahn bis in 84° geographische Breite führte, ist die Luftdichte in 200 km in polaren Breiten im Sommer um 15% höher als in niederen, während im Winter umgekehrt ein schwaches Gefälle von ca. 10% polwärts gerichtet ist^{2a}. Während nach früheren ionosphärischen Beobachtungen der Welleneffekt und der Korpuskeffekt zu erwarten waren, scheint der jährliche Effekt einige neue Gesichtspunkte aufzuzeigen. Zu seiner Abgrenzung sollen im folgenden die beiden ersten Einflüsse kurz skizziert werden.

2 a. Der solare Welleneffekt

Schon bald zeigte sich, daß wesentliche Schwankungen der Satellitenabbremmung mit der Sonnen-

fleckenzahl einen auffälligen Gleichlauf zeigten³, wie sie Abb. 1 als Beispiel bei Sputnik III (1958, δ_2) nach eigenen Beobachtungen zeigt. Dieser wurde auch mit den Variationen der solaren Radioemission bei 10 cm und 20 cm Wellenlänge gefunden⁴⁻⁶, was selbstverständlich erscheint, da diese sehr eng zur Sonnenfleckenzahl korreliert sind. Andererseits war schon länger bekannt, daß die kurzwellige Strahlung, die die Ionisierung der Ionosphäre verursacht, die engste geophysikalisch jemals beobachtete Korrelation zur Sonnenfleckenzahl aufweist⁷. Ihre Stärke schwankt im Mittel vom Fleckenmaximum zum -Minimum im Verhältnis 16:1. Da bei der Ionisierung immer ein Teil der absorbierten Energie in Wärmeenergie übergeht, sind Temperaturschwankungen in Abhängigkeit von der Sonnentätigkeit ebenfalls zu erwarten. Sie äußern sich gemäß der barometrischen Höhenformel in entsprechende Dichteschwankungen. Die in Abb. 2 durch die Kurve 1 dargestellten Dichteunterschiede entsprechen oberhalb von 250 km Höhe einer Temperaturänderung von ca. 400°K .

Die Satellitenbeobachtungen lassen auch etwas

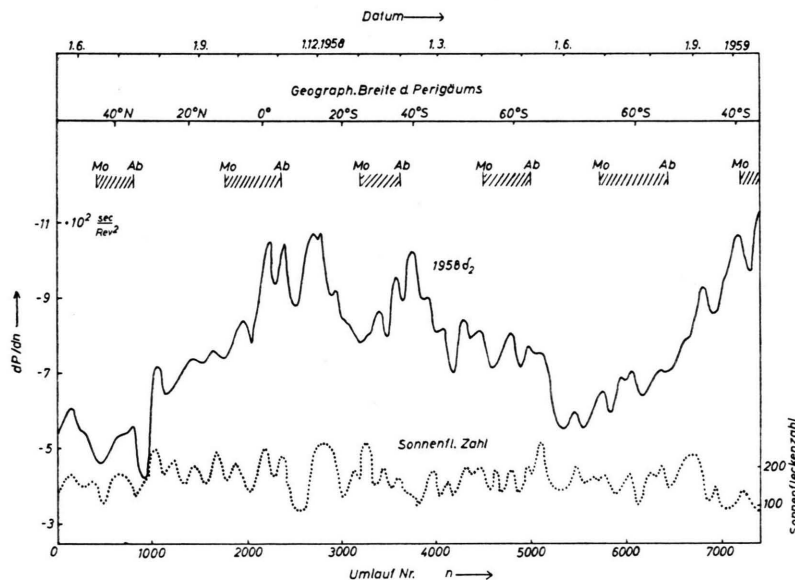


Abb. 1. Abbremmung von Sputnik III. Die schraffierten Bereiche geben die Nachtzeit des Perigäums. Der allgemeine Verlauf der Kurve wird durch den jährlichen Effekt, die Breitenänderung des Perigäums und die Abnahme der Bahnhöhe bestimmt.

