©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

# Unsere Kenntnis über die höchsten Schichten der Atmosphäre.

Von Prof. Dr. Robert Ettenreich.

Vortrag, gehalten am 13. Jänner 1937.

Die stürmische Entwicklung der Radiotechnik hat, insbesonders in dem letzten Jahrzehnt, gewissermaßen als Nebenprodukt überraschende Einblicke in den Aufbau und das physikalische Geschehen der höchsten Schichten der Erdatmosphäre vermittelt, durch die unsere bisherige lückenhafte Kenntnis auf das glücklichste ergänzt wurde. Zweck meines Vortrages soll es sein, eine kurze Zusammenfassung unseres Wissens auf diesem Gebiete zu geben, wobei es natürlich unerläßlich ist, auch die älteren Forschungsergebnisse heranzuziehen, um zu einem möglichst geschlossenen Gesamtbilde zu kommen.

Der Lebensraum des Menschen ist außerordentlich beschränkt. Erscheint uns schon dank der modernen Verkehrsmittel die Erdoberfläche als verhältnismäßig klein, so gilt dies noch im verstärktem Maße von der Bewegungsmöglichkeit in senkrechter Richtung. Man denke sich einen Schul-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at


globus von 30 cm Durchmesser. Der dem Menschen zugängliche Raum unter Berücksichtigung aller Fortschritte in der Aviatik ist dann dünner als das Papier, das den Globus bedeckt.

Dieser Raum macht nur etwa 3 Promille des gesamten Kubikinhaltes der Erde aus. Dabei bereitet es bereits sehr große Schwierigkeiten, sich soweit von der Erdoberfläche zu erheben als etwa Purkersdorf von Wien entfernt ist.

1. Die Troposphäre. Der Luftozean, auf dessen Grunde wir leben, hat ein Gewicht, das etwa dem einer Bleischichte von 1 m Stärke, oder dem Gewichte einer Quecksilberschichte von 760 mm Dicke entspricht. Dieser Druck von 760 mm Quecksilbersäule wird auch „1 Atmosphäre“ genannt und beträgt ungefähr 1 kg pro $cm^2$. Diese erhebliche Belastung empfinden wir nur deshalb nicht, weil auch im Inneren unseres Körpers der gleiche Druck herrscht.

Würde die ganze Atmosphäre in flüssige Luft verwandelt, so würde sie die Erdoberfläche in einer 10 m dicken Schichte bedecken. Der Luftozean hat also, was seine Masse anbelangt, eine wesentlich geringere Mächtigkeit als das Weltmeer, dessen Tiefe, wenn man es über die ganze Erde gleichmäßig ausbreiten würde, mehr als 3000 m betragen würde. Zwischen dem Wasserozean und dem Luftozean besteht aber außer diesem mengenmäßigen Unterschied auch ein grundsätzlicher, denn die

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at


Atmosphäre hat nach oben zu keine scharfe Grenze, die mit dem Meeresspiegel verglichen werden könnte. Dies rührt daher, daß die Luft im Gegensatz zum Wasser zusammendrückbar ist, so daß die unteren Schichten durch das Gewicht der darüber lagernden verdichtet werden. Die Folge davon ist, daß der gewichtsmäßig weitaus größte Teil der Atmosphäre relativ nahe dem Erdboden konzentriert ist. Die Hälfte der Atmosphäre liegt zwischen der Erdoberfläche und 5600 m Höhe. Dort (in der Region der Kaukasusspitzen) herrscht also nur mehr ein Druck von $\frac{1}{2}$ Atmosphäre. Steigt man abermals um 5600 m weiter, so nimmt der Druck wieder auf die Hälfte ab, beträgt also nur mehr $\frac{1}{4}$ Atmosphäre. In der Höhe von dreimal 5600 m, also in 16.800 m — d. h. in jener Region, in die Picard bei seinem berühmten ersten Flug kam — ist der Druck abermals auf die Hälfte gesunken. Er beträgt dort also nur $^1/_8$ Atmosphäre, oder in Quecksilbersäule ausgedrückt, zirka 100 mm. Der Luftdruck nimmt also mit steigender Höhe in geometrischer Progression ab, was es uns ermöglicht, in einfacher Weise für jede Höhe den Luftdruck zu berechnen, bzw. aus dem Luftdruck, wenn dieser bekannt ist, die Meereshöhe zu ermitteln, allerdings unter der stillschweigenden Voraussetzung, daß die Zusammensetzung der Luft überall die gleiche ist (barometrische Höhenformel).

Was nun die Temperaturverteilung anbetrifft,

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at



so wissen wir aus den Erfahrungen der Bergobservatorien und der Ballonaufstiege, daß die Luft im allgemeinen immer kälter wird, je höher man kommt. Und zwar sinkt die Temperatur pro km Höhe ziemlich regelmäßig um etwa 5° C.

