

Zeitschrift: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft des Kantons Glarus
Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft des Kantons Glarus
Band: 7 (1945)

Artikel: Ultraviolette Sonnenstrahlung und atmosphärisches Ozon
Autor: Stoll, B.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1046725>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 06.03.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Ultraviolette Sonnenstrahlung und atmosphärisches Ozon.

Von Dr. B. Stoll, Rorschlikon.

Vom sichtbaren und unsichtbaren Sonnenspektrum. — Das Ozon verursacht das vorzeitige kurzwellige Ende des natürlichen Spektrums der Sonne. — Ueber eine neue extrem kurzwellige Komponente der ultravioletten Sonnenstrahlung. — Die quantitative Bestimmung des Ozongehaltes der Atmosphäre und seine Verteilung in vertikaler Erstreckung. — Uebereinstimmung der indirekt errechneten Ergebnisse mit direkten Messungen in der Stratosphäre. — Die meridionale Verteilung des Ozongehaltes auf der Erde. — Die Entstehung und Rückbildung des Ozons in der Stratosphäre. — Die Ultravioletttempleindlichkeit der Haut und die Anpassung der Organismen an die vorhandene, durch das hohe Ozon dosierte ultraviolette Reizstrahlung der Sonne. — Die biologisch wirksamen Wellenlängen der ultravioletten Sonnenstrahlung. — Die Hautrötung oder das Erythem. — Biologische Folgen einer allzu starken Ultraviolettstrahlung. — Die rachitisheilende Wirkung des ultravioletten Sonnenlichtes besteht in der Erzeugung des lebenswichtigen Vitamins D. — Biologische Konsequenzen einer zu geringen ultravioletten Reizstrahlung. — Die quantitative Bestimmung des Ozongehaltes bodennaher Luftschichten. — Wirkungen des bodennahen Ozons.

Das vorliegende Problem, welches vor allem in den beiden letzten Jahrzehnten dauernd an Bedeutung gewann, berührt die Grenzgebiete der verschiedensten Wissenschaften, wie Physik, Chemie, Geophysik, Astrophysik, Meteorologie, Biologie, Physiologie, Medizin u. a. m. Durch gegenseitige Verknüpfung zahlloser Fragen führt es jedoch auf eine gemeinsame, tiefere Wurzel zurück: Es ist die Frage der ultravioletten Grenze des Sonnenspektrums.

Fällt ein Strahl weißen Sonnenlichtes etwa auf ein Glasprisma, so wird er auf seinem Wege nicht nur zur Seite abgelenkt oder gebrochen, sondern dazu noch in ein Band unzähliger Einzelfarben aufgespalten, wobei an einem Ende Rot und am anderen Violett steht. Dieses Farbenband heißt Spektrum. Darin er-

scheint Rot am wenigsten, Violett aber am stärksten abgelenkt. Nach einer willkürlichen Einteilung, welche von Newton stammt, unterscheiden wir als die hauptsächlichsten Lichtsorten die sieben Regenbogenfarben: Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo und Violett. Die gleiche Lichtzerlegung sehen wir auch im Farbenspiel der kleinsten Wasserkügelchen sowohl in den Regentropfen der Wolken, d. h. im Regenbogen, als auch in den glitzernden Tautropfen auf dem Rasen.

Was wir gewöhnlich als Licht bezeichnen, ist ein wellenförmiger Vorgang, bei welchem die verschiedenen Farben von Wellen verschiedener Länge erzeugt werden. Die zahlreichen Lichtquellen strahlen jedoch diese Wellen in sehr ungleicher Anzahl und Stärke aus. Außerdem haben sie ganz verschiedene Wirkungen. Es gibt z. B. chemische Elemente, deren Licht fast nur aus einer einzigen Farbe besteht. Daß nun jeder Körper, welcher sich chemisch und physikalisch von einem anderen unterscheidet, auch ein ganz spezifisches, also nur ihm zukommendes Spektrum liefert, bedeutet ein nicht zu unterschätzendes Entgegenkommen der Natur. Dies bestätigt die Spektralanalyse immer wieder aufs neue bei der Identifizierung von Stoffen, aus denen sich die Himmelskörper zusammensetzen, und von denen wir selbst aus den fernsten Tiefen des Universums noch Licht erhalten. Welche Gestalt ein Spektrum aber auch haben möge, stets sind die verschiedenen Farben in der Reihenfolge ihrer Wellenlänge angeordnet. Die Messungen zeigen, daß rotes Licht die größte Wellenlänge hat, bei seinem gedankenschnellen Dahineilen gewissermaßen die längsten Schritte macht. In Wirklichkeit sind diese Schritte aber unvorstellbar kurz, gehen doch auf einen einzigen Zentimeter zirka 13 000 Wellen, sodaß sich die Länge einer roten Lichtwelle zu rund 80millionstel Zentimeter oder 800millionstel Millimeter errechnet. Als praktische Maßeinheit benutzt die Optik im allgemeinen den 100millionstel Teil eines Zentimeters und nennt ihn zu Ehren des schwedischen Physikers Ångström eine Ångström-Einheit ($1 \text{ A.-E.} = 10^{-8} \text{ cm}$). Rotes Licht hat demnach eine Wellenlänge von $\lambda = 8000 \text{ A.-E.}$

Wenn wir nun die anderen Farben: Orange, Gelb, Grün usw. der Reihe nach durchlaufen, nimmt die Wellenlänge beständig ab, bis wir zum violetten Lichte kommen, das eine Wellenlänge von

noch 4000 A.-E. besitzt. Gegenüber rotem Licht ist hier die Schrittlänge nur halb so groß. Dementsprechend erhöht sich die Zahl der Wellen auf 26 000 pro Zentimeter. Eine im Hinblick auf die Wirkung wesentliche Eigenschaft des Lichtes besteht nun darin, daß im gleichen Maße wie die Anzahl der Wellen pro Zentimeter (oder pro Sekunde) auch der Energieinhalt der betreffenden Farbe anwächst.

Nichts wäre nun verkehrter als anzunehmen, daß das eben beschriebene und für uns sichtbare Spektrum alle von der Sonne ausgesandten Strahlen darstellt. Es ist nur ein kleiner Ausschnitt aus der vielfach größeren Gesamtheit aller Sonnenstrahlen. Sowohl dem roten als auch dem violetten Spektralende schließen sich noch zahlreiche Lichtoktaven an, welche jedoch nicht mehr auf unsere Augen einwirken. Jenseits des roten Lichtes, auf der Wellenleiter also nach längeren Wellen hin, folgt das große Gebiet der infraroten Strahlen, für welche wenigstens noch unsere Haut sowie besonders präparierte photographische Platten empfindlich sind. Da diese Strahlen hauptsächlich an der Erwärmung der von ihnen getroffenen Körper erkennbar sind, nennt man sie auch Wärmestrahlen. Auch jenseits des Violetts kommt noch eine ganze Fülle von Licht, das wir ebenfalls nicht sehen können: Dies ist die Ultraviolettstrahlung. Wenn wir dieses Licht auch sehen wollten, müßte die Netzhaut unserer Augen aus denselben Stoffen wie die Emulsion photographischer Platten bestehen. Die Gegenwart ultravioletter Strahlen bekundet sich also dadurch, daß sie wie bei der Photographie bestimmte Salze chemisch zerlegen; ferner bringen sie eine Anzahl chemischer Stoffe zum Fluoreszieren, sie bleichen Farbstoffe und üben eigentümliche, aber überaus wichtige biologische Wirkungen aus, welche weiter unten Gegenstand näherer Betrachtung sein sollen.

Eine einfache Beobachtung z.B. einer mit verschiedener Belastung brennenden Glühlampe zeigt, daß bei höherer Temperatur eines strahlenden Körpers nicht nur die Strahlungsleistung größer wird, sondern daß auch die Farbe mehr weißlich-bläulich ist. Die Lichtverteilung im Spektrum hängt also nach Intensität und Farbe wesentlich von der Temperatur ab. Es hat sich gezeigt, daß darüber nur für Körper ganz bestimmter optischer Eigenschaften, die man als schwarze Strahler bezeichnet, allgemeine Ge-

setzmäßigkeiten aufgestellt werden können. In Figur 1 ist z. B. die Strahlung eines schwarzen Körpers von 3000 Grad der absoluten Temperaturskala, d. h. die Energie der einzelnen Farben

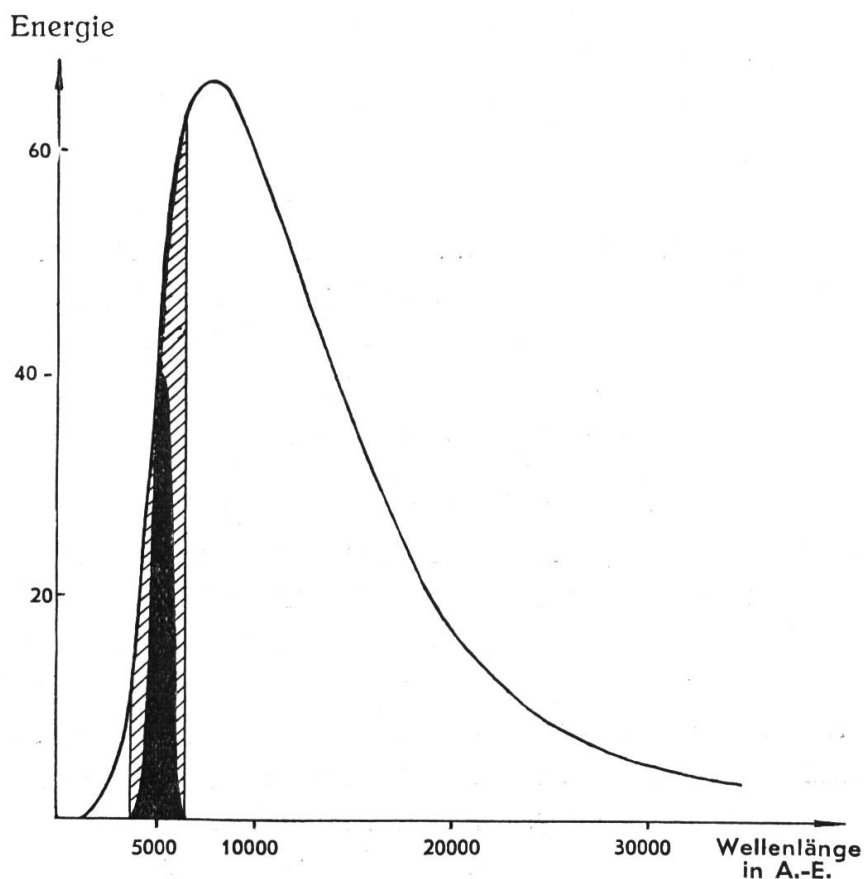


Fig. 1. Energie einer Gesamtstrahlung (Fläche der ausgezogenen Kurve) im Vergleich zur Energie der sichtbaren Strahlung (schraffiert) und der vom Auge empfundenen Helligkeit (schwarz). Strahlung eines schwarzen Körpers bei 3000 Grad abs. (nach Grimsehl).

oder Wellenlängen dargestellt. Dabei ist das Gebiet des sichtbaren Teils des Spektrums von der vom Auge empfundenen Helligkeit deutlich unterschieden.