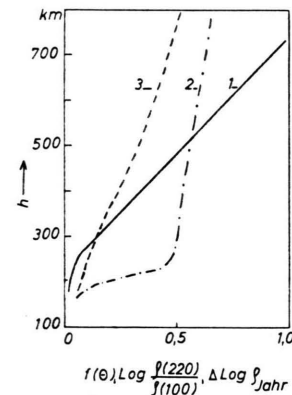


Abb. 2. Höhenabhängigkeit der Tag – Nacht-Variation (1), des Welleneffektes (2) und des jährlichen Effektes (3). $p(100)$ bedeutet die Luftdichte bei einer solaren Radioemission bei 10 cm von $100 \cdot 10^{-22} \text{ W/m}^2 \text{ Hz}$, $\Delta \text{Log } p_{\text{Jahr}}$ ist die maximale jährliche Amplitude.

^{2a} H. K. PAETZOLD, unveröffentlicht.

³ H. K. PAETZOLD u. H. ZSCHÖRNER, Tagungsber. Dtsch. Phys. Ges. 152, Essen 1958.

⁴ W. PRIESTER, Naturwiss. 46, 197 [1959].

⁵ L. G. JACCHIA, Nature, Lond. 183, 327 [1959].

⁶ H. K. PAETZOLD u. H. ZSCHÖRNER, Arbeitsgem. Ionosphäre, Klein-Heubach 1959.

⁷ J. BARTELS, Abhandlg. Preuß. Akad. Wiss. Berlin, Math.-Naturw. Kl. 1941, Nr. 12.

näher auf die kurzwellige solare UV-Strahlung schließen. In Abb. 2, Kurve 2, ist der Logarithmus des Verhältnisses der Luftdichten bei einer Stärke der solaren 10-cm-Strahlung von $220 \cdot 10^{-22}$ und $100 \cdot 10^{-22}$ Watt/m² Hz dargestellt. Danach nehmen die durch den solaren Welleneffekt verursachten Dichteschwankungen zwischen 180 km und 230 km Höhe sehr stark zu, so daß in diesem Höhenbereich die hauptsächlich absorbierende Luftschicht (F_1 -Schicht) gesucht werden muß. Nach neuen UV-Messungen amerikanischer Raketenanstiege⁸ entspricht einer solchen Absorptionshöhe die solare He-II-Linie bei 304 Å, die vornehmlich in den überhitzten Bereichen an der Grenze zwischen Chromosphäre und innere Sonnenkorona ausgesandt wird, wie sie über Flecken und Fackeln auftreten.

Selbstverständlich müssen auch durch Sonnen-eruptionen mit ihrer sehr verstärkten UV-Ausstrahlung entsprechende Dichteschwankungen der hohen Atmosphäre verursacht werden. Doch ist wegen der kurzen Zeit einer Eruption von der Größenordnung einer Stunde bei der jetzigen Beobachtungsgenauigkeit dieser Einfluß nur schwer durch Satellitenbeobachtungen nachzuweisen.

2 b. Der Tag-Nacht-Effekt

Dieser ist eng mit dem ersten solaren Welleneffekt verknüpft. Offensichtlich ist bei fehlender UV-Einstrahlung ein Absinken der Temperatur und damit der Luftdichte zu erwarten, wie er in Abb. 1 bei Sputnik III (220 km) sich andeutet und bei höher fliegenden Satelliten sich verstärkt zeigt^{9, 10}. Der Energieverlust in Höhen oberhalb von 200 km erfolgt hauptsächlich durch molekulare Wärmeleitung Q , die gegeben wird durch:

$$Q = \text{const} \frac{k \sqrt{c^2}}{a^2} \frac{dT}{dh} \quad (3)$$

mit der Stoßradius a der Luftpartikel und ihrem mittleren Geschwindigkeitsquadrat c^2 .

Da Q von der Dichte unabhängig ist, der Energieinhalt einer Luftschicht dieser aber proportional ist, nimmt die relative Dichteschwankung zwischen Tag und Nacht etwa linear mit der Höhe zu, wie Kurve 1 in Abb. 2 zeigt. Außerdem wird der tagsüber akkumulierte Wärmeinhalt für Höhen oberhalb von ca.