Man erklärte sich dies früher durch die Annahme, daß im Weltraum eine ungemein niedrige Temperatur herrsche — (absoluter Nullpunkt) und daß der beobachtete Temperaturabfall eben der Annäherung an diese Weltraumtemperatur entspreche. Diese Anschauung ist aber durchaus irrig. Der Weltraum hat überhaupt keine Temperatur, insoferne er ein leerer Raum ist. Temperatur kann nur ein Körper haben; in Abwesenheit von Materie verliert der Temperaturbegriff überhaupt seinen Sinn. Das beobachtete Temperaturgefälle hat einen ganz anderen Grund: es wird durch die stets vorhandenen vertikalen Luftströmungen hervorgerufen, indem die aufsteigende Luft (da sie in ein Gebiet niedrigeren Druckes kommt) sich ausdehnt und dadurch abkühlt, während jeder Fallwind umgekehrt eine Verdichtung und damit eine Erwärmung mit sich bringt. Der Motor, der letzten Endes alle Luftströmungen, insbesondere auch die vertikalen, in Bewegung setzt, ist die Sonne. Ihre Strahlung bewirkt eine Erwärmung überall dort, wo sie absorbiert wird; da die Sonnenstrahlung von der Luft größtenteils durchgelassen, von der Erde aber verschluckt wird, so erhitzt sich die letztere rascher

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at



als die Luft und gibt ihre Wärme durch Leitung an die unmittelbar über dem Erdboden gelegenen Luftschichten ab. Diese dehnen sich aus, steigen auf und verursachen so einen „Aufwind", wie ihn die Segelflieger so lieben. An einer anderen Stelle muß natürlich, damit das Gleichgewicht nicht gestört ist, ein ebenso starker „Fallwind" vorhanden sein.

So ist der untere Teil der Atmosphäre mit seinen ewigen Steig- und Fallwinden einer riesigen Kältemaschine vergleichbar, die nach einem ähnlichen Prinzip funktioniert, wie ein Frigidaire und dergestalt zwischen den oberen und unteren Schichten ständig eine Temperaturdifferenz aufrecht erhält.

Freilich erstreckt sich, wie man aus Registrierballonaufstiegen weiß, dieses Temperaturgefälle eben nur so weit, als die vertikalen Luftströmungen reichen, d. i. bis zirka 10 km Höhe. Es ist bemerkenswert, daß die Aufwinde in der Äquatorialgegend infolge der intensiveren Sonnenstrahlen höher hinaufreichen als in unseren Breiten (beim Äquator bis etwa 15 km), was wieder zur Folge hat, daß es in diesen Höhen oberhalb des Äquators kälter ist (Minus 75° C) als über den Polen (Minus 45° C).

Man nennt den eben besprochenen, von vertikalen Luftströmungen durchsetzten untersten Teil der Atmosphäre die „Troposphäre" (von dem Griechischen „Umdrehen"); die Troposphäre reicht an den Polen bis etwa 8 km Höhe, in unseren Breiten

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at



bis 10 km Höhe, am Äquator bis 15 km empor, und umfaßt drei Viertel der gesamten Masse der Atmosphäre. In ihr spielt sich das ab, was wir gemeinhin als „Wetter“ bezeichnen, also Wolkenbildung, Niederschläge, Gewitter usw. Man hat Luftproben aus verschiedenen Höhen der Troposphäre entnommen und konnte so feststellen, daß infolge der ständigen Durchmischung durch Luftströmungen aller Art die Zusammensetzung der Troposphäre unten und oben die gleiche ist. Sie besteht aus zirka $^3/_4$ Stickstoff, zirka $^1/_4$ Sauerstoff, 1% Argon, Spuren von anderen Edelgasen und wechselnden, aber stets verhältnismäßig geringen Mengen Wasserdampf und Kohlensäure.

2. Die Stratosphäre. Von ganz vereinzelten kühnen Forschern und Sportsleuten abgesehen, die in Höhen über 10 km vorgestoßen sind, verdanken wir unsere Kenntnis der oberhalb der Troposphäre liegenden Region den systematischen Aufstiegen unbemannter, mit selbstregistrierenden Instrumenten ausgestatteter Ballons. Die größte Höhe, die mit solchen bisher erreicht wurde, ist 34 km — in dieser Höhe herrscht nur mehr ein Luftdruck von 10 mm —. Dabei ergab sich, daß von der Grenze der Troposphäre angefangen, nach oben die Temperatur zunächst konstant ist und weiter allmählich wieder steigt. Wir haben es eben mit einer relativ ruhig ausgebreiteten Schichte zu tun, was auch in ihrem Namen „Stratosphäre“, der

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at



ebenfalls aus dem Griechischen entnommen ist, zum Ausdruck kommt.

Die allmähliche Temperaturzunahme mit steigender Höhe in der Stratosphäre ist aber nicht nur durch die Registrierballons nachgewiesen worden, sondern auch durch einen schon altbekannten, aber nicht immer richtig gedeuteten akustischen Effekt. Es wurde nämlich, sogar schon in früheren Jahrhunderten, beobachtet, daß der Donner der Geschütze oder der Schall einer bedeutenden Explosionswelle nicht nur in der unmittelbaren Umgebung gehört werden kann, sondern auch in sehr großen Entfernungen, während zwischen diesen beiden Hörbarkeitsgebieten eine „Zone des Schweigens“ liegt. Diese Erscheinung wurde auch messend verfolgt und bestätigt gefunden; sie läßt sich sehr einfach durch die Temperaturzunahme in der Stratosphäre erklären. Die Schallgeschwindigkeit ist nämlich um so größer, je höher die Lufttemperatur ist. Kommt daher ein schräg nach oben gerichteter Schallstrahl in Luftschichten mit zunehmender Temperatur, so erfährt er eine Ablenkung nach unten zu und wird, wenn der Temperaturanstieg groß genug ist, wiederum zur Erde zurückgeleitet. Man kann also aus der Größe der „Zone des Schweigens“, wenn die übrigen Versuchsbedingungen bekannt sind, berechnen, bis zu welcher Höhe der Schallstrahl aufgestiegen ist. Man kommt dabei auf Höhen von zirka 40 km.