Kehren wir nun zum Sonnenspektrum zurück. Nach Messungen mit elektrischen Thermometern beträgt die Oberflächentemperatur der Sonne rund 6000 Grad. Wenn man die Sonne mit einem schwarzen Strahler identifiziert, so läßt sich auf Grund der erwähnten Strahlungsgesetze die Verteilung der Lichtintensität auf die einzelnen Farben außerhalb der Erdatmosphäre, d. h. das extraterrestrische Sonnenspektrum genau berechnen. Beobachten wir dieses Spektrum von der Erde aus, so bemerken wir zu un-

serem Erstaunen, daß es sich weder nach der infraroten noch nach der ultravioletten Seite hin so weit erstreckt, wie es aus der Theorie und auch aus der Analogie mit künstlichen Lichtquellen erwartet werden müßte. Ein ausgedehnter Abschnitt fehlt vollständig. Während uns bis weit ins Infrarot hinein noch Sonnenenergie in Form von unsichtbaren Wärmestrahlen erreicht, ist der jähe Abbruch im chemisch und biologisch wirksamen Ultraviolett ganz besonders kraß. Trägt am Ende etwa die Sonne selber daran die Schuld? Die Astrophysik, die sich für dieses kurzwellige Spektralende besonders interessiert, dehnte die Untersuchungen auch auf andere Fixsterne aus, mußte jedoch feststellen, daß das Spektrum von sogar noch heißeren Sternen bei der gleichen Grenze wie bei der Sonne abgeschnitten wird. Ferner ist die Kürzung des Spektrums umso stärker, je tiefer die Sonne steht. Diese und eine Reihe weiterer Umstände führten dazu, die Ursache nicht auf der Sonne, sondern in der Erdatmosphäre zu suchen.

Der Engländer Hartley¹⁾ hat nun mit seiner vor mehr als 60 Jahren geäußerten Vermutung Recht behalten, daß ein gasförmiger Bestandteil der Atmosphäre, nämlich das O z o n, der Räuber der ultravioletten Sonnenstrahlen sei. Dieses Ozon, das mittelst chemischer Methoden schon um die Mitte des letzten Jahrhunderts in der Luft nachgewiesen werden konnte, ist eine besonders schwere Abart des Sauerstoffs mit einem Molekül, das aus drei Atomen besteht, anstatt der gewöhnlichen zwei. Aus Sauerstoff bildet sich Ozon immer dann, wenn Energie in irgend einer Form auf die Sauerstoffmoleküle einwirkt. Den Ozongeruch bemerkt man ja auch in der Nähe einer tätigen Elektrysiermaschine, wenn zahlreiche Funken durch den Luftsauerstoff schlagen. Im Laboratorium hatte Hartley das Spektrum einer passenden Lichtquelle durch solche ozonisierte Luft hindurch aufgenommen und dabei gefunden, daß das Ozon ein ganzes Lichtband von bestimmten Wellenlängen verschluckt oder absorbiert. Diese Absorptionsbande wird nach ihrem Entdecker benannt.

Das Resultat einer späteren genaueren Untersuchung²⁾ ist in Figur 2, Kurve 1, enthalten, in welcher als Maß der Lichtschwächung die Ozonabsorptionskoeffizienten pro Zentimeter Schichtlänge in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ aufgetra-

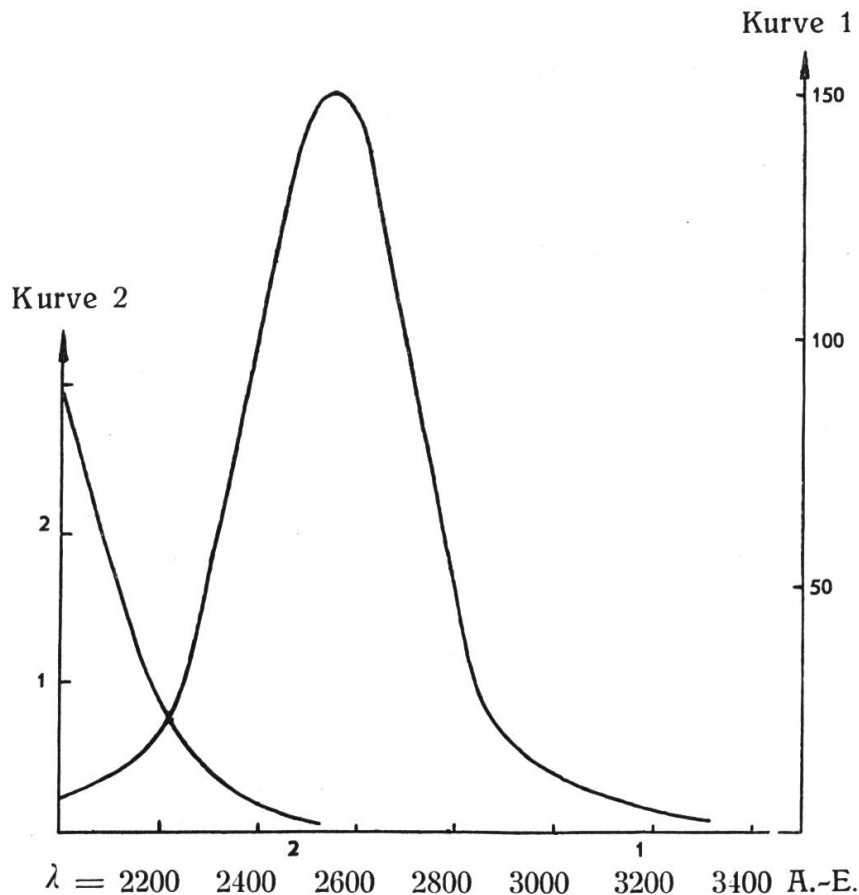


Fig. 2. Lichtschwächung im Ultraviolett

Kurve 1: Ozonabsorptionskoeffizienten pro cm

Kurve 2: Sauerstoffabsorptionskoeffizienten pro km

gen sind. Die Intensitätsschwächung beginnt bei $\lambda = 3200$ A.-E. im ultravioletten Teil des Spektrums und nimmt für eine kleine Verminderung der Wellenlänge enorm zu. Auf diese Weise führt das atmosphärische Ozon, selbst wenn es nur in kleinen Mengen vorhanden ist, rasch zum vorzeitigen Ende des Sonnenspektrums. Was auf der Wellenleiter unterhalb 290 Millionstel Millimeter, d.h. unterhalb $\lambda = 2900$ A.-E. liegt, wird vom Ozon praktisch vollständig verschluckt. Bei $\lambda = 2500$ A.-E. erreicht die Absorption so große Werte wie bei Metallen. Unterhalb dieses Absorptionsmaxismus, also nach kürzeren Wellen hin, wird das Ozon in gleichem Maße wieder lichtdurchlässiger. Diese Tatsache führt zu wichtigen, bald zu erörternden Konsequenzen.

Der Ausfall der roten und infraroten Wellenlängen des Sonnenspektrums kann der Gegenwart von anderen Gasen und dampf-

förmigen Bestandteilen der Erdatmosphäre, wie Sauerstoff, Stickstoff, Kohlendioxyd und Wasserdampf zugeschrieben werden. Unser Thema führt uns jedoch mehr nach der ultravioletten Seite hin. Aber bei welcher Wellenlänge liegt nun eigentlich die Grenze des Sonnenspektrums? Bis heute ist nach einer spektralphotographischen Methode³⁾ in Arosa bei dreistündiger Belichtung als kürzeste Wellenlänge $\lambda = 2863$ A.-E. nachgewiesen worden. Die Intensität dieses ultravioletten Sonnenlichtes ist dabei schon auf den 100millionsten Teil des extraterrestrischen Wertes geschwächt. Mit viel empfindlicheren Instrumenten, den sog. Lichtzählrohren,⁴⁾ konnten wir bei Messungen der Sonnenstrahlung auf dem Jungfrauoch jedoch bis etwa $\lambda = 2840$ A.-E. vordringen,⁵⁾ wie aus Figur 3, Kurve 2, ersichtlich ist. An dieser Stelle des Spektrums dürfte die Lichtintensität etwa auf den milliardsten Teil des außerirdischen Betrages gesunken sein. Dann ist es wohl hoffnungslos, auf der Erde noch kürzere, von der Sonne mit Sicherheit ausgestrahlte Wellenlängen registrieren zu können? Darüber gibt einer der nächsten Abschnitte im Zusammenhang mit den Absorptionsverhältnissen des Ozons Auskunft.

Im Verhältnis zur Gesamtintensität der Sonnenstrahlung ergibt sich infolge des Ozons allerdings nur eine relativ geringe Lichteinbuße von rund 5%. Nun ist aber zu bedenken, daß diese Einbuße gerade auf diejenigen kurzwelligsten Teile des ultravioletten Sonnenlichtes entfällt, welche die biologisch wirksamen Strahlen enthalten in Bezug auf die Bakterienabtötung, auf den Sonnenbrand oder das Erythem, und vor allem in Bezug auf die Bildung jenes Vitamins, das für die Verhütung und Heilung von Rachitis notwendig ist. Da nun die Sonnenstrahlung als einzige von allen Klimawirkungen in die Tiefe des Körpers eindringt, ist es biologisch und übrigens auch astrophysikalisch von großer Wichtigkeit, auf die alte Frage hinzuweisen, die zuerst von E. Meyer, Zürich,⁶⁾ gestellt wurde, ob uns nach dem biologischen Dunkel der Hartley'schen Ozonabsorption auch noch oder wieder ultraviolettes Sonnenlicht erreichen könne. Dieses Licht wäre extrem kurzwellig, deshalb äußerst energiereich, und müßte die Wirkungen des langwelligeren Ultravioletts um ein Vielfaches übertreffen. Da ja das Ozon unterhalb der Wellenlänge 2500

A.-E. wieder mehr Licht durchläßt (vergl. Figur 2, Kurve 1) und die Lichtschwächung durch einen anderen Bestandteil der Atmosphäre, den Sauerstoff, erst bei $\lambda = 2000$ A.-E. stark ansteigt, wie die Kurve 2 der Figur 2 zeigt, kann man auf Grund der Strahlungsgesetze und bei Kenntnis der atmosphärischen Absorption berechnen, daß in der Gegend von $\lambda = 2150$ A.-E., d. h. in derjenigen Lücke des Spektrums, in welcher die kombinierte Absorption von Ozon und Sauerstoff ein Minimum, die Luft also eine maximale relative Durchlässigkeit erreicht, wieder oder noch etwas Licht bis auf die Erde oder doch bis auf eine bestimmte Höhe durchdringt.