300 km während der Nacht total erschöpft. Ferner wird sich die Zusammensetzung der Atmosphäre bis herauf zu ca. 700 km zwischen Tag und Nacht nicht wesentlich ändern, da einmal in diesem Höhenbereich die hauptsächlich Komponenten N und O sind und zum anderen die durch die Diffusionsmischung bewirkten Unterschiede für ein solch relativ geringes Höhenintervall noch gering sind. Daraus folgt, daß etwa zwischen 300 und 700 km Höhe in guter Annäherung die Tag-Nacht-Variation sich einheitlich durch Gl. (4) darstellen läßt:

$$\log \frac{\varrho_{\text{Max}}}{\varrho(\Theta)} = \Theta(h) f(\Theta). \quad (4)$$

Dabei bedeuten Θ die Ortszeit und ϱ_{Max} die maximale tägliche Luftdichte, die nach den Beobachtungen bei $\Theta = 14.00^{\text{h}}$ eintritt. Nach Gl. (4), wie sie auch durch die Beobachtungen bestätigt wird, läßt sich die Tag-Nacht-Variation in zwei Terme aufspalten, die nur von h bzw. von Θ abhängen.

In Abb. 3 ist die Funktion $f(\Theta)$ dargestellt. Es muß jedoch hier schon betont werden, daß die genauere Ableitung der Tag-Nacht-Funktion $f(\Theta)$ sehr komplex ist und Beobachtungsmaterial von mehreren Satelliten erfordert, bei denen mindestens ein vollständiger Tageszyklus für das Perigäum erfolgt ist¹¹. Denn der Tag-Nacht-Wechsel beträgt für die Perigäen der meisten Satelliten mehrere Monate bis Jahre, so daß $f(\Theta)$ von dem jährlichen Effekt (Abschnitt 4) überlagert wird.

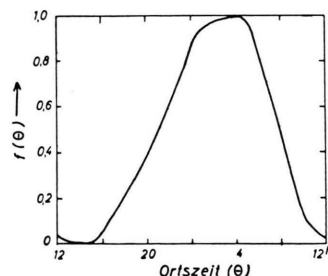


Abb. 3. Die Tag-Nacht-Funktion $f(\Theta)$.

3. Der Korpuskeleffekt

Auch der Einfluß von der Sonne kommender Korpuskelwolken auf die Luftdichte der hohen Atmosphäre konnte gefunden werden¹². Abb. 4 zeigt wie-

⁸ H. HINTEREGGER, I. Cospar. Symp., Nizza 1960.

⁹ L. G. JACCHIA, Smiths. Astrophys. Obs. Rep. Nr. 29 [1959].

¹⁰ W. PRIESTER u. H. A. MARTIN, Mitt. Univ.-Sternw. Bonn, Nr. 29 [1960].

¹¹ H. K. PAETZOLD u. H. ZSCHÖRNER, Proc. I. Cospar Symp., Nizza 1960.

¹² L. G. JACCHIA u. R. E. BRIGGS, Nature, Lond. **183**, 1662 [1959].

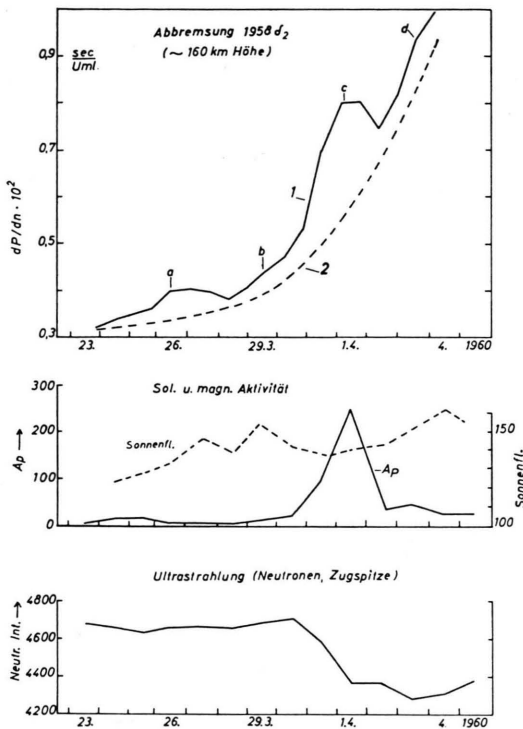


Abb. 4. Magnetischer Sturm vom 31. 3. – 1. 4. 1960. A_p ist der Koeffizient der planetaren magnetischen Unruhe. Kurve 2 gibt die theoretische Abbremsungskurve für einen konstanten Wellen- und Korpuskeffekt.