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at



3. Die Ozonschichte. Die Temperaturzunahme in den oberen Regionen der Stratosphäre läßt sich ganz ungezwungen dadurch erklären, daß dort ein nennenswerter Anteil der Sonnenstrahlung, nämlich die kurzwellige Ultraviolettstrahlung, zurückgehalten wird. Dieser Vorgang, der für die Existenz des organischen Lebens auf der Erde von grundlegender Bedeutung ist, beruht darauf, daß die Sauerstoffmolekel in dieser Schichte durch die Sonnenstrahlung zum Teil zertrümmert werden und in eine andere Anordnung, nämlich in die dreiatomige übergehen, welche der Chemiker als Ozon bezeichnet. Dabei wird das kurzwellige Ultraviolett absorbiert und gelangt daher nicht bis zur Erdoberfläche. Sowohl im Sonnenspektrum als auch im Spektrum sämtlicher Fixsterne fehlt infolgedessen für uns Beobachter, die wir unsere Messungen an der Erdoberfläche anstellen müssen, diese Strahlung. Würde sie ungehindert zur Erde vordringen, so hätte sie den fast augenblicklichen Tod aller Lebewesen zur Folge, da sie auf die Zellen letal wirkt. Die Menge des Ozons, welche die wohltuende, abschirmende Wirkung hervorruft, ist verhältnismäßig gering. Trotzdem kann man die Höhenlage der Ozonschichte aus Beobachtungen der Sonnenstrahlung in verschiedenen Lagen über dem Horizont mit ziemlicher Sicherheit bestimmen, wobei sich die Region zwischen 40 und zirka 60 km Höhe ergibt — dies ist, nebenbei bemerkt, auch die

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at



Höhe, bis zu welcher es gelungen ist, Geschützprojektile empor zu schleudern. Die in der Ozonschichte steckengebliebenen Sonnenstrahlen bewirken natürlich eine Erwärmung, eben jene, von der wir vorhin gesprochen haben.

4. Die Ionosphäre. Von den Gebieten oberhalb der Ozonschichte hatte man bis vor kurzem nur durch die Erscheinung des Nordlichtes und der Sternschnuppen eine kärgliche Kunde. Heute wissen wir aber, dank der Ausbreitungserscheinungen von Radiowellen, daß in Höhen über zirka 80 km die Luft stark „ionisiert", d. h. elektrisch leitend ist. Man nennt die höchsten Schichten daher auch „Ionosphäre".

Jedem Rundfunkhörer ist es bekannt, daß man mitunter einen nahe gelegenen Sender, auch wenn er stark ist, wesentlich schwächer hört als einen weiter entfernten Sender. In der unmittelbaren Umgebung eines Rundspruchsenders hört man naturgemäß sehr gut, dann kommt in einer Entfernung von etwa 100 bis 300 km die sogenannte Schwundzone, in welcher die Empfangsintensität sehr ungleichmäßig ist und einem starken zeitlichen Wechsel unterliegt; erst in einer Entfernung von mehr als 300 bis 350 km kann man auf einen gleichmäßigen, einwandfreien Fernempfang rechnen. Diese zunächst sehr rätselhafte Erscheinung hat einen ähnlichen Grund wie der abnormale Hörbereich von Schallwellen. Sie ist nur dadurch etwas komplizier-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at



ter, daß man bei der Radioausbreitung mit zweierlei Arten von Wellen rechnen muß, nämlich mit den Bodenwellen, welche entlang der Erdoberfläche weiter wandern, und den Raumwellen, welche nach oben zu ausgestrahlt werden. Die Bodenwellen sind stärker gedämpft als die Raumwellen und haben daher nur eine geringere Reichweite. Die Zone des Nahempfanges ist jene, bei welcher die Bodenwelle überwiegt. Die Schwundzone (auch Fadingzone genannt), bezeichnet jenes Gebiet, wo zu der Bodenwelle auch eine von der Ionosphäre zurückgeworfene Raumstrahlung des Senders hinzukommt und wo beide Strahlungen ungefähr die gleiche Stärke haben. Es hängt nun ganz von der zufälligen Lage der reflektierenden Schichte ab, ob diese beiden Wellen beim Empfänger im gleichen Schritt und Tritt oder etwa im Gegentakt eintreffen. Im ersten Fall verstärken sie sich, im zweiten Fall heben sie sich auf oder schwächen sich wenigstens, und so kommt es, daß die Empfangslautstärke von den geringsten Schwankungen der Ionosphäre stark beeinflußt wird. Bei den neueren Radioempfangsgeräten ist diese sehr unangenehme „Schwunderscheinung“ bereits weitgehend ausgeglichen, und zwar durch automatische Vorrichtungen im Innern des Empfängers, durch welche die Apparatempfindlichkeit um so größer gemacht wird, je kleiner die ankommende Schwingungsenergie ist.

Erst außerhalb einer Entfernung von 300 km

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at



vom Sender ist die Bodenwelle schon so geschwächt, daß praktisch nur mehr die von der Ionosphäre zurückgeworfene Raumstrahlung vorhanden ist. Dort spielt also die Phasenlage der ankommenden Strahlung keine Rolle mehr und man hat ungestörten Fernempfang.

Wie kommt nun diese Zurückwerfung der Raumwelle in der Ionosphäre zustande? Sie wird verursacht durch eine Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen, wenn diese in einen von elektrischen Ladungen erfüllten Raum eintreten. Ähnlich wie das Licht gebrochen wird, wenn es von Wasser in Luft übertritt, so werden auch die elektromagnetischen Wellen der Radiosendung vom Lot gebrochen, wenn sie in die Ionosphäre gelangen. In einer Höhe von 100 km über dem Erdboden, wo sich die Schwunderscheinungen der Normalwellen des Rundspruchempfanges zumeist abspielen, herrscht ein Luftdruck von etwa $^1/_{1000}$ mm Quecksilbersäule. Die Luft ist also dort bereits außerordentlich dünn; ihr Druck entspricht etwa dem, der im Innern einer „luftleeren“ Glühlampe herrscht. Unter diesen Umständen wirkt die ultraviolette Sonnenstrahlung nicht ozonbildend, sondern sie spaltet freie Elektronen von den Atomen ab, welche ihrerseits geladen zurückbleiben. Die schnell beweglichen, negativ geladenen Elektronen sind es nun, welche eine Erhöhung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at


Radiowellen bewirken und diese zur Erdoberfläche zurückbiegen, ganz ähnlich wie wir dies bei den Schallwellen gesehen haben, welche in die Erwärmungszone der Ozonschicht gelangen. Die Erscheinung ist übrigens auch nahe verwandt mit der Fata morgana.