In Figur 3 sind in der ausgezogenen Kurve 1 die in der Höhe des Jungfraujochs, also auf 3450 m ü. M. herrschenden

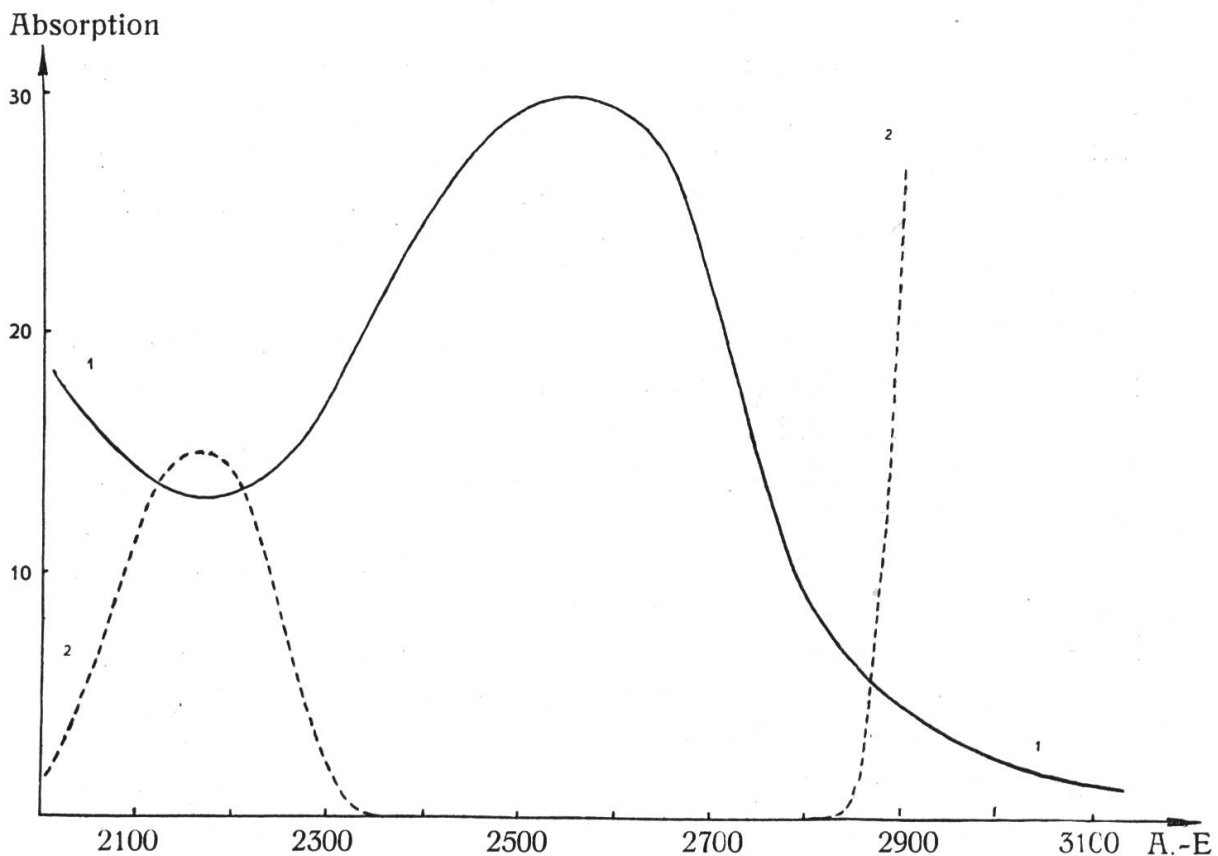


Fig. 3. Atmosphärische Absorption und ultraviolette Sonnenstrahlung auf Jungfraujoch in 3500 m ü. M.

Kurve 1: Gesamtabsorptionskoeffizient infolge 0,21 cm Ozon, Luft-sauerstoff, Dunst und Rayleigh'sche Zerstreuung (s. u.)

Kurve 2: Mit Lichtzählrohr gemessene Strahlungsintensität der Sonne.

Absorptionsverhältnisse der Atmosphäre dargestellt. Die gestrichelte Kurve 2 zeigt auf dieser Höhe in relativem Maße den mit Hilfe eines Lichtzählrohres bestimmten Verlauf der Sonnenstrahlung im ultravioletten Spektralbereich zwischen 3000 und 2000 A.-E. Deutlich veranschaulicht die Kurve den steilen Intensitätsabfall unterhalb $\lambda = 2900$ A.-E., das darauf folgende praktisch absolute Dunkel sowie das vorübergehende Wiedereinsetzen der Sonnenstrahlung in der Ozon-Sauerstofflücke bei $\lambda = 2150$ A.-E. Trotzdem es sich bei diesen kurzwelligsten ultravioletten Sonnenstrahlen um Licht von verschwindender Intensität handelt, haben sie doch in mancher Hinsicht biologischer und astrophysikalischer Art eine große Bedeutung. Daß es sehr schwierig ist, diese kleinen Lichtmengen zu registrieren, ergibt sich aus der Tatsache, daß man mehr als 40 Jahre lang vergeblich nach dieser letzten Sonnenstrahlung gesucht hat. Seit etwa 10 Jahren besitzt man jedoch in den oben erwähnten, speziell für die Registrierung von ultraviolettem Licht gebauten Lichtzählrohren⁴⁾ höchst empfindliche Lichtmeßinstrumente, welche als eine neue, mehr als zehntausend Mal empfindlichere Abart der Photozelle entwickelt wurden. Bei den Lichtzählrohren wird nicht die Intensität des Stromes gemessen, welcher durch eine große Zahl von Photoelektronen hervorgerufen wird, sondern mittelst eines speziellen Gasentladungsmechanismus kann die Wirkung eines einzelnen Photoelektrons so verstärkt werden, daß es direkt nachweisbar ist. Ein automatisches Zählwerk registriert dabei die in der Zeiteinheit ausgelösten Einzelimpulse. Mit Hilfe des Lichtzählrohres, mit welchem man in der Tat äußerst kleine Lichtintensitäten messen kann, glauben wir,^{5) 7)} diese restliche Sonnenstrahlung bei der Wellenlänge 2150 A.-E. erstmals nachgewiesen zu haben, und zwar zuerst in Arosa (1900 m. ü. M.) und nachher auf dem Jungfraujoch (3450 m. ü. M.), wo die Strahlung schon zirka tausend Mal intensiver war. Hier werden die Messungen mit noch genaueren Meßmethoden⁸⁾ fortgesetzt, da noch viele Fragen, die mit diesen sich an der Grenze der Meßbarkeit bewegenden Problemen verbunden sind, einer Klärung bedürfen.

Bei Stratosphärenaufstiegen, bei welchen die Verhältnisse infolge der geringen Absorption ungleich günstiger liegen, wurde auch nach dieser kurzwelligsten Ultraviolettstrahlung der Sonne

geforscht, allerdings eher mit weniger empfindlichen photographischen Methoden,⁹⁾ sodaß ein sicherer Nachweis m. W. bis heute noch nicht gelang.

Auf Grund der optischen Eigenschaft des Ozons, ultraviolette Licht zu absorbieren, gelang den Franzosen Fabry und Buisson¹⁰⁾ im Jahre 1913 die erste quantitative Bestimmung des totalen Ozongehalts der Atmosphäre. Die Menge der ultravioletten Strahlung, welche auf die Erde gelangt, ist nicht immer gleich. Sie verändert sich noch mit der Stellung der Sonne am Himmel. Da eine bestimmte Beziehung zwischen Sonnenhöhe und Lichtintensität besteht, läßt sich dadurch die Ozonmenge feststellen. Das Resultat bedeutet in mancher Hinsicht eine Ueberraschung. Wäre nämlich der aus gasförmigen Stoffen bestehende, der Erdoberfläche überlagerte Luftozean, auf dessen Grunde wir leben und der ohne obere Grenze allmählich in das „Nicht ganz Leere“, das wir Weltenraum nennen, übergeht, wie eine Flüssigkeit, z. B. Wasser, bei gleichem Druck und gleicher Dichte wie am Boden geschichtet, so würde seine Höhe fast 8 km betragen. Und von diesen 8 km kämen nur etwa 3 mm auf das gesamte Ozon! Ist nun diese kleine Menge, die man sich zuerst gleich einem dünnen Fenster oder einem Schirm über die Erde ausgespannt vorstellte, für unser Leben wirklich so ungeheuer wichtig? Die folgenden Ausführungen zeigen, daß es in der Tat so ist: Das Leben von uns allen wird sehr weitgehend von dieser nur 3 mm dicken Ozonschicht beeinflußt.

Die bedeutungsvolle Frage, wie eigentlich das Ozon in der Erdatmosphäre in vertikaler Richtung verteilt sei, konnte erst in jüngster Zeit richtig beantwortet werden, als man die Methode zur Bestimmung des Ozongehaltes änderte. Fabry und Buisson hatten zufolge bestimmter Annahmen aus ihren Messungen geschlossen, daß das gesamte Ozon im wesentlichen in einer wenig ausgedehnten Kugelschale in einer Höhe von 50 km konzentriert sei. Bei dieser Sachlage schien der Wunsch vieler Forscher, mit Meßinstrumenten über die Ozonschicht hinauf zu dringen, um die kurzwellige Strahlung der Sonne oder gar anderer Himmelskörper in einem bestimmten Bezirk des ultravioletten Spektrums zu er-

forschen, ins Reich der Unmöglichkeit entrückt. Günstigerweise kam nun P. Götz, Leiter des Lichtklimatischen Observatoriums in Arosa, auf den Gedanken, statt des direkten Sonnenlichtes das senkrecht über dem Beobachtungsort in der Erdatmosphäre gestreute Himmelslicht zu untersuchen. Dieses Zenithlicht entsteht durch die sog. Rayleigh'sche Zerstreuung von Licht an den Luftmolekülen. Jedes der ungezählten Luft- oder auch Staub- und Wasserdampfteilchen der Atmosphäre fängt einige Sonnenstrahlen ein und zerstreut sie nach allen Richtungen. Viele dieser zerstreuten Strahlen gelangen in unsere Augen, weshalb der Himmel uns hell erscheint. Die blaue Farbe kommt daher, daß die verschiedenen Wellenlängen des Sonnenlichtes von den kleinen Partikeln nicht auf die gleiche Art behandelt werden. Je kurzwelliger das Licht ist, umso kräftiger wird es zerstreut, blaues Licht also wirksamer als rotes. Wenn wir daher zum Himmel aufblicken, kommen mehr blaue und violette Strahlen in unsere Augen. So ist es verständlich, daß das Zenithlicht zwar wesentlich schwächer als das direkte Sonnenlicht, dafür aber verhältnismäßig reicher an kurzwelliger Ultraviolettstrahlung ist. Bei den Messungen werden nun Wellenlängen im Ozonabsorptionsgebiet mit solchen außerhalb desselben verglichen und zwar bei verschiedenen Sonnenständen. Der spannendste Moment ist dann erreicht, wenn die Sonnenhöhe noch etwa 5 Grad beträgt. Während bis zu diesem Punkte die kurzwellige Ultraviolettstrahlung, wie zu erwarten, relativ rascher als die langwellige abnimmt, kehrt sich jetzt diese Qualitätsverschlechterung in den nächsten Minuten gegen Sonnenuntergang wieder in eine Qualitätsverbesserung zugunsten der kurzwelligeren Strahlung um, weswegen die entsprechende Kurve ein deutliches Minimum passiert und hierauf wieder ansteigt, wie in Figur 4 ersichtlich ist.