der nach eigenen Messungen, wie bei dem großen magnetischen Sturm am 31. 3. und 1. 4. 1960 die Abbremsung von Sputnik III erheblich anstieg. Das Perigäum befand sich dabei in 30° N und in 165 km Höhe. Der eigentliche Aufheizungsmechanismus ist noch nicht ganz geklärt. Vermutlich ist die Absorp-

tion von ausgelösten hydromagnetischen Wellen in der Ionosphäre maßgeblich beteiligt¹³. Man erkennt aus Abb. 4, daß nur prononcierte magnetische Stürme Dichteschwankungen hervorrufen, die den Welleneffekt übersteigen. Im allgemeinen ist der Einfluß der magnetischen Aktivität wesentlich kleiner und nur statistisch zu erfassen. In Abb. 4 ist noch die Abnahme der Neutronenkomponente der Ultrastrahlung bei Beginn des Sturmes eingezeichnet (FORBUSCH-Effekt) als Illustration, welche komplexe Erscheinungen durch die Ankunft starker solarer Korpuskelwolken verursacht werden¹⁴.

4. Der jährliche Effekt

Von August bis Oktober 1958 zeigten Explorer I (1958, α) in 365 km und Vanguard I (1958, β_2) in 655 km Höhe ein steiles Ansteigen der Abbremsung, das weder durch die solare Wellen- oder Korpuskelstrahlung, noch durch den Tagesgang erklärt werden konnte, da bei beiden Satelliten die Ortszeit des Perigäums in den betreffenden Monaten um 12^h lag (Abb. 5). Schon damals ließ sich erkennen, daß dieser Effekt sich in seiner Höhenabhängigkeit wesentlich von dem solaren Welleneffekt unterschied¹⁵. Im Jahre 1959 wiederholte sich das markante Ansteigen der Abbremsung in denselben Monaten erneut, so daß der Verdacht auf eine jährliche Periodizität nahe lag¹⁶.

Eine strengere Analyse ergibt das folgende Bild: Normalisiert man die beobachteten Abbremsungen verschiedener Erdsatelliten auf einen konstanten Wert des Wellen- und Korpuskeffektes, so zeigt sich, daß die übrigbleibenden Tag – Nacht-Variatio-

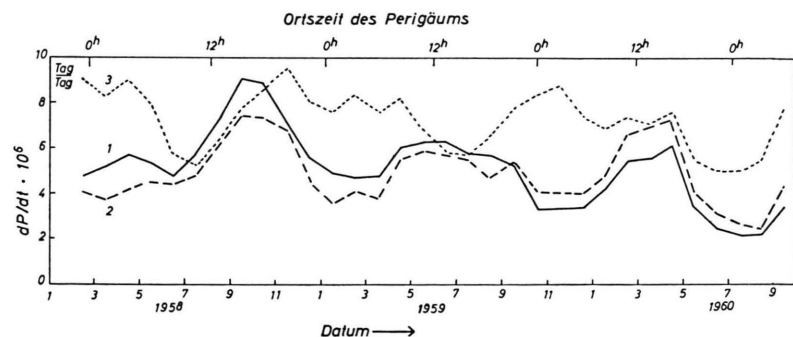


Abb. 5. Abbremsungen Explorer I (365 km). 1 beobachtete Monatsmittel, 2 für konstanten Wellen- und Korpuskeffekt normalisierte Abbremsung, 3 jährlicher Effekt. Man beachte den Wiederanstieg im September 1960.

¹³ J. A. DESSLER, J. Geophys. Res. **64**, 397 [1959].

¹⁴ Für die Überlassung der Neutronenwerte sei Herrn Dr. H. MAYER vom Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik, München, herzlich gedankt.

¹⁵ H. K. PAETZOLD u. H. ZSCHÖRNER, Proc. X. Int. Astron. Congress, London, 55, [1959].