Man nennt die Ionosphäre auch häufig die Kennelly-Heaviside-Zone, nach dem Amerikaner Kennelly und dem Engländer Oliver Heaviside, welche fast gleichzeitig und unabhängig voneinander im Jahre 1900 die Hypothese aufstellten, daß in den höchsten Atmosphärenschichten eine Reflexion der Radiowellen stattfinde. Die Anregung dazu bot die Überbrückung des Atlantik durch Marconis drahtlose Signale, denn die wissenschaftliche Welt stand damals vor dem Rätsel, daß die Radiostrahlung sich der Erdkrümmung anschmiege, statt, wie man erwartet hatte, sich nur geradlinig, wie das Licht, auszubreiten. Des Rätsels Lösung liegt darin, daß das Himmelsgewölbe, nämlich die Ionosphäre, trotz der großen Luftverdünnung, die dort herrscht, für die normalen Radiowellen undurchdringlich ist, so daß diese Wellen zwischen Plafond und Fußboden hin und her reflektiert werden, etwa wie das Licht in einem indirekt beleuchteten modernen Ballsaal, der bis in den letzten Winkel erhellt ist, trotzdem man die Beleuchtungskörper nicht sieht.

Die Höhe dieses „Plafonds“ liegt in der gleichen Region, wo auch die Sternschnuppen stecken blei-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at



ben. Man hat durch photographische Himmelsaufnahmen, die gleichzeitig von zwei weit voneinander entfernten Punkten der Erde gemacht wurden, die Bahnen von Sternschnuppen ausmessen können und hat gefunden, daß sie in aller Regel etwa in 100 km Höhe über dem Erdboden enden. Aus der spektralen Zerlegung des Lichtes der Sternschnuppenbahn fand man, daß die Atmosphäre dort oben noch immer vorwiegend aus Stickstoff und Sauerstoff besteht; auch konnte man berechnen, daß im Durchschnitt die Masse einer Sternschnuppe etwa 1 Gramm beträgt. Trotz dieser Kleinheit wohnt solchen himmlischen Geschossen dank ihrer ganz enormen Geschwindigkeit eine gewaltige Energie inne, die sehr wohl imstande wäre, auf der Erdoberfläche Verwüstungen anzurichten, wenn nicht die Ionosphäre als schützende Hülle dieses himmlische Bombardement auffangen würde.

In der Anfangszeit der Radiotechnik lernte man die Ionosphäre nur durch ihre praktischen Auswirkungen, also durch die Schwunderscheinungen und die abnormal großen Reichweiten kennen. Zum Kapitel dieser abnormal großen Reichweiten gehört vor allem die berühmte Versuchsreihe der amerikanischen und englischen Sendeamateure, welche im Jahre 1921 unter der Leitung von Coursey stattfand. Die angelsächsischen Regierungen hatten nämlich den Wellenlängenbereich in der Umgebung von 200 m den Radioamateuren freigegeben, in der Mei-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at



nung, daß mit diesen für die damalige Zeit verhältnismäßig kurzen Wellen ohnedies keine technisch brauchbaren Resultate erzielt werden könnten. Zur allgemeinen Überraschung ergab es sich aber, daß es den Sendeamateuren gelang, mit relativ kleinen Antennen und winziger ausgestrahlter Energie die Strecke von Nordamerika nach England und kurze Zeit darauf auch die von England nach Japan und Neuseeland zu überbrücken, während die großen radiotelegraphischen Compagnien für diese Entfernungen bisher Riesensender von einigen 100 Kilowatt, allerdings auf größeren Wellenlängen, benützt hatten. Nun schwanden die letzten Zweifel an der Existenz reflektierender, elektrisch leitender Regionen in der höchsten Atmosphäre.

Trotzdem dauerte es noch einige Jahre, bis die ersten systematischen Messungen eingeleitet wurden. Einer der ersten Forscher, die sich mit dem Problem von streng wissenschaftlicher Seite befaßten, war der Engländer Appelton. Aber erst 1926 gaben die Amerikaner Breit und Tuve ihre „Impulsmethode“ an, durch die es gelang, das Himmelsgewölbe gewissermaßen elektrisch abzutasten.

5. Die Echolotung. Diese Himmelslotung geschieht ganz ähnlich, wie man heutzutage die Meerestiefe auslotet. Man senkt nämlich zu diesem Zweck nicht mehr wie einst ein Bleigewicht an einem Draht zum Meeresboden hinab, sondern man erzeugt eine kurz dauernde kräftige Schallwelle,

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at


durch einen besonders dazu gebauten Schallsender, der im Bodenteil eines Schiffes befestigt ist, und registriert die Zeit, die vergeht, bis das Echo vom Meeresgrund heraufkommt. Da die Schallgeschwindigkeit im Wasser bekannt ist, so entspricht die Meerestiefe an der Beobachtungsstelle einfach der halben Laufzeit des Schalles.