Diese merkwürdige Erscheinung wurde von ihrem Entdecker Götz als Umkehreffekt bezeichnet und zum ersten Male anlässlich Ozonmessungen auf Spitzbergen im Jahre 1929 beobachtet.¹¹⁾ Da es sich bei diesem atmosphärisch-physikalischen Problem ebenfalls um die Registrierung von außerordentlich kleinen ultravioletten Lichtintensitäten handelt, konnte dieser Umkehreffekt, welcher möglichst lange bis in die Dämmerung hinein verfolgt werden

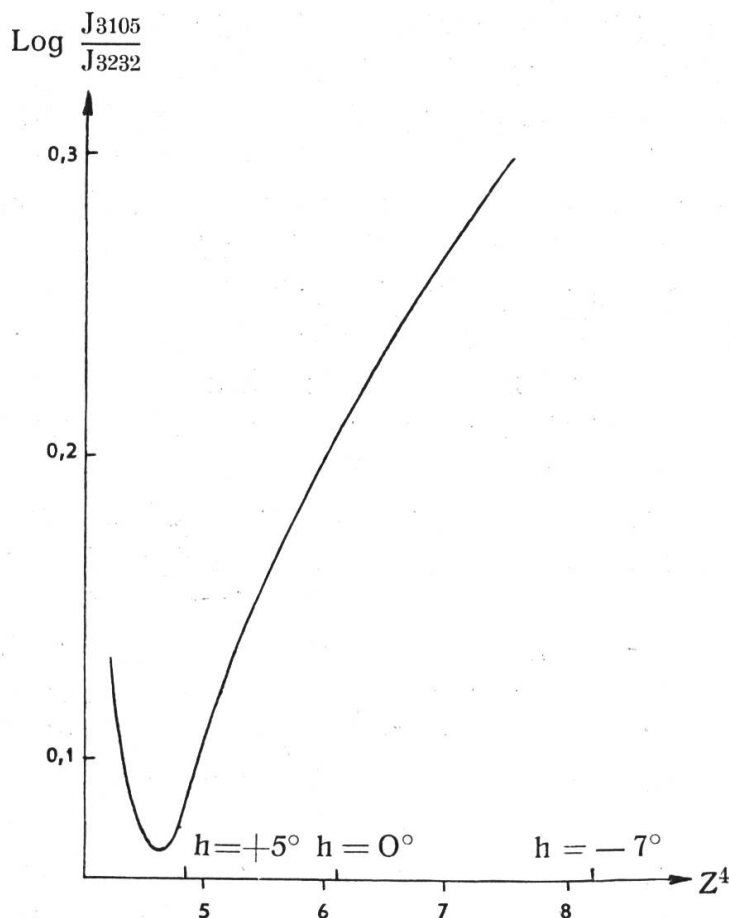


Fig. 4. Umkehreffekt: Im Spektrum des Zenitlichtes nimmt das Intensitätsverhältnis $J\lambda_1 : J\lambda_2$ ($\lambda_1 = 3105$ Å.-E., $\lambda_2 = 3232$ Å.-E.) mit abnehmender Sonnenhöhe h , also zunehmender Zenithdistanz Z ab, erreicht aber bei etwa $h = +5^\circ$ ein Minimum (Umkehrpunkt) und nimmt bei weiter wachsendem Z wieder zu. Zur deutlicheren Darstellung wird $\text{Log } (J\lambda_1 : J\lambda_2)$ als Funktion von Z^4 aufgetragen.

muß, mit der lichtstärksten Meßanordnung, der Lichtzählrohrmethode,⁴⁾ wiederholt erfolgreich untersucht werden, so in Arosa¹²⁾ und später auf der Hochalpinen Forschungsstation Jungfrauoch.¹³⁾

Der Umkehreffekt, welcher zuerst von Götz als Folge der Einlagerung des absorbierenden Ozons in die zerstreue Atmosphäre gedeutet wurde, zeigt deutlich, daß das Ozon bis dahin in viel zu großen Höhen angenommen wurde. Die mathematische Auswertung der Umkehrkurven liefert nicht nur die richtige Schwerpunktshöhe der Ozonosphäre, sondern gestattet auch, die

vertikale Verteilung des Ozons in der Erdatmosphäre zu berechnen. Diese zeitraubende Arbeit haben Götz und seine Mitarbeiter Dobson und Meetham¹⁴⁾ durchgeführt und folgendes in Figur 5 dargestelltes Ergebnis gefunden: Als Funktion der Höhe über Meer wird dabei der Aequivalentbetrag des Ozons pro km aufgetragen, d. h. diejenige in Zentimetern ausgedrückte Schichtlänge reinen, unter normalen Verhältnissen stehenden Ozons, welche die gleiche Absorption wie das in 1 km Luftstrecke des Beobachtungsraumes enthaltene Ozon ergeben würde. Für die Umrechnung der Ozonschichtlänge in Ozongewicht gilt die Beziehung: 0,001 cm pro km bedeuten so viel wie 2,2 Milligramm pro 100 Kubikmeter Luft.

Höhe in km

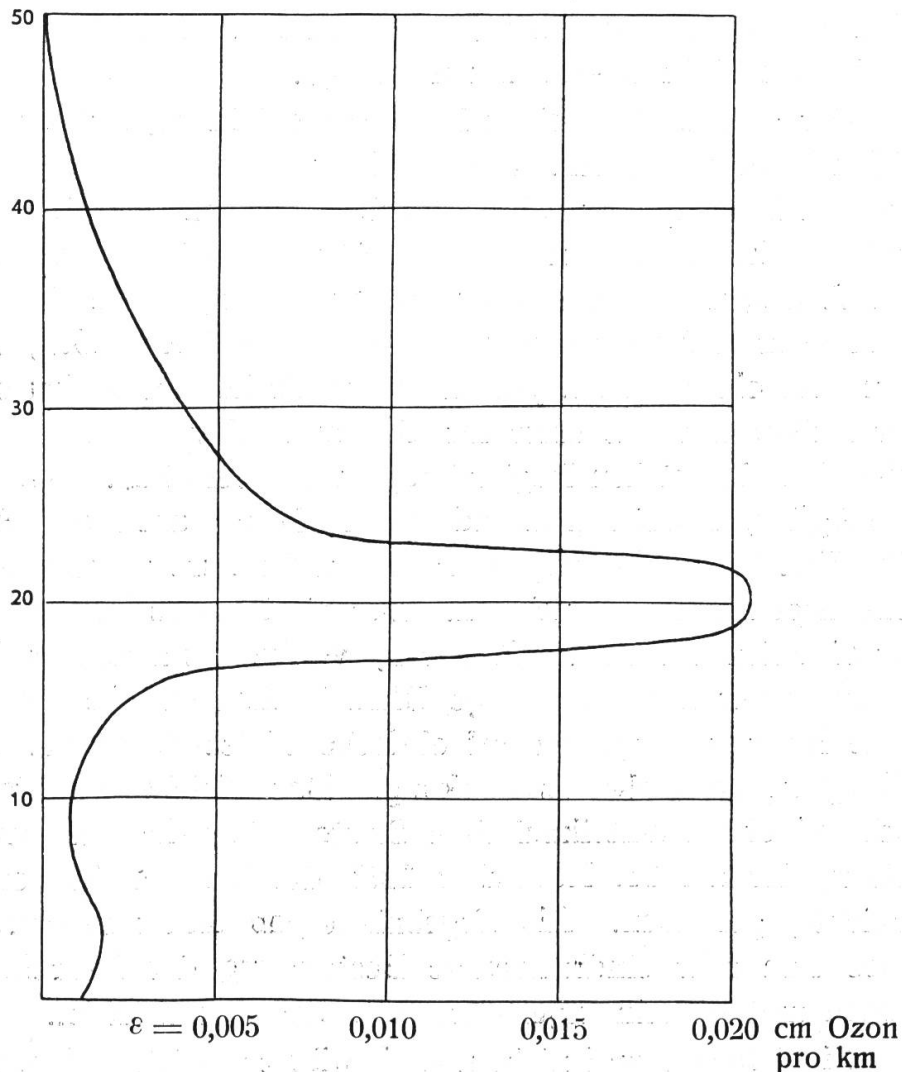


Fig. 5. Vertikale Ozonverteilung in der Atmosphäre für 0,20 cm Ozon. (Arosa).

Wie Figur 5 erklärt, steigt der Ozongehalt der Luft vom Erdboden aus mit wachsender Höhe zunächst ziemlich langsam an. Von 15 km Höhe an, vor allem bei 17 km, wird der Anstieg jedoch beträchtlich und in 21 km Höhe erreicht er ein scharfes Maximum von 0,020 cm pro km. Dem Gewicht nach macht hier indessen das Ozon nur etwa 0,5 Milligramm auf den Kubikmeter Luft aus. Selbst das gesamte Ozon wiegt angenähert nicht mehr als eine Schicht dünnsten Seidenpapiers. Bis 45 km nimmt der Ozongehalt rasch wieder ab, und in 50 km Höhe hat es fast gar kein Ozon mehr. Ohne Auswirkung der Bodeneinflüsse würde sich in Meeresniveau noch ein Betrag von rund 0,003 cm pro km ergeben, also noch etwa 1% des gesamten Ozons. In größere Abschnitte zusammengefaßt, hat es demnach in 0—5 km Höhe zirka 4% des totalen Ozonbetrages, in 5—20 km 40%, in 20—35 km 50% und in 35—50 km noch 6%.

Der größte Ozongehalt ist also nicht in 50, sondern in rund 25 km Höhe zu suchen. Solche Höhen können aber auch von bemannten Stratosphärenballons erreicht werden. Die direkte Nachprüfung der vertikalen Ozonverteilung wurde zuerst durch E. und V. Regener⁹⁾ in Stuttgart unternommen, indem sie mehrmals einen zwar nicht bemannten Pilotballon steigen ließen, von welchen aber einer am 31. Juli 1934 eine Höhe von 31 km erreichte. Der Ballon war mit einer nur 5 Pfund schweren, selbsttätig arbeitenden sinnreichen Registrierapparatur versehen. Dadurch war es möglich, sowohl während des Auf- als auch des Abstieges mit Hilfe eines Quarzspektrographen in kurzen Intervallen das Sonnenspektrum aufzunehmen. Der photometrische Vergleich der ultravioletten Enden der Spektren, welche mit zunehmender Höhe immer weiter ins kurzwellige Ultraviolett vorstießen, sowie eine kurze Rechnung ergaben auf einfache Weise direkt die Ozonverteilung in vertikaler Erstreckung. Das gleiche Resultat wurde auch bei einem amerikanischen Stratosphärenflug mit bemanntem Ballon, der am 11. November 1935 die Rekordhöhe von 22 km erreichte, gefunden. Als Ergebnis ergab sich nun erfreulicherweise eine sehr eindrucksvolle Bestätigung der indirekten Messungen und Berechnungen von Götz und Mitarbeitern.