¹⁶ H. K. PAETZOLD u. H. ZSCHÖRNER, Proc. I. Cospar Symp., Nizza 1960.

nen nicht Gl. (4) entsprechen¹⁷. Darüber hinaus ist bei ein und demselben Satelliten die triviale Bedingung nicht erfüllt, daß für dieselbe Ortszeit des Perigäums sich dieselbe auf alle anderen Einflüsse reduzierte Abbremsung ergeben muß. Dies zeigt Abb. 5 als Beispiel von Explorer I (1958 α) mit einer Perigäumshöhe von 365 km. Die normalisierte Kurve 2 der Monatsmittel weist deutlich auf einen dem Tag – Nacht-Effekt überlagerten Einfluß hin. Ferner ist z. B. bei Explorer VII (1959 ι_1) in 555 km Höhe bei der gleichen Ortszeit von 16.00^h die Abbremsung im Juni 1960 nur halb so groß als im Oktober 1959. Besonders dramatisch zeigte sich dieser überlagerte Effekt bei der Rakete von Vanguard I (1958 β_1). Bei ihr sank die Abbremsung von April 1960 bis Juli 1960 um den Faktor 5 auf einen fast unmeßbaren kleinen Wert ab, obwohl die Ortszeit nur von 23.30^h auf 24.30^h fortschritt und mitten in der Nacht die Dichteschwankungen nur noch gering sein sollten.

In Abb. 6 ist für acht Satelliten dieser restliche Effekt dargestellt, den man erhält, wenn man den Tag – Nacht-Effekt nach Gl. (4) berücksichtigt mit einer Höhenabhängigkeit der täglichen Dichteamplitude gemäß Kurve 1 in Abb. 2. Man erkennt, daß der jährliche Gang für alle dargestellten Satelliten erstaunlich gleichförmig ist, obwohl der Tag – Nacht-Wechsel ihrer Perigäen nach Periode und nach Phase ganz verschieden ist. Dies erhärtet die Annahme, daß einmal die Tag – Nacht-Variation nach Gl. (4) richtig erfaßt wurde, zum anderen daß derselben noch ein weiterer unabhängiger, sehr merklicher Effekt überlagert ist. Dieser zeigt in den Jahren 1957–1960 eine ausgesprochene Wiederholungstendenz mit einem schmalen Minimum von Mai – August und einem breiten Maximum von September bis April, wobei um Januar ein sekundäres Minimum angedeutet ist. Mittelt man über alle Satelliten und über die Beobachtungszeit und normiert die Amplitude, so läßt sich nach Abb. 7 diese jährliche Variation gut durch zwei harmonische Funktionen mit einer jährlichen und einer halbjährlichen Periode und einem Amplitudenverhältnis von etwa 3 : 2 darstellen. Dabei liegt das Minimum des jährlichen Effektes um den 25. Juni, die Minima des halbjährlichen Effektes etwa am 10. Juli und 10. Januar.

Daß es sich bei diesem jährlichen Gang um einen gesonderten Effekt handeln muß, zeigt die Höhen-

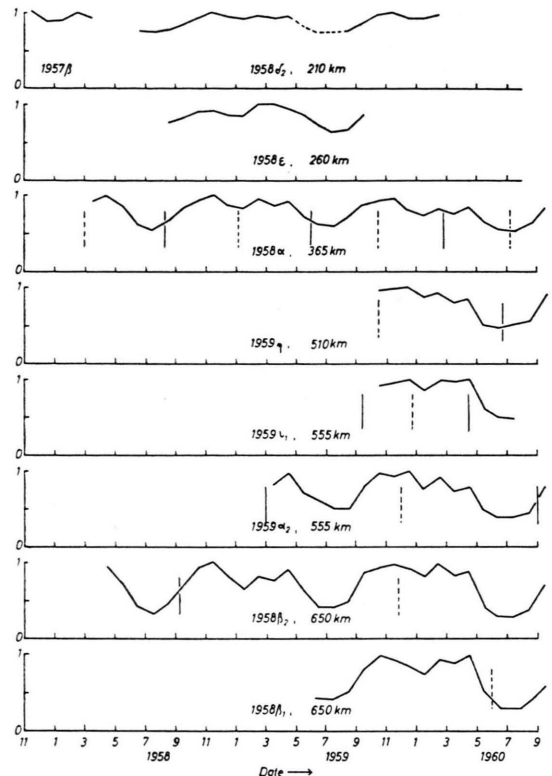


Abb. 6. Jährlicher Effekt für verschiedene Satelliten. Die senkrechten Linien geben ausgezogen Mittag und gestrichelt Mitternacht für das Perigäum an.