Ganz analog senden Breit und Tuve äußerst kurzdauernde Radiosignale aus, zwischen denen relativ lange Pausen freigelassen werden. Der Empfänger, der sich meist in unmittelbarer Nähe des Senders befindet, bekommt nun die Signale einerseits direkt auf dem kürzesten Wege vom Sender, andererseits auf dem Umweg über die Zurückwerfung am Himmelsgewölbe. So kann man unter der Annahme, daß die Geschwindigkeit der Radiowellen gleich der Lichtgeschwindigkeit ist, die Höhe der zurückwerfenden Schichte sehr einfach berechnen. Allerdings erfordert die Beobachtung der winzigen Zeiträume, welche zwischen Aussendung und Empfang vergehen (es handelt sich durchschnittlich um Zeiten von weniger als $^1/_{1000}$ Sekunde), den Einsatz modernster wissenschaftlicher Hilfsmittel. Diese Registrierung gelingt nur mit der Kathodenstrahlröhre, die wir dem deutschen Physiker Braun verdanken und welche jetzt dank ihrer Anwendung in der Fernsehtechnik einem breiteren Publikum bekannt wurde.

Die Beobachtungsapparaturen sind schon der-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at



art vervollkommnet, daß sie vollautomatisch arbeiten und einen photographischen Registrierstreifen liefern, der ähnlich aussieht, wie etwa der Streifen eines selbstschreibenden Barometers, und von dem für die ganze Beobachtungszeit die jeweilige Höhe der reflektierenden Schichte, schon in km geeicht, abgelesen werden kann.

Hier sollen nun die wichtigsten Ergebnisse dieser Echolotungen, welche in den letzten Jahren von allen Kulturvölkern der Erde in ausgedehntem Maße gemacht wurden, kurz besprochen werden.

Wenn man während der Aussendung der Impulssignale die Senderwellenlänge mehr und mehr verkürzt, so findet man eine Welle, bei welcher keine Reflexion mehr stattfindet, die sogenannte „kritische Wellenlänge". Aus der Beobachtung der Laufzeit und der kritischen Wellenlänge ergibt sich außer der Höhe der Schichte auch noch die Elektronenkonzentration, welche dort herrscht. So fand man, daß zwei Maxima der Elektronendichte normalerweise vorhanden sind, nämlich eines bei 100 km Höhe (die sogenannte E-Schichte) und ein zweites bei ungefähr 225 km Höhe (die sogenannte F-Schichte). Die Intensität beider Schichten zeigt einen sehr starken täglichen Gang, und zwar ziemlich proportional mit der Sonnenstrahlung. Bei Tag ist also im allgemeinen sowohl die E- als die F-Schichte wesentlich stärker ionisiert, das heißt besser elektrisch leitend als bei Nacht, was wohl

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at



eindeutig auf die Entstehung dieser elektrischen Ladungen durch die ultraviolette Sonnenstrahlung hinweist. Daneben gibt es aber noch sehr zahlreiche Beobachtungsresultate, welche uns über die Feinstruktur der Ionosphäre und ihrer täglichen und jahreszeitlichen Schwankungen belehren. Bei Sonnenaufgang teilt sich die F-Schichte in zwei Schichten, die sogenannte $F_1$- und $F_2$-Schichte, welch letztere rasch bis zu einer Höhe von etwa 400 km emporsteigt. Die Elektronenkonzentration in der F-Schichte beträgt etwa 1 Million Elektronen im Kubikzentimeter.

Ganz kurze Wellen werden von der Ionosphäre nicht zurückgeworfen, sondern können durch sie hindurchdringen. Übrigens hängt die Frage, ob eine Welle zurückgeworfen wird oder in den Weltraum hinauseilt, auch von dem Winkel ab, mit dem sie auf die Elektronenbank auftrifft. Bei ganz schrägem Einfall, d. h. also bei Wellen, die die Erdoberfläche streifend verlassen, werden gerade noch jene zurückgeworfen, deren Wellenlänge größer als 10 bis 12 m ist. Man nennt daher die 10-Meter-Wellen auch die „Grenzwellen", weil sie die kürzesten sind, welche sich nach dem heutigen Stande der Technik für Fernkorrespondenz eignen. Wollten wir einmal den kühnen Versuch machen, in eine Radiokorrespondenz mit einem Nachbarplaneten einzutreten, so müßte man natürlich gerade solche kurze Wellen verwenden, welche die Atmo-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at



sphäre ohne weiters zu durchdringen vermögen.

Man darf sich aber nicht vorstellen, daß die E-, $F_1$- und $F_2$-Schichte vollkommen gleichmäßige, horizontal ausgebreitete Flächen seien, sondern man weiß aus zahlreichen Registrierungen, daß die Dichte der Elektronen auch innerhalb der einzelnen Schichte ganz beträchtlichen Schwankungen unterworfen ist. In diesem Sinne spricht man von „Elektronenwolken", zwischen denen oft große Lücken oder Stellen geringerer Dichte vorhanden sind. So erklärt sich der unregelmäßige Charakter der Empfangsqualität der Fernkorrespondenz. Es findet am Himmelsgewölbe eine Art diffuse Reflexion statt, welche der Engländer Eckersley als "Scattering" bezeichnet hat, so daß es auch vorkommen kann, daß nicht nur Strahlen, die senkrecht nach oben geworfen werden, zum Sender wieder zurückkommen, sondern daß dies auch solche Strahlen tun, die schräg nach oben verlaufen, wenn sie gerade eine geeignet gestellte Fläche einer Elektronenwolke treffen.