Nicht immer und nicht überall gibt es gleich viel oder besser gleich wenig Ozon. In unseren Breiten hat es davon im Früh-

ling am meisten, nämlich im Durchschnitt etwa 3 mm. Gegen den Herbst hin nimmt das Ozon immer mehr ab und erreicht ein Minimum von zirka 2 mm. Diese Mittelwerte können jedoch gelegentlich nicht unwesentlich überschritten werden. So beträgt bis jetzt das in Arosa festgestellte absolute Maximum 4,2 mm (1929) und das absolute Minimum 1,5 mm (1942). Figur 6 zeigt ferner die meridionale Verteilung des Ozongehaltes auf der Erde.

Ozon in mm

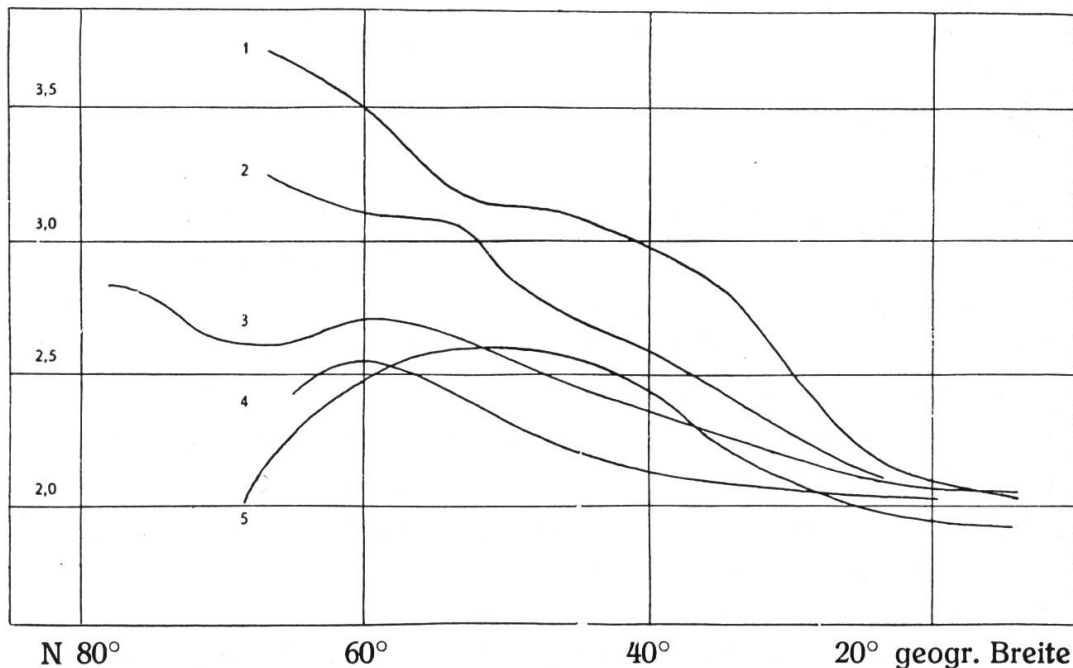


Fig. 6. Meridionale Ozonverteilung.

Kurve 1: April Kurve 3: Juli-August
 Kurve 2: Mai-Juni Kurve 4: September
 Kurve 5: Dezember

Wir stellen eine unregelmäßige Zunahme mit der geographischen Breite und einen stärker ausgeprägten Jahresgang gegen die Pole hin fest. Im Laufe des Sommers bildet sich ein nach höheren Breiten hin fortschreitendes und sich verstärkendes Minimum, eine Art Ozonloch, aus. Die Kenntnis der Ozonverteilung über die ganze Erde und die zeitlichen Änderungen des Ozonbetrages in den jährlichen sowie in den geringeren täglichen Schwankungen gewährt uns einen Ueberblick über den ultravioletten Lichthaushalt unseres Planeten. Jede Schwankung des atmosphärischen Ozons muß nun aufs stärkste in den Intensitätsänderungen des

kurzwelligen, biologisch so wichtigen Ultraviolets, welches vom Ozon eben noch durchgelassen wird, zum Ausdruck kommen. Aus diesem Grunde besteht ein untrennbarer Zusammenhang zwischen der Ozonforschung einerseits und der Untersuchung der kurzwelligen ultravioletten Sonnenstrahlung andererseits.

Dabei wird naturgemäß auch die Frage der Entstehung des Ozons in der Erdatmosphäre berührt. Wie schon erwähnt, entsteht das Ozon aus Sauerstoff unter Einwirkung von Energie, welche in diesem Falle von den ultravioletten Sonnenstrahlen unterhalb der Wellenlänge 2000 Å.-E. geliefert wird. Nach einem photochemischen Prozeß wird diese Strahlungsenergie hoch oben in der Stratosphäre vom Luftsauerstoff aufgenommen. Dies bewirkt einen beträchtlichen Temperaturanstieg in diesen Höhen und damit stehen die merkwürdigen Erscheinungen der anomalen Schallausbreitung auf der Erdoberfläche im Zusammenhang, nach welchen es eine sog. Zone des Schweigens gibt, in die der Schall nicht eindringt, obgleich er auf beiden Seiten hörbar ist. Dieses Phänomen findet darin seine Erklärung, daß von der Erde aufsteigende Schallstrahlen an hochgelegenen Luftschichten höherer Temperatur wieder zur Erde zurück reflektiert werden. — Mit Hilfe der absorbierten Sonnenenergie erfolgt nun die Bildung des Ozons in mehreren Phasen. Als erste ist die Dissoziation oder Spaltung der Sauerstoffmoleküle O_2 in Sauerstoffatome O zu nennen:



Hierauf vollzieht sich im wesentlichen die Gruppierung der chemischen Bausteine zum Ozonmolekül unter Mitwirkung irgend eines aus gaskinetischen Gründen erforderlichen Stoßpartners M :



Das Ozon kann jedoch als solches nicht lange Zeit bestehen. Infolge der Absorption des langwelligeren ultravioletten Sonnenlichtes im Gebiete der Hartley'schen Absorptionsbande wird es teilweise wieder in das Ausgangsprodukt O_2 , also Sauerstoff, zurückverwandelt, wobei mit höherer Temperatur und vor allem mit geringerem Druck die Desozonisierung rasch zunimmt.



und ferner:



Aus den beiden entgegengesetzt wirkenden photochemischen Prozessen — Bildung und Rückverwandlung des Ozons — muß ein stationärer Gleichgewichtszustand resultieren:



Dieser Zustand ist offenbar ziemlich träge. Es können aber auch stabile Gleichgewichtszustände einmal eine Störung erfahren, wenn im Laufe von entwicklungsgeschichtlichen Zeiträumen äußere Faktoren dazu den Anstoß geben. Im Falle des Ozons müßten sich eventuelle Änderungen besonders katastrophal auf unsere Lebensbedingungen auswirken.

Wir kommen damit zur Behandlung der Frage, wie denn die vom Ozon gerade noch durchgelassene ultraviolette Sonnenstrahlung auf unseren Organismus einwirkt. Wenn wir diese Wellen auch mit dem Auge nicht mehr wahrnehmen können, so üben sie doch physiologische Wirkungen aus. In unserer Haut besitzen wir nämlich ein sehr zuverlässiges und empfindliches Anzeigegerät: Wir werden braun! Vom Gesichtspunkt der Anpassung aus ist es interessant, daß die größte Empfindlichkeit der Haut gerade in diesem Gebiet der kürzesten Ultraviolettwellenlängen liegt. Daß das Ozon nicht alle ultravioletten Strahlen zurückbehält, bedeutet ein glücklicher Umstand, weil ein gewisses Maß davon uns zuträglich, ja für uns lebensnotwendig ist. Die Ozonschicht überwacht unsere Versorgung mit ultravioletten Sonnenstrahlen. Sie läßt uns im allgemeinen gerade so viel zukommen, als für unsere Gesundheit erforderlich ist. Diese gute Behandlung der Atmosphäre liegt jedoch eher darin begründet, daß unser Körper nach Millionen von Generationen gelernt hat, sich mit dem einzurichten, was ihm zugemessen erscheint. Hätten wir diese Zeit hindurch auf irgend einem anderen Planeten unter anderen Bedingungen gelebt, so würden wir vielleicht die Dosis der ultravioletten Strahlung auf unserer Erde unerträglich finden. Die Untersuchung dieser Fragen bedingt das Studium des Strahlungsklimas der menschlichen Haut.¹⁵⁾ In Figur 7 ist dazu die prozentuale Durchlässigkeit der verschiedenen Hautschichten für die verschiedenen Wellenlängen der Sonnenstrahlung dargestellt. Die Zahlen geben an, wieviel Prozent der einfallenden Intensität, welche gleich 100 % gesetzt ist, an der Unterfläche der verschie-

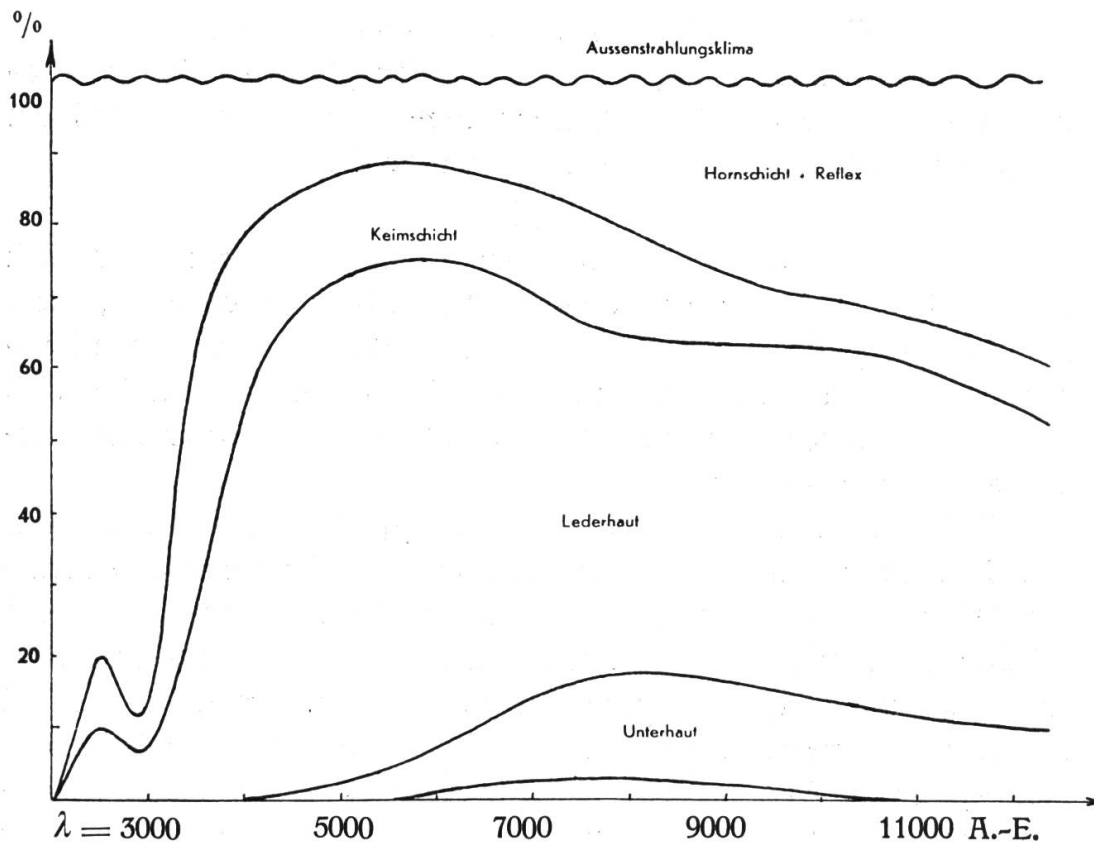


Fig. 7. Änderung des Strahlungsklimas beim Durchtritt durch die Haut: Die applizierte Intensität jeder Wellenlänge ist 100% gesetzt. Die beiden ein Areal begrenzenden Linien zeigen die in eine Hautschicht einfallenden und die durch diese Schicht hindurchtretenden Intensitäten an. Da ein Teil der einfallenden Intensität schon an der Oberfläche durch Reflexion verloren geht, ist die wirkliche Durchlässigkeit der Haut größer.