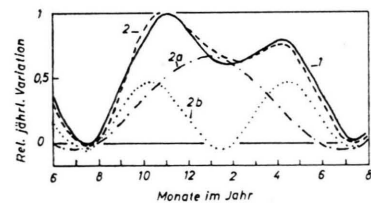


Abb. 7. Komponenten des jährlichen Effektes. 1 beobachteter mittlerer jährlicher Gang, 2, 2a, 2b harmonische Analyse.

abhängigkeit seiner Amplitude (Abb. 2, Kurve 3), die sich markant von der des solaren Welleneffektes und des Tag – Nacht-Effektes unterscheidet. Eine weitere unabhängige Bestätigung haben neue Whistlerbeobachtungen gebracht. Nach ihnen ist die mittlere Elektronendichte auf den Whistlerbahnen einer jährlichen Variation unterworfen, die bis in einzelne Details den Kurven in Abb. 5 gleicht¹⁸. Außerdem wurden schon lange bei der F₂-Schicht jährliche Variationen vermutet mit einer jährlichen und halb-

¹⁷ H. K. PAETZOLD u. H. ZSCHÖRNER, J. Atmosph. Terr. Phys. (im Erscheinen).

¹⁸ R. A. HELLIWELL, Aeronom. Symp., Copenhagen 1960.

jährlichen Komponente, wieder in Übereinstimmung mit Abb. 6¹⁹. Neuerdings wurde die halbjährliche Periode auch bei der E-Schicht gefunden²⁰.

5. Deutungsversuch

Bei der Deutung ist zuerst zu beachten, daß es sich um einen weltweiten jährlichen Effekt und nicht um eine lokale jahreszeitliche Variation handelt. Prinzipiell können die Variationen der Dichte einmal durch Schwingungen der höchsten Atmosphäre, zum anderen durch wirkliche Temperaturschwankungen infolge einer zusätzlichen variablen Energiezufuhr verursacht sein. Wenn auch schwer vorstellbar, so könnte die Schwingungshypothese vielleicht für die halbjährliche Periode zutreffen, da ihre Minima etwa mit den Äquinoktien zusammenfallen, bei denen die Erdhemisphäre symmetrisch von der Sonne bestrahlt wird.

Bei der jährlichen Periode dagegen wird kaum die Annahme einer variablen Energiezufuhr zu vermeiden sein. Allerdings ist die jährliche Schwankung der solaren UV-Strahlung auf Grund der schwach variablen Entfernung Sonne-Erde für eine Erklärung zu gering, da sie nach Abb. 1 (Kurve 2) in 600 km eine Dichteveriation von nur 5% verursacht. Auch müssen die absorbierenden Schichten sich nach Kurve 3 in Abb. 3 über einen wesentlich größeren Höhenbereich erstrecken als bei der solaren UV-Strahlung. Dies könnte der Absorption von hydromagnetischen Wellen entsprechen, die an der Grenze entstehen, wo das terrestrische ionosphärische Plasma in das interplanetare übergeht, die in etwa 10–15 Erdradienentfernung anzunehmen ist. Derartige hydromagnetische Wellen sind mit Erdsatelliten beobachtet worden. Bei bestimmten Frequenzen werden derartige hydromagnetische Wellen vollständig in der Ionosphäre verschluckt und können daher nicht an der Erdoberfläche beobachtet werden. Die beobachteten hydromagnetischen Wellen weisen eine Frequenz von etwa 0,15 Hz und eine Amplitude von 0,4 Milligaß auf. Diese Werte entsprechen nach der Theorie^{20a} sehr gut sowohl der Höhenabhängigkeit des jährlichen Effektes wie auch der aus ihm folgenden zusätzlichen Energiezufuhr

von ca. 0,2 erg/cm² sec. Falls diese hydromagnetischen Wellen durch die Wechselwirkung des terrestrischen ionosphärischen Plasmas mit dem interplanetaren entstehen, müßte letzteres eine Dichte von etwa 100 Protonen/cm³ aufweisen. Dieser Wert erscheint auch nach anderen Beobachtungen plausibel.