Was die Ursachen der Bildung der Elektronenwolken anbelangt, so sind sich die Forscher derzeit im großen ganzen darüber einig, daß die sogenannte normale Ionisierung, also die horizontalen E-, $F_1$- und $F_2$-Schichten durch die ultraviolette Sonnenstrahlung hervorgebracht werden, während die unregelmäßigen Phänomene, also die örtlichen Zusammenballungen bzw. abnormal hohe Ionisie-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at



rung während der Nachtzeit, durch sogenannte „Korpuskularstrahlung“ entstehen. Unter Korpuskularstrahlung ist dabei sowohl jenes Elektronenbombardement zu verstehen, welches von der Sonne ausgeht, als auch die sogenannte durchdringende Höhenstrahlung, welche ihren Sitz wahrscheinlich in interstellaren Räumen hat, d. h. von sehr entfernten Fixsternen herrühren dürfte. Diese Korpuskularstrahlung kommt, wie man aus den Nordlichtbeobachtungen und aus Elektrometerregistrierungen weiß, in unregelmäßiger Weise bald mehr, bald weniger intensiv in Form von sogenannten „Schauern“ zur Erde und ist daher sehr wohl geeignet, die erwähnten launenhaften Effekte hervorzurufen. Ganz im Gegensatz dazu ist die Ultraviolettstrahlung der Sonne jahraus jahrein ungemein konstant.

Daß die normale Ionisierung von der Ultraviolettstrahlung der Sonne herrührt, wird auch dadurch bestätigt, daß bei Eintritt einer totalen Sonnenfinsternis die Ionisierung stark abnimmt und nahezu den geringen Wert annimmt, der sonst nur in der Nacht herrscht. Daß andererseits aber auch die von der Sonne entsendeten Elektronen beteiligt sind, wird dadurch illustriert, daß die Reichweite von Kurzwellenstationen mit dem Sonnenfleckenzyklus schwankt. Je mehr Sonnenflecken vorhanden sind, um so kürzer ist die „Grenzwelle“, welche noch reflektiert wird, ein Beweis dafür, daß bei lebhafter Sonnenfleckentätigkeit die höchsten

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at



Schichten der Atmosphäre höhere elektrische Leitfähigkeit aufweisen.

6. Der Luxemburg-Effekt. Als vor etwa 7 Jahren die Radiostationen Europas alle wesentlich verstärkt wurden, und sozusagen ein Wettrüsten der Nationen um die Beherrschung des Äthers eintrat, da zeigte sich die merkwürdige Erscheinung, daß eine gegenseitige Störung von Radiosendungen, die auf sehr verschiedenen Wellenlängen ausgestrahlt wurden, eintrat, eine Störung, welche auch durch die allerbeste Abstimmung des Empfangsgerätes nicht beseitigt werden konnte. Allerdings tritt diese Störung nur dann ein, wenn der störende Sender etwa auf dem halben Wege zwischen dem gewünschten Sender und dem Empfänger liegt. Da dieser Störeffekt zum erstenmal an der damals relativ besonders kräftigen Sendestation von Luxemburg beobachtet wurde, hat man die ganze Erscheinung nach diesem Sender benannt.

Systematische Beobachtungen, welche insbesondere von dem Reichspostzentralamt in Berlin, aber auch von verschiedenen Sendegesellschaften angestellt wurden, haben ergeben, daß die von einem Sender senkrecht nach oben abgestrahlten Hochfrequenzwellen einen ganzen Ionosphärenbezirk oberhalb des Senders gewissermaßen in Aufruhr versetzen. Dort oben tanzen die Elektronen im Rhythmus des darunterliegenden Senders. Wenn nun die Strahlen eines anderen Senders gerade an

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at



jenem Teil der Ionosphäre reflektiert werden, der durch einen darunterliegenden Sender beaufschlagt ist, so tritt eine „Kreuzmodulation“ ein, d. h. das Programm des Störsenders moduliert die Trägerwelle des gewünschten Senders, während die Wellen reflektiert werden. Die Folge davon ist, daß in der Empfangsstation das Programm des Störsenders auf der Wellenlänge des gewünschten Senders mitgehört wird. — Diese Erscheinung darf nicht verwechselt werden etwa mit dem gleichzeitigen Hören zweier Stationen, wie dies bei einem schlechten Empfänger häufig vorkommt. Die Kreuzmodulation durch den Luxemburg-Effekt kann auch durch den besten Empfänger nicht beseitigt werden, weil sie eben von der gewünschten Wellenlänge übernommen wurde. Wohl aber kann bis zu einem gewissen Grade dadurch Abhilfe geschaffen werden, daß man die Sendeantenne so baut, daß sie möglichst wenig nach oben strahlt, d. h. daß sie nur in der nützlichen Richtung, also unter einem gegen die Horizontale nur schwach geneigten Winkel ausstrahlt. Leider sind gegenwärtig noch keineswegs alle Rundfunkantennen nach diesem Prinzip konstruiert.

Der Luxemburg-Effekt zeigt, daß das sogenannte Superpositionsprinzip der elektromagnetischen Wellen, das man bisher für allgemein gültig gehalten hat, in den Räumen der Ionosphäre nicht mehr streng anwendbar ist. Dieses Superpositions-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at



prinzip sagt nämlich, daß sich elektromagnetische Wellen gegenseitig durchdringen, ohne sich irgendwie zu beeinflussen. Tatsächlich kann man auch beispielsweise durch das intensive Strahlenbündel eines Scheinwerfers quer hindurch den Strahl eines zweiten Scheinwerfers schicken, ohne daß einer der beiden Strahlen in seinem weiteren Verlauf irgendwie dadurch beeinflußt würde. Dies gilt auch im allgemeinen für Radiowellen, aber nur dann, wenn sie in einem ladungsfreien Raum verlaufen, nicht aber in der mit einer großen Elektronendichte ausgestatteten Ionosphäre.

