

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
Band:	77 (1986)
Heft:	10
Artikel:	Stören Hochspannungsleitungen den natürlichen Ozonhaushalt in Bodennähe?
Autor:	Dütsch, H. U.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-904205

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: 23.02.2026

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

Stören Hochspannungsleitungen den natürlichen Ozonhaushalt in Bodennähe?

H.U. Dütsch

Der Ozonhaushalt in der Atmosphäre ist ein äusserst komplexes System, in das zahlreiche Substanzen involviert sind. Verschiedene Faktoren führen dazu, dass der Ozongehalt in Bodennähe stark schwankt. Abschätzungen der durch Koronaentladung an Hochspannungsleitungen erzeugten Ozonmengen zeigen, dass diese weniger als ein Prozent des natürlichen Ozonumsatzes ausmachen und damit weit unterhalb der Schwankungsbreite des natürlichen Ozongehaltes liegen.

Le système de l'ozone dans l'atmosphère est fort complexe de nombreuses substances y participent. En raison de divers facteurs, la teneur en ozone varie fortement à proximité du sol. Des estimations des quantités d'ozone produites par les décharges électriques dues aux lignes à très haute tension montrent que ces quantités représentent moins d'un pour cent du volume d'ozone brut et qu'elles se trouvent par conséquent à un niveau bien inférieur de l'écart de variation de la teneur en ozone naturelle.

Adresse des Autors

Prof. Dr. Hans-Ulrich Dütsch, Kantstrasse 11,
8044 Zürich

1. Einleitung

Man kann heute von einem Paradox Ozon sprechen. In Bodennähe ist diese dreiatomige Sauerstoffmodifikation, wenn sie, wie dies immer häufiger geschieht, in hohen Konzentrationen auftritt, zu einem gefürchteten Giftgas geworden – Ozon ist giftiger als Chlor! Die stratosphärische Hauptschicht des Ozons bildet dagegen durch ihre Absorptionswirkung den essentiellen Schutzschild für alles Leben auf der Erde gegen die tödlich wirkende UV-C-Strahlung der Sonne ($\lambda < 280 \text{ nm}$).

Es wird nun neuerdings behauptet, dass die Korona-Entladungen von Hochspannungsleitungen durch die mit ihnen verbundene Ozonproduktion wesentlich zur schädlichen Wirkung des bodennahen Ozons (z.B. Waldschäden) beitrage. Es kann kein Zweifel bestehen, dass die Korona-Entladungen Ozon erzeugen. Um die Bedeutung dieses Vorgangs beurteilen zu können, muss man die Produktion mit den übrigen – natürlichen wie anthropogenen – Quellen des Ozons in den unteren Luftschichten (Troposphäre) vergleichen, was im folgenden geschehen soll.

Figur 1 zeigt nach Messungen mit der elektrochemischen Ozonsonde in Payerne einerseits die Abgrenzung der stratosphärischen Hauptschicht des Ozons gegenüber ihrem troposphärischen Ausläufer an der Tropopause und anderseits die starke Tag-zu-Tag-Variabilität des Ozons in der unteren Stratosphäre, welche mit der Wetterentwicklung (Ozontransport) zusammenhängt. Die troposphärische Ozonverteilung ist infolge der starken vertikalen Durchmischung viel glatter als die stratosphärische. Das bodennahe Minimum in Figur 1a ist eine typische Wintererscheinung, verursacht durch Bodenzerstörung des Ozons und Unterbindung des Nachschubs aus der freien Atmosphäre durch eine Temperaturinversion; im Sommer werden in Bodennähe nicht selten überhöhte Werte, verursacht durch Photosmogefekte, beobachtet (Fig. 1b).

2. Die klassische photochemische Theorie des Ozons

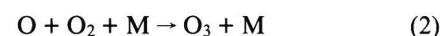
Schon 1930 erklärte der bekannte Geophysiker Chapman die stratosphärische Ozonschicht, d.h. die schichtweise Einlagerung des Ozons in der Atmosphäre, mit einer photochemischen (sog. klassischen) Theorie, die aus nur 4 Reaktionen besteht.

Der grundlegende Prozess ist die Photodissoziation des molekularen Sauerstoffs:



Dissoziationsgeschwindigkeit des Sauerstoffs: f_2
 $\lambda \leq 242 \text{ nm}$

wobei nur ultraviolette Wellenlängen $\leq 242 \text{ nm}$ die nötige Quantenenergie zur Verfügung stellen. Ihr folgt die Ozonbildung im Dreierstoss (zur gleichzeitigen Erhaltung von Energie und Impuls):



Reaktionsgeschwindigkeit: k_2

$\text{M} = \text{N}_2$ oder O_2

Ozon wird seinerseits durch Strahlungsabsorption dissoziiert, wobei infolge seiner geringeren Stabilität Wellenlängen bis ins nahe Infrarot genügend Energie zur Verfügung stellen:



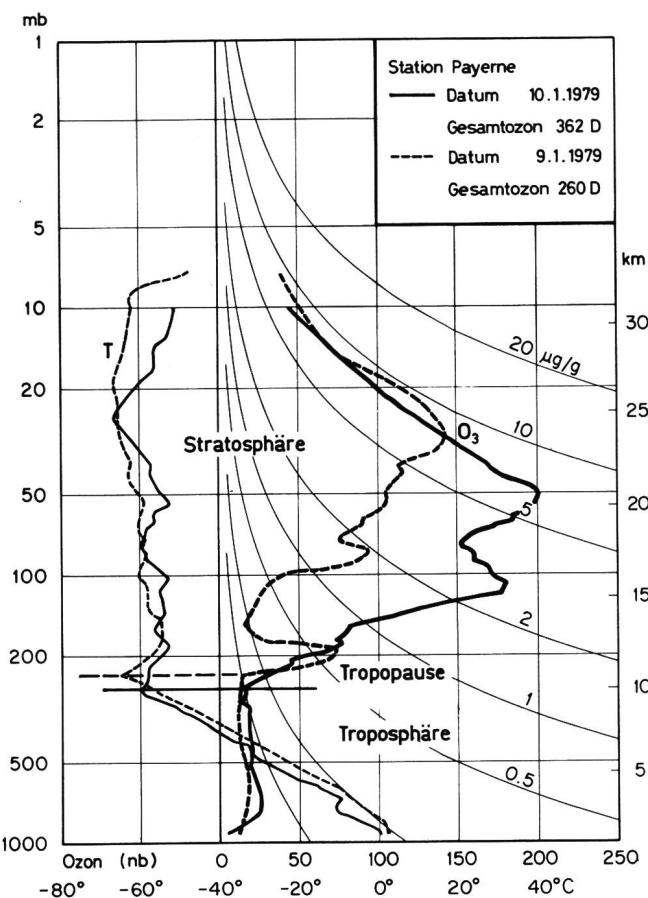
Dissoziationsgeschwindigkeit des Ozons: f_3
 $\lambda \leq 1180 \text{ nm}$

Dies bedeutet aber nicht die endgültige Zerstörung des Ozonmoleküls, da dieses durch Reaktion (2) sofort zurückgebildet werden kann. Endgültig werden die sog. ungeraden Sauerstoffteilchen (O_3 und O) erst durch ihre direkte Reaktion