Vielleicht ist auch ein anderer Aufheizungsmechanismus noch mitbeteiligt, der ebenfalls mit Kurve 3 in Abb. 5 verträglich ist, nämlich eine direkte Übertragung von kinetischer (Wärme-?) Energie aus dem interplanetaren Plasma, das als äußerster Bereich der Sonnenkorona aufgefaßt werden kann²¹. Ein solcher Mechanismus ist denkbar wegen des sehr intensiven Ladungsaustausches zwischen Protonen und H-Atomen. Sein Wirkungsquerschnitt, der umgekehrt proportional der Protonenenergie ist, beträgt²² für 20-keV-Protonen $7 \cdot 10^{-16}$ cm². Da die Sphäre des aus der Erdatmosphäre stammenden nichtionisierten Wasserstoffes weit hinausreicht mit einer Dichte von $10^2 - 10^3$ H-Atomen in vier Erdradien Entfernung, können sich z. B. Protonen mit einer Energie kleiner als 20 keV nicht länger als einen Tag in dem VAN-ALLEN-Strahlungsgürtel halten. Da der Einfangquerschnitt der Erde durch ihr Magnetfeld vergrößert wird, genügt auch hier eine Dichte des interplanetaren Plasmas von 100 Protonen/cm³ bei einer Relativgeschwindigkeit von 30 km gegenüber der Erde für eine zur Erklärung des jährlichen Effektes ausreichende zusätzliche Energiezufuhr.

Zu erwähnen ist noch ein evtl. Einfluß der interplanetaren staubförmigen Materie. Ihre Dichte wird nach den Beobachtungen an ekliptikalischen Meteorströmen längs der Erdbahn merklich variieren. Nach Zodiacallichtbeobachtungen ist die Dichte des interplanetaren Staubes mit $10^{-21} - 10^{-23}$ g/cm³ freilich nur gering. Allerdings wird der aufgefangene Staub in der höchsten Erdatmosphäre etwas angesammelt werden, da er nur langsam in tiefere Schichten absinkt. Nimmt man einen sehr hohen Wert der Staubbichte von 10^{-20} g/cm³ und eine Akkumulationszeit von 50 Tagen an, so folgt für den Höhenbereich zwischen 200 und 800 km eine mittlere Dichte des aufgefangenen Staubes von $4 \cdot 10^{-16}$ g/cm³ ein Wert der erst oberhalb von 700 km Höhe von der Größe

¹⁹ L. V. BERKNER u. H. W. WELLS, Terr. Magn. Atmos. Elect. **43**, 13 [1938].

²⁰ C. M. MINNIS u. G. H. BAZZARD, J. Atmosph. Terr. Phys. **18**, 306 [1960].

^{20a} R. KARPLUS u. W. E. FRANCIS, J. Geophys. Res., im Erscheinen.

²¹ S. CHAPMAN, The Threshold of Space, London 1957, S. 65.

²² W. L. FITE, R. T. TRACKMANN u. W. R. SNOW, Phys. Rev. **112**, 1161 [1959].

der Dichte der Atmosphäre ist. Danach ist es unwahrscheinlich, daß der jährliche Effekt durch den interplanetaren Staub verursacht wird. Dagegen könnten kleinere beobachtete Unregelmäßigkeiten der Satellitenabbremmung in derartigen zeitweilig verstärkten Staubeinbrüchen ihren Ursprung haben.