7. Das Hals-Echo. Außer den bekannten Echos, von denen bei der Besprechung der Echolotungen die Rede war und deren Laufzeit je nach der Höhe der reflektierenden Schichte etwa $^1/_{1000}$ Sekunde beträgt, gibt es auch sogenannte Erdumlaufsechos, welche mit $^1/_7$ Sekunde Verspätung an der Sendestelle wieder eintreffen. Man nimmt an, daß diese Echos nicht durch fortwährende Zick-Zack-Reflexion zwischen dem Erdboden und der Ionosphäre zustandekommen, sondern daß die Radiowellen in der Grenzschichte der Ionosphäre ähnlich weiterlaufen wie die Wasserwellen auf der Oberfläche eines Teiches. Die beobachtete Laufzeit von $^1/_7$ Sekunde stimmt sehr gut mit der zu erwartenden Ausbreitungsgeschwindigkeit der Signale überein; sie ist nämlich fast genau gleich der Lichtgeschwindigkeit.

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at



Um so überraschender war es, als im Jahre 1926 der Norweger Jorgen Hals meldete, er habe Echozeichen gehört, die mit mehreren Sekunden Verspätung nach dem Originalzeichen eingelangt seien. Der bekannte Nordlichtforscher Prof. Störmer und Prof. van der Pol in Eindhoven interessierten sich sehr für das Phänomen und veranstalteten eigene Spezialsendungen, um die Beobachtung von Hals zu überprüfen. Nach längeren Mißerfolgen gelang es tatsächlich, solche enorm verzögerte Echos zustandezubringen, und zwar solche mit einer Laufzeit bis zu mehreren Minuten. Allerdings sind diese „Halsechos" nicht immer vorhanden, sondern nur bei ganz bestimmten Konstellationen der Ionosphäre. Das Phänomen ist noch nicht endgültig aufgeklärt, doch dürfte es sich nicht um eine Welrenreflexion im Weltraum handeln, sondern höchstwahrscheinlich um eine außerordentliche Verlangsamung der Radiosignale bei gewissen Elektronenverteilungen in der Ionosphäre. Tatsächlich ergibt die Rechnung, daß es für jede Wellenlänge eine bestimmte Elektronenkonzentration gibt, bei der die sogenannte „Gruppengeschwindigkeit" gleich Null wird. Wenn man sich dieser Konzentration nähert, tritt natürlich eine bedeutende Verlangsamung der Signale ein. Man darf aber in diesem Fall nicht die „Gruppengeschwindigkeit" mit der „Fortpflanzungsgeschwindigkeit" verwechseln. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit selbst wird nämlich in den

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at



stark geladenen Schichten im Gegenteil vergrößert, aber in der Weise, daß sich die Amplitude wesentlich verändert. Die Wellen geben beim Eintreten in die Ionosphäre einen Teil ihrer Energie an die Elektronen ab und laufen mit wesentlich verringerter Amplitude und gleichzeitig erhöhter Fortpflanzungsgeschwindigkeit weiter. Die Elektronen werden nun durch die weiter folgenden Wellenzüge immer mehr aufgeschaukelt und geben schließlich, wenn der Wellenzug vorüber ist, die in ihnen aufgestapelte Schwingungsenergie in Form einer Fortsetzung der Strahlung wieder ab. So kommt es, daß die Modulation einer Welle infolge der Trägheit, welche die Elektronen in der oben geschilderten Weise in den Vorgang hineinbringen, hinter der Trägerwelle zurückbleibt. Um einen ganz groben Vergleich zu gebrauchen, könnte man sagen, daß die Trägerwellen in den Streik treten und davonlaufen, während sie ihre Last, nämlich die Modulation, abwerfen, welche dann erst verzögert nachgeliefert wird — dies ist natürlich nur eine sehr triviale Umschreibung jener mathematischen Formeln, welche sich durch Anwendung der Maxwellschen Strahlungstheorie auf ladungserfüllte Räume ergeben.

Das Hals-Echo hat seinen Sitz vermutlich in der $F_2$-Schichte an Stellen, wo eine sehr große Elektronendichte herrscht, aber infolge außerordentlicher Gasverdünnung nur eine relativ geringe Ionisie-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at



rung. Eine Vorstellung, wie eine solche Trennung der Elektronen von den Ionen etwa zustandekommen kann, soll im folgenden zu geben versucht werden.

8. Die Temperaturverteilung in der Ionosphäre. Wir haben schon früher berichtet, daß beim Einsetzen der ultravioletten Sonnenstrahlen, also bei Sonnenaufgang, die F-Schichte sich in eine $F_1$- und eine $F_2$-Schichte trennt, welch letztere mit großer Geschwindigkeit zu sehr bedeutenden Höhen (etwa 400 km über der Erde) emporsteigt. Nun ist es gelungen, aus den Beobachtungen der scheinbaren Reflexionshöhen und der Grenzwellenlängen nicht nur die Elektronendichte, sondern auch die Temperatur der dort befindlichen Gase zu errechnen (J. Fuchs). Dabei ergab sich, daß an der unteren Grenze der $F_1$-Region eine Temperatur von ungefähr $+ 100^0$ C und in der $F_2$-Region eine solche von ungefähr $+ 1100^0$ C herrscht. Dies läßt sich dadurch deuten, daß durch die Einwirkung der Sonnenstrahlung nicht nur Ionisierung eintritt, sondern daß eine Restenergie übrigbleibt, welche den ionisierten Atomen eine sehr hohe Geschwindigkeit erteilt. Schnell bewegte Atome sind nun nichts anderes, als hoch erhitzte Atome. Es findet nun eine Trennung dieser stark erhitzten Partikelchen von den übrigen statt, was umso leichter sein kann, als bei der in der $F_1$-Schichte herrschenden bedeutenden Gasverdünnung (der Druck ist dort nur mehr