denen Hautschichten noch vorhanden sind. Trotzdem die Absorption des Lichtes in der menschlichen Haut noch nicht ausreichend bekannt ist, zeigt es sich, daß die kurzwelligsten Strahlen von 2000—3000 Å.-E. schon in der obersten Hautschicht, der etwa 3 mm dicken Hornschicht zum weitaus größten Teil zurückgehalten werden, während diese für sichtbares Licht im Wellenlängenbereich von 4000—8000 Å.-E. recht gut durchlässig ist. Das Maximum mit 87% Durchlässigkeit liegt im Gelbgrünen bei der Wellenlänge 5500 Å.-E. Durch das Blut, welches im Grün-gelben eine sehr beträchtliche selektive Absorption aufweist, wird das Durchlässigkeitsoptimum in tiefere Hautschichten verlagert. Die zirka 1,5 mm dicke Lederhaut läßt im roten Spektralbereich bei der Wellenlänge 7500 Å.-E. am meisten Licht durch. Im

Infrarot wird die Durchlässigkeit durch das Wasser herab gedrückt. Durch das 23 mm messende Unterhautgewebe tritt nur im Rot noch eine geringe Strahlenmenge durch.

Während also der Sitz der solaren Wärmewirkung in ziemlicher Tiefe zu suchen ist (1—2% vermögen noch bis 2,5 cm Tiefe einzudringen), müssen sich die primären Ultraviolett-erscheinungen, wie Hautrötung und Vitaminbildung, in der obersten Hautschicht abspielen. Die physiologisch wirksame Sonnenstrahlung aus dem Wellenlängenbereich um zirka 3000 Å.-E. vermag nämlich ohne Wärmewirkung auf photochemischem Wege eine Hautrötung, ein sog. Erythem, hervorzurufen. Dieses entsteht, indem die Ultraviolettstrahlung aus dem Eiweiß der Haut, besonders dem Histidin, das Histamin erzeugt, welches als Kapillargift wirkt und durch die damit verbundene Erweiterung der oberflächlichen Blutgefäße eine stärkere Durchblutung der Oberhaut einleitet. Nach ein bis drei Tagen geht die Hautrötung in eine Pigmentierung oder Bräunung über, wobei die Farbe des zum Schutze gegen den Sonnenbrand entstandenen Pigmentes von der spektralen Zusammensetzung der wirksamen Strahlung abhängt. Die Pigmentierung ist wohl ein Schutz gegen die Ultraviolettstrahlung, aber im Grunde doch vielmehr ein Symptom im Sinne einer indirekten Prüfung. Die volle Fähigkeit, Pigment zu bilden und regulär abzulagern, gibt einen Hinweis dafür, daß gewisse physiologische Funktionen in Ordnung sind. Durch Versuche bei abgeblendeter Sonne wurde übrigens bewiesen, daß es ein Erythem durch das Himmelslicht allein gibt. Mit der hohen Empfindlichkeit der Haut hängt auch die Erscheinung zusammen, daß man im Frühling stärker und schneller gebräunt wird als im Herbst, trotzdem im letzteren Zeitpunkt weniger Ozon und damit mehr Ultraviolettstrahlung als im Frühjahr vorhanden ist. Nach den Monaten des lange entbehrten Sonnenlichtes ist die Haut eben viel reaktionsfähiger als im Herbst, wo sie sich der Lichtfülle eher wieder angepaßt hat. Der wirksame Spektralbereich beginnt etwa bei der Wellenlänge 3130 Å.-E. Nach kürzeren Wellen hin steigt die Wirksamkeit rasch an und erreicht zwischen 3030 und 2970 Å.-E. das Maximum, also gerade in jenem Gebiet, das nur unter günstigen Bedingungen zur Erdoberfläche gelangt. Unterhalb dieses Spektralbereiches sinkt die Wirksamkeit wieder ab und

gelangt bei $\lambda = 2800$ A.-E. zu ihrem Minimum. Bei 2500 A.-E. steigt sie allerdings wieder etwas an, doch kommt dieses Gebiet für die natürliche Sonnenstrahlung ja nicht mehr in Frage, wohl aber für die künstliche „Höhensonne“, die Quarzquecksilberlampe, mittelst welcher die natürliche Strahlung weitgehend nachgeahmt werden kann.

Aus der Erfahrung ist bekannt, daß die Dosierung der Ultraviolettstrahlung mit großer Vorsicht gehandhabt werden muß. So heilsam das besonders im Hochgebirge intensive Sonnenultraviolett bei sachgemäßer Dosierung erscheint, so unheilsam kann sich ein Zuviel an dieser Strahlung auf den Organismus auswirken. Wenn bei steigender Tätigkeit der Sonne deren Strahlung vielmals stärker oder wenn die Maschen des Ozonfilters sich erweitern oder gar das Ozon ganz aus der Atmosphäre verschwinden würde, wenn es also den ultravioletten Wellen aus irgend welchen Gründen plötzlich gelingen sollte, in größeren Mengen die Lufthülle zu durchdringen, so würde uns diese intensive Sonnenstrahlung ohne Zweifel in kurzer Zeit verbrennen. Der Lichtüberfluß führte über verstärkte Hautrötung zu Blasenbildungen und später auch zu Krebsgeschwüren. Zuerst würden wir braun, dann schwarz und innert kurzer Frist sterben. Aber auch bei geringerer Zunahme der wirksamen Lichtintensität litten wir unter sehr tiefgreifenden Folgen der Lichtfülle. Bestimmte Tierversuche deuten nämlich darauf hin, daß die Erbmasse schwerwiegende Veränderungen erleiden müßte. „Ohne Licht kein Leben“ heißt ein alter Satz, welcher aber auch die Tatsache enthält, daß dieses Licht dem Leben nur dann nützlich sein kann, wenn es richtig dosiert ist. Diese richtige Dosierung der ultravioletten Reizstrahlung der Sonne, deren Erythemwirkungsvermögen außerhalb und am Grunde der Atmosphäre in Figur 8 zu vergleichen ist, übernimmt nun eben das hohe Ozon, sodaß unser Leben tatsächlich durch nur 3 mm Ozon geschützt wird.

Dem eindrucksvollsten aller bioklimatischen Strahlungseinflüsse, der rachitisheilenden Wirkung der Ultraviolettstrahlung, sei eine etwas ausführlichere Darstellung gewidmet. Bedeutet nämlich ein Zuviel an biologisch wirksamem Ultraviolett ein Unglück, so wäre aber auch ein Zuwenig davon nicht weniger katastrophal. Die neuesten Forschungen bestätigen immer mehr die

Größe des Wunders, welches mit jenen lebenswichtigen Hilfsstoffen, den Vitaminen, verbunden ist, die gleich einer Armee von Heizenmännchen den komplizierten Körperhaushalt besorgen. Für unsere Betrachtungen ausschlaggebend ist nun die Tatsache, daß ein großer Teil von diesen Vitaminen ohne die Mitwirkung von

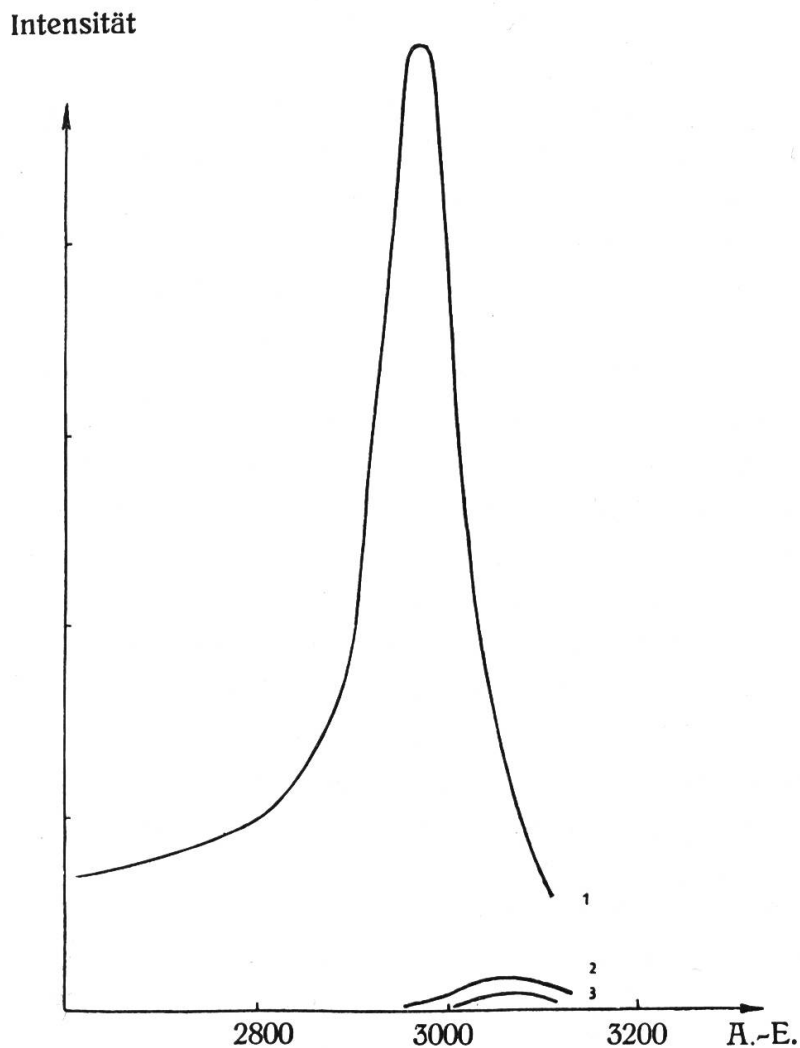


Fig. 8. Erythemwirkungsvermögen der Sonnenstrahlung:

Kurve 1: extraterrestrisch,
 „ 2: Arosa, Monat Juni, 12 Uhr,
 „ 3: „ „ „ 8 Uhr.

ultraviolettem Lichte nicht denkbar ist. Unter den Vitaminen, welche in der Reihenfolge ihrer Entdeckung mit den Buchstaben A, B, C, D, E usw. numeriert sind, herrscht eine zweckmäßige Berufs- und Arbeitsteilung. Es hat Hilfskräfte, welche den Transport der Nährstoffe regeln; andere sorgen für eine gesunde

Haut, wieder andere übernehmen die Zufuhr des verdauten Fettes und Zuckers und heizen damit die Körperzellen. Dann gibt es sogar Heinzelmannchen, die sozusagen als Maurer arbeiten und unser Knochengerüst aufbauen und erneuern. Ohne ihre Arbeit werden die Knochen brüchig und Knochenbrüche heilen schlecht oder gar nicht mehr. Wenn im frühen Kindesalter nicht mehr an den Knochen gebaut wird, werden sie weich und schwach und vermögen die Schwere des Körpers nicht zu tragen. Als Folge dieser Wachstumsstörung entsteht eine Verkrümmung der Wirbelsäule und andere dauernde Verbildungen des Skelettsystems. Mangelhafte Ernährungsverhältnisse, wie sie in Kriegszeiten auftreten, vor allem einseitige oder unrichtig zusammengestellte Nahrung, bilden nun eine der Grundlagen für diese nach ihrer Entdeckung in England als englische Krankheit oder dann als Rachitis bezeichnete Mangelkrankheit. Es fiel auf, daß die Krankheitssymptome sich jeweils in den Wintermonaten häuften. Teilweise schon im Februar und März setzten dann Heilungserscheinungen ein, deren Häufigkeit und Ausmaß im Sommer sprunghaft in die Höhe ging und bis in den Oktober hinein zunahm. Im November und Dezember war die Heilungstendenz wieder beträchtlich gesunken und erreichte im Januar ihren Tiefpunkt. Dieser jahreszeitliche Verlauf wies eindeutig auf einen Einfluß des Sonnenlichtes hin. In den Tropen tritt Rachitis selten auf, und zwar wird sie nur bei Abhaltung des Sonnenlichtes in den ersten Lebensjahren gefunden. Ferner wurde beobachtet, daß in engen Alpentälern die Rachitishäufigkeit auf der Schattenseite der Täler und ebenso im Tiefland ungleich viel größer ist. Endlich war seit der Entdeckung der Rachitis in England bekannt, daß sie weitaus am häufigsten in industriellen Großstädten mit ungenügenden Wohnungsverhältnissen auftrat. Im Jahre 1919 hat der Berliner Arzt Hulschinsky entdeckt, daß Rachitis durch Bestrahlung mit der Quarzlampe geheilt werden kann, und zwar durch deren Gehalt an kurzwelliger Ultraviolettstrahlung. Damit war neben der Schutzstoffmangeltheorie auch die Strahlenmangelhypothese der Rachitisentstehung fest begründet. Ein abgerundetes Bild ergab sich jedoch erst dann, als es gelang, durch Bestrahlung gewisser Nahrungsstoffe deren antirachitische Wirksamkeit zu erhöhen. Besonders wichtig war die Entdeckung,

daß die Haut durch Bestrahlung mit dem ultravioletten Lichte der Höhensonne diese abwehrende Wirkung ebenfalls erhielt.

Als Träger dieser Heilwirkung vermutete man zuerst das Cholesterin, das im Organismus, d. h. frei im Blut als Fettsäure-ester eine große Rolle spielt. Es enthält einen aus mehreren hydrierten Benzolringen bestehenden Kern und ist der einzige tierische Vertreter der Gruppe der Sterine, von denen eine ganze Anzahl als Phytosterine im Pflanzenreiche vorkommt. Später aber lernte man den wirklichen Träger in einem dem Cholesterin verwandten Begleitstoff, dem Ergosterin, erkennen, welches allerdings erst durch eine bestimmte Bestrahlung aus dem ultravioletten Spektralgebiet unter Durchlaufung einiger Zwischenstufen aktiviert und dann D₂-Vitamin genannt wird. Damit war die Entstehung der Rachitis, dieser typischen Mangelkrankheit, sowie deren jahreszeitliche und soziale Häufigkeitsverteilung geklärt. Sonnenbestrahlung ist notwendig, um das noch unwirksame Provitamin zu aktivieren. Wenn aber dieser Stoff infolge eines Ernährungsmangels fehlt, so nützt auch die intensivste Sonnenbestrahlung nichts. In der Endwirkung scheint es dabei auf das gleiche herauszukommen, ob das Provitamin mit der Nahrung aufgenommen, in der Haut angesammelt, durch Bestrahlung aktiviert und dann auch wieder resorbiert oder der bereits aktivierte D-Faktor schon mit der Nahrung zugeführt wird. Ergosterin kommt in einer großen Anzahl pflanzlicher und tierischer Lebensmittel vor, z. B. in Speck, Mais- und Kokosöl, Spinat u. a. m. Vitamin-D-Träger sind ferner Eier, Milch und Butter. Der aus der Dorschleber gewonnene Lebertran, das altbewährte Heilmittel gegen die englische Krankheit, ist gegenwärtig allerdings kaum noch erhältlich. Günstigerweise kann der Rachitisschutzstoff, das Vitamin D, heute in reinster Form gewonnen werden, sodaß trotz Rationierung der Lebensmittel und trotz des Winters, in welcher Jahreszeit die Sonnenstrahlung nicht ausreicht, man sich durch tägliche, minimale, in öligen Lösungen verabfolgte Mengen dieses reinen Vitamins D in hohem Maße vor dem Ausbruch einer Rachitis schützen kann.

Die optischen Absorptionsverhältnisse des Ausgangsproduktes Ergosterin zeigen, durch welche Wellenlängen dasselbe in das energiereichere Vitamin D umgewandelt wird. Die Absorption

beginnt bei der Wellenlänge 3100 Å.-E, besitzt zwei Maxima bei 2700 und 2800 Å.-E. und fällt dann nach der kurzwelligen Seite hin rasch ab. Das Absorptionsspektrum des reinen Vitamins D beginnt dagegen bei einer Wellenlänge wenig oberhalb 3000 Å.-E. und hat sein Maximum bei etwa $\lambda = 2650$ Å.-E. Das Ergosterin verschluckt also gerade das vom Ozon schon beträchtlich geschwächte, aber immerhin noch durchgelassene ultraviolette Sonnenlicht von rund 3000 Å.-E. Damit liegt nun das kurzwellige Ende des natürlichen Sonnenspektrums noch im Bereich der antirachitischen Wirksamkeit, wenn auch im allgemeinen nur zu einem kleinen Teile und nur unter atmosphärisch günstigen Bedingungen. Aber auf diesen kleinen Teil, welcher zur Hauptsache durch die Ozonschicht in rund 25 km Höhe reguliert und richtig dosiert wird, kommt es dabei an! Die ultraviolette Strahlungssumme, welche zur Verhütung von Rachitis benötigt wird, hat sich, wie bestimmte Versuche zeigten, als verhältnismäßig klein erwiesen.

Was geschähe nun, wenn einmal die Ozonmenge in der Erdatmosphäre in stärkerem Maße, als es bei den periodischen Schwankungen der Fall ist, zunehmen würde? In der Folge könnte uns sehr bald überhaupt keine ultraviolette Reizstrahlung mehr erreichen. Da wir aber gesehen haben, welche Bedeutung die rachitisverhütende bzw. -heilende Wirkung des ultravioletten Sonnenlichtes für unser Leben hat, können wir annehmen, daß bei Aussetzen dieser lebensnotwendigen Strahlung unfehlbar sämtliche Lebewesen an der Mangelkrankheit Rachitis zugrunde gehen müssen, wenn diesem Strahlenmangel nicht auf künstlichem Wege abgeholfen werden kann. Man hat nämlich sogar schon das Aussterben der großen Saurier der Vorzeit an Rachitis auf den Mangel an Sonnenlicht zurückzuführen versucht, wobei man bei der zunehmenden Absorption der Sonnenstrahlung wohl auch an die Mitwirkung einer gesteigerten Trübung vulkanischen Ursprungs zu denken hat. Ebenso spekulativ ist die Erklärung des sekundären Maximums der Erythemkurve in Figur 7 bei der im Sonnenlicht nicht mehr vorhandenen Wellenlänge 2500 Å.-E., welches auf eine Zeit in der Entwicklungsgeschichte hinweist, die ohne die schützende hohe Ozonschicht war. Analog wie heute die oberste Hautschicht ausgerechnet bei der Wellenlänge 3000 Å.-E., bei welcher die Sonnenstrahlung infolge der ein-

setzenden Ozonschwächung praktisch aufhört, am meisten Licht absorbiert, so könnte früher ohne Vorhandensein von Ozon der analoge Vorgang bei der Wellenlänge 2000 A.-E. sich abgespielt haben, denn bei dieser Wellenlänge wird ja das Sonnenspektrum durch einen anderen Bestandteil der Luft, durch den Sauerstoff, endgültig abgeschnitten. (Vergl. Fig. 3, Kurve 2.) Unterhalb $\lambda = 1000$ A.-E. wird die Absorption teilweise durch den Luftstickstoff verursacht.

Weitere wichtige Wirkungen der ultravioletten Sonnenstrahlung auf den Organismus sind vorwiegend unter Verwendung von künstlichen Lichtquellen untersucht worden. Wie weit die Untersuchungsergebnisse dieser Einflüsse auf die Verhältnisse bei natürlicher Strahlung übertragen werden können, ist noch fraglich, denn das Sonnenlicht läßt sich im allgemeinen und speziell in diesem biologisch wirksamen Spektralbereich in Quantität und vor allem in Qualität nicht ohne weiteres durch künstliche Lichtquellen ersetzen. Es besteht die Tatsache, daß eine Reihe wichtiger Fragen nur durch Messungen im natürlichen Sonnenlicht gelöst werden kann. Daß die Bedeutung der Sonne und ihres kraftspendenden Lichtes für das Leben schon sehr frühzeitig erkannt worden ist, bezeugt der verbreitete Sonnenkult der ältesten Völker. Die im Laufe der Zeiten, besonders in den letzten Jahrzehnten erfolgte wissenschaftliche Bestätigung dieser Bedeutung führte zu der hochentwickelten Heliotherapie der Gegenwart, in welcher an günstig gelegenen Orten die oft an Wunder grenzende Heilwirkung der Sonnenstrahlen schon recht weitgehend zur Anwendung gelangt.