Unabhängig, wie die Wechselwirkung der terrestrischen Exosphäre mit dem interplanetaren Plasma im einzelnen zu denken ist, so ist die plausibelste Deutung der jährlichen Periode z. Zt. wohl die, daß die Erde auf ihrer jährlichen Bahn Regionen mit unterschiedlicher Dichte desselben durchläuft. Allerdings scheint auch hier die jährliche Variation der Entfernung Erde – Sonne nicht ausreichend, da anderenfalls die Dichte der interplanetaren Materie unwahrscheinlich rasch mit der Entfernung von der Sonne abnehmen müßte. Aber es fällt auf, daß das Minimum der jährlichen Periode innerhalb der Beobachtungsgenauigkeit mit dem Zeitpunkt zusammenfällt, an dem die Erde die Projektion der relativen Bewegung der Sonne im lokalen Sternsystem auf die Elliptik schneidet. Das Maximum tritt hingegen auf, wenn sich die Erde auf der Rückseite der Sonne relativ zu ihrer Pekuliarbewegung befindet. Es liegt deshalb die Annahme nahe, daß die äußerste Sonnenkorona im Bereich der Erdbahn durch eine Relativbewegung der Sonne zum interstellaren Gas etwas exzentrisch zum Sonnenmittelpunkt verschoben wird. Eine solche Wirkung eines interstellaren Windes ist nur denkbar, wenn die Energiedichte des anströmenden interstellaren Gases von derselben Größenordnung ist wie die des interplanetaren Plasmas. Letztere kann etwa gleich der Energiedichte der mittleren interplanetaren Magnetfelder angenommen werden, deren Größe zu $2 - 3 \cdot 10^{-5}$ Gauss gemessen wurde. Die obige Bedingung ist erfüllt, wenn die Dichte der interstellaren Materie 0,5 Proton oder H-Atom/cm³ beträgt, da durch das Gravitationsfeld der Sonne in der Umgebung der Erdbahn eine Konzentrierung etwa um den Faktor 10 bewirkt wird. Es ist im wesentlichen gleich, ob das interstellare Gas aus Protonen oder H-Atomen besteht, da die letzteren durch die solare UV-Strahlung in der Umgebung der Erdbahn nach einer mittleren Zeit von 20 Tagen ionisiert werden. Selbstverständlich könnte ein solcher interstellarer Wind auch durch interstellare Magnetfelder verursacht werden, die dann von derselben Größenordnung sein müßten wie die interplanetaren.

Die halbjährliche Periode wird vielleicht durch eine Anisotropie des interplanetaren Plasmas relativ zum Sonnenäquator bewirkt. Auch die magnetische Unruhe zeigt eine halbjährige Periodizität mit Maxima, jeweils wenn der Winkel zwischen der Verbindungslinie Erde – Sonne und der Sonnenachse 83° bzw. 97° beträgt. Allerdings treten die Maxima der obigen halbjährlichen Periode gegenüber diesen Extremalwerten am 7. 3. bzw. 5. 9. mit einer Phasenverschiebung von rund einem Monat auf. Gedeutet werden könnte eine solche Anisotropie durch die Annahme, daß die solare Materie bevorzugt in den zwei Fleckengürteln beiderseits des Sonnenäquators senkrecht zur Sonnenoberfläche in den Raum schießt.

6. Schluß

Die bisherigen Ergebnisse, die sich auf niedere und mittlere geographische Breiten beziehen, zeigen, daß die höchste Erdatmosphäre empfindlich auf eine Reihe extraterrestrischer Einflüsse reagiert. Nach dem jährlichen Effekt ist nicht nur die solare kurzwellige elektromagnetische Strahlung, sondern wahrscheinlich auch der Zustand der interplanetaren Materie auf den Aufbau der hohen Atmosphäre und ihres Übergangsgebietes in den Weltraum von erheblichem Einfluß. Da die Variationen der interplanetaren Materie noch fast unbekannt sind, können auch noch keine verbindlichen Modelle der Hochatmosphäre aufgestellt werden. Vielleicht nehmen die beiden jährlichen Perioden mit Annäherung an ein Sonnenfleckenminimum ab, was besonders für die halbjährliche Periode zu vermuten ist.

Insgesamt können durch die verschiedenen Effekte im Extremfall in 1000 km Höhe die Luftdichte um den Faktor 1000 und die Temperatur in dem Bereich zwischen 2000 und 1000 °K schwanken. Eine solche große Variationsbreite der Zustandsbedingungen bedingt einen erheblichen Einfluß auf die Zusammensetzung, auf die Parameter von kinetischen Reaktionen usw. Derartige Probleme müssen daher unter Berücksichtigung der jeweiligen Zustandsbedingungen neu diskutiert werden.

Für die Satelliten-Daten wurden für Sputnik II und III eigene Beobachtungen verwandt, während für die übrigen Satelliten die Reports des Smithsonian Institutes Cambridge/Mass., des Space Track Center, Bedford/Mass., und der NASA herangezogen wurden.