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at



$^1/_{1,000\cdot000}$ mm Quecksilbersäule) die gegenseitigen Zusammenstöße der Gasatome schon recht rar geworden sind. Es findet also nicht, wie wir das bei dichteren Gasen gewohnt sind, ein gegenseitiger Wärmeaustausch statt, sondern die rasch bewegten Teilchen expandieren nach oben und bilden damit die $F_2$-Schichte. Wenn diese Vorstellung, die durch neuere Beobachtungen sehr gut gestützt ist, wirklich richtig ist, so haben wir es mit einem neu entdeckten Naturphänomen von gewaltigen Ausmaßen zu tun. Täglich steigt bei Sonnenaufgang ein Teil der Atmosphäre von der Höhe von zirka 220 km in sehr kurzer Zeit auf zirka 400 km an, um dann beim Nachlassen der Sonnenstrahlung in der Abenddämmerung wiederum herabzusinken.

Auf den ersten Blick scheint es überraschend, ja geradezu verwirrend zu sein, anzunehmen, daß in einer Höhe von 400 km über dem Erdboden eine Temperatur von mehr als 1000° C herrschen soll. Bei näherer Überlegung ist diese Annahme aber keineswegs absurd. Man muß sich nur vergegenwärtigen, daß in einem so außerordentlich verdünnten Gase, wie es die Atmosphäre dort oben ist, die Temperatur eine ganz andere Bedeutung bekommt als im gewöhnlichen Leben.

Würde man etwa ein Quecksilberthermometer in die $F_2$-Schichte bringen, so würde dies sicherlich nicht eine so hohe Temperatur anzeigen, und zwar deshalb, weil die Temperatur, welche das Thermo-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at



meter annimmt, nicht nur durch seine Umgebungstemperatur, sondern auch durch die Strahlung bedingt ist. Der Einfluß der Umgebungstemperatur auf das Thermometer ist aber umso geringer, je verdünnter das Gas ist, in dem es sich befindet, wogegen der Einfluß der Strahlung unverändert fortbesteht. Das Thermometer wird also auf der der Sonne zugekehrten Seite Strahlung empfangen und der von der Sonne abgewendeten Strahlung abgeben und die Temperatur, die sich schließlich einstellt, wird die eines Strahlungsgleichgewichtes sein, wobei die zugestrahlte und abgestrahlte Energie einander die Waage halten, ohne daß die Temperatur der Gasatome, welche infolge ihrer großen Verdünnung nur in geringer Zahl auf das Thermometer auftreffen, auf dieses Gleichgewicht irgend einen nennenswerten Einfluß hätte. Gleichzeitig mit der $F_2$-Schichte bewegen sich die schnellen Elektronen nach oben und erzeugen dort einen Raum, in welchem infolge der extremen Gasverdünnung eine relativ geringe Ionisierung bei gleichzeitig hoher Elektronenkonzentration herrscht. So erklärt sich die trotz der langen Laufzeit geringe Dämpfung der Hals-Echos.

Im Vorstehenden wurde immer von Gas-„Atomen“ gesprochen, während es doch wohlbekannt ist, daß die Atmosphäre in ihren unteren Teilen aus Gas-„Molekülen“ besteht. Wir haben aber guten Grund anzunehmen, daß in der Höhe

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at



der F-Schichte die Moleküle des Sauerstoffes und Stickstoffes zum weitaus größten Teil bereits in ihre Atome zerfallen sind. Nur so können wir es uns erklären, daß in Schichten von 300 bis 400 km Höhe noch der erforderliche Gasdruck herrscht, der zur Erklärung der beobachteten Phänomene notwendig ist. Die so lange rätselhafte grüne Linie des Nordlichtspektrums dürfte auch mit der atomaren Natur der höchsten Atmosphäre zusammenhängen.

Auch die hohe, aus den Reflexionen der Radiowellen abgeleitete Ionosphärentemperatur wird durch Nordlichtbeobachtungen bestätigt. Man konnte nämlich durch gewisse Einzelheiten des Nordlichtspektrums, und zwar aus bandenförmigen Linien der Stickstoffstrahlung, auch Temperaturwerte errechnen, welche mit den durch die Echolotungen gefundenen befriedigend übereinstimmen.

Die in älteren Arbeiten öfters ausgesprochene Vermutung über das Vorhandensein einer Wasserstoff- oder Heliumatmosphäre, oder gar die Annahme der Existenz eines unbekannten Gases „Geocoronium“ in den höchsten Atmosphärenschichten erweist sich im Lichte der neueren Forschung als unzutreffend. Eine Sortierung der Gase nach dem spezifischen Gewicht findet dort oben wahrscheinlich nicht statt, sondern eine nach der Temperatur. Eine Entmischung der Gase könnte nur stattfinden, wenn dort oben keine Vertikalbewegung der Luft vorhanden wäre. Nun ist aber, wie gezeigt, gerade

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at



in den höchsten Schichten eine tägliche Vertikalbewegung von gigantischen Ausmaßen vorhanden, welche die Vertikaldurchmischung der Troposphäre noch bei weitem übertrifft. Relativ ruhig und stabil in dieser Hinsicht scheint nur die dazwischenliegende Stratosphäre zu sein.

# ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Schriften des Vereins zur Verbreitung naturwissenschaftlicher Kenntnisse Wien

Jahr/Year: 1937

Band/Volume: 77

Autor(en)/Author(s): Ettenreich Robert

Artikel/Article: Unsere Kenntnis über die höchsten Schichten der Atmosphäre. 26-54