Nach der bisherigen Erwähnung der indirekten Wirkungen des atmosphärischen Ozons auf unser Leben erhebt sich die Frage, ob das Ozon auch direkt auf uns einwirken könne? Dies führt uns zum Ausgangsproblem der Ozonforschung überhaupt zurück, ob nämlich in bodennahen Luftschichten auch Ozon vorhanden sei? Steckt vielleicht doch ein Körnchen Wahrheit in dem früher so viel gerühmten Ozonreichtum der Wald- und Höhenluft gewisser Gegenden? Zur Klärung dieser Frage wurde an den verschiedensten Orten und in allen Höhenlagen in den direkt über dem Erdboden liegenden Luftschichten nach Ozon gesucht.

Die optische Methode, welche zuerst von Fabry und Buisson¹⁶⁾ in der Provence, von Götz und Ladenburg¹⁷⁾ in Arosa sowie bei den Messungen des Verfassers⁴⁾ 18) in Zürich, hier erstmals mit Hilfe des Lichtzählrohrs, verwendet wurde, besteht darin, daß man die Intensitäten der ultravioletten Linien des Quecksilberdampfspektrums einer Quarzquecksilberlampe in verschiedenen Distanzen von der Lichtquelle mißt. Auch bei diesem Problem handelt es sich oft um die Registrierung von so kleinen ultravioletten Lichtmengen, daß an Stelle spektralphotometrischer Methoden die Messung der Lichtintensität nur noch mit Hilfe des Lichtzählrohrs möglich ist. Unbeachtet der Methode — sei sie nun optischer oder neuerdings wieder chemischer Natur — konnte dann in den bodennahen Luftschichten tatsächlich jedesmal Ozon festgestellt werden. Bis heute liegen folgende Messungen vor:

Ort	Höhe in m ü. Meer	Ozon in cm pro km
Jungfrauoch	3450	0,0030
Arosa	1900	0,0023
Lauterbrunnen	800	0,0016
Chur	600	0,0018
Zürich	500	0,0010
Abisko (Schwedisch-Lappland)	380	0,0019
Provence	300	0,0022
Paris	80	0,0010
Grönland	20	0,0023
Cambridge (U.S.A.)	20	0,0014

Als Ozonbetrag der bodennahen Luftschichten ergibt sich somit etwa 1 % des gesamten atmosphärischen Ozons. Entsprechend der größeren Höhe über dem Meeresspiegel ist der durchschnittliche Ozongehalt für die Sommermonate auf dem Jungfrauoch etwas höher als in den tiefer gelegenen Orten Arosa oder Lauterbrunnen. Trotzdem zeigen sich im allgemeinen nur geringe Unterschiede im Ozongehalt in Abhängigkeit von der Höhenlage, wenn nur die Luft genügend rein ist. Da dies bei den Luftschichten über Großstädten nicht der Fall ist, erfährt dort die Ozonmenge eine sehr starke Reduktion. So fand der Verfasser bei seinen Messungen über der Stadt Zürich für die Sommermonate im Durchschnitt 0,0010 cm Ozon pro km Luftstrecke.

Dies entspricht etwa 2 Milligramm pro 100 Kubikmeter Luft. Den kleinsten Ozongehalt, der in bodennahen Luftschichten bisher gemessen wurde, konnte der Verfasser am 12. Oktober 1934 unmittelbar im Stadtdunst nachweisen, nämlich nur noch 0,00026 cm pro km = 0,57 mgr pro 100 m³ Luft. Bei starkem Dunst und Nebel ist die Luft praktisch ozonfrei.

Im Gegensatz zu diesen kleinen Ozonmengen, welche im Herbst, zumal über einer Stadt, vorkommen können, wurden über Zürich auch extrem hohe Ozonwerte festgestellt, und zwar bis zum Achtfachen des durchschnittlichen Betrages, trotzdem das hohe Ozon während der Meßzeiten mehr oder weniger konstant geblieben war. Die Meßtage, an welchen diese hohe Ozonkonzentrationen gefunden wurden, waren ausnahmslos durch einen außergewöhnlichen Witterungscharakter gekennzeichnet. So überstieg an einem dieser Tage im Monat Juli die maximale Schattentemperatur 30 Grad, und in der Folge traten heftige Gewitter mit Hagelschlag auf. Nach solchen Gewittertagen ergaben sich wiederum normale durchschnittliche Ozonwerte. Gewisse Anomalien¹⁸⁾ bei den Ozonmessungen unter Verwendung verschiedener Wellenlängen, die eigentlich alle denselben Ozonbetrag hätten ergeben sollen, führen auf die Vermutung, daß es unter bestimmten Bedingungen in den dem Erdboden am nächsten liegenden Luftschichten neben dem Ozon weitere kleine Mengen von noch zu eruierenden Stoffen geben muß, welche die Durchlässigkeit der Luft in einem bestimmten Wellenlängengebiet im Ultraviolett beträchtlich herabzusetzen vermögen.

Dürfen nun dem Ozon in dieser nachgewiesenen Verdünnung überhaupt irgend welche direkte heilklimatische Wirkungen zugeschrieben werden? Diese Frage kann auch im Hinblick auf die künstliche Klimatisierung eine gewisse Bedeutung haben. Es hat sich im Laufe der Untersuchungen jedoch gezeigt, daß für eine direkte Wirkung des Ozons auf den Menschen jeder physiologische oder klinische Anhaltspunkt fehlt, denn alle Versuche, die Heilsamkeit der Luft mit ihrem Ozongehalt in Beziehung zu bringen, sind hinfällig geblieben, weil die natürlichen Ozonkonzentrationen niemals dazu ausreichen, durch Oxydationswirkungen etwa Bakterien direkt zu zerstören. Dies tritt erst bei wesentlich

höheren Konzentrationen, wie sie auch in gewissen Teilen der Stratosphäre vorkommen, ein.

Will man das Ozon in der Medizin verwenden, so muß eine stärkere Ozonisierung der benutzten Luft vorausgegangen sein. Das im Vergleich zu Luft 1,656 mal schwerere Ozon hat in stärkeren Konzentrationen einen stechenden, schwefel- oder gar chlorartigen Geruch, welche Eigentümlichkeit ihm den Namen gab, denn Ozon kommt vom griechischen Worte ozein = riechen, ist es doch schon bei 500 000facher Verdünnung bemerkbar. Die früher beobachteten Giftwirkungen, welche allerdings nur indirekt durch das Ozon verursacht worden sind, lassen es ratsam erscheinen, das Ozon in vorsichtiger Dosierung und in statu nascendi zur therapeutischen Verwendung kommen zu lassen. Bei richtiger Anwendung wird die schmerzstillende und entzündungshemmende Wirkung dieses Gases hervorgehoben. Ferner ist es bei Keuchhusten, Asthma und Arterienentzündung oder Arteriosklerose wirksam. Wie es scheint, beschleunigt die Gegenwart von Ozon im Blut die Bildung von Oxyhämoglobin.

Die Wirkung des Ozons in der Luft besteht vor allem in der Zerstörung von gasförmigen tierischen Ausscheidungsprodukten, dem Nährboden der Mikroben, so daß dadurch Entwicklung und Fortpflanzung derselben gehemmt würden. Dabei wird der Ozongehalt der Luft reduziert, weshalb die Luft in dichtbevölkerten Städten eher ozonfrei ist. Aus ähnlichen Gründen gilt dasselbe auch für Zimmerluft. Was aber als positive Wirkung des Ozons beim Höhenklima in der Wald- und Gebirgsluft bleibt, ist die Garantie, daß bei Vorhandensein von Ozon die Luft rein ist, während die Abwesenheit desselben eher dem Verdachte Raum geben kann, die Luft enthalte der Gesundheit schädliche Stoffe. Jedenfalls liegt die große hygienische Bedeutung des Ozons in seiner oxydierenden und damit sterilisierenden Wirkung, wodurch die Salubrität der Luft eine wesentliche Erhöhung erfährt. Die sogenannte ozonreiche Waldluft enthält oft weniger Ozon als vielmehr ähnlich stark riechende ätherische Oele, welche schließlich das Wipfelklima bedingen. Es ist beim Ozon eben vielfach auch so, daß die Wohltaten desselben fast eher in den Täuschungen liegen, die es hervorruft.

Neben all diesen wirklichen oder vermeintlichen Effekten des bodennahen Ozons behält aber das hohe Ozon seine überragende biologische Bedeutung für das Leben durch die Dosierung der ultravioletten Reizstrahlung der Sonne. Zusammenfassend ist erneut zu betonen, daß jede Änderung in der Dicke der Ozonschicht und die daraus folgende Intensitätsänderung des Sonnen-Ultravioletts mit einer tiefgreifenden und nicht absehbaren Umgestaltung aller Lebensbedingungen und Lebensformen verbunden wäre. Daß die Wichtigkeit des richtigen Zusammenspiels von atmosphärischem Ozon und ultravioletter Sonnenstrahlung keine Täuschung, sondern eine sehr wirklichkeitsnahe und lebenswichtige Tatsache ist, versuchten diese Ausführungen zu zeigen.

Literaturverzeichnis und z. T. Quellennachweis.

- 1) *W. N. Hartley*, Chem. News **42**, 268, 1880.
- 2) *A. Läuchli*, Helv. Phys. Acta, **1**, 208, 1928 und
Zeitschr. f. Phys. **53**, 92, 1929.
- 3) *F. W. P. Götz*, Strahlentherapie **40**, 690, 1931.
- 4) *B. Stoll*, Helv. Phys. Acta **8**, 3, 1935.
- 5) *Edg. Meyer, M. Schein und B. Stoll*, Helv. Phys. Acta **7**, 670, 1934 und
Nature **134**, 535, 1934.
- 6) *Edg. Meyer*, Ann. d. Phys. **12**, 849, 1903.
- 7) *Edg. Meyer*, Helv. Phys. Acta **14**, 625, 1941.
- 8) *Edg. Meyer, F. Müller und K. Zuber*, Helv. Phys. Acta **12**, 415, 1939.
- 9) *E. und V. Regener*, Phys. Zeitschr. **19**, 788, 1934.
- 10) *Chr. Fabry et H. Buisson*, Journ. de Phys. (5) **3**, 196, 1913.
- 11) *F. W. P. Götz*, Gerl. Beitr. z. Geophys. **31**, 119, 1931.
- 12) *P. Götz, M. Schein und B. Stoll*, Helv. Phys. Acta **7**, 485, 1934.
- 13) *M. Schein und B. Stoll*, Helv. Phys. Acta **7**, 672, 1934.
- 14) *P. Götz, B. Dobson und R. Meetham*, Nature **132**, 281, 1933.
- 15) *H. Pfeleiderer und K. Büttner*, Handb. d. Bäder- und Klimaheilkunde von
Hch. Vogt, **2**, 777, 1940.
- 16) *Ch. Fabry et H. Buisson*, C. R. **192**, 457, 1931.
- 17) *P. Götz und R. Ladenburg*, Naturw. **19**, 373, 1931.
- 18) *P. Götz, M. Schein und B. Stoll*, Gerl. Beitr. z. Geophys. **45**, (3) 237, 1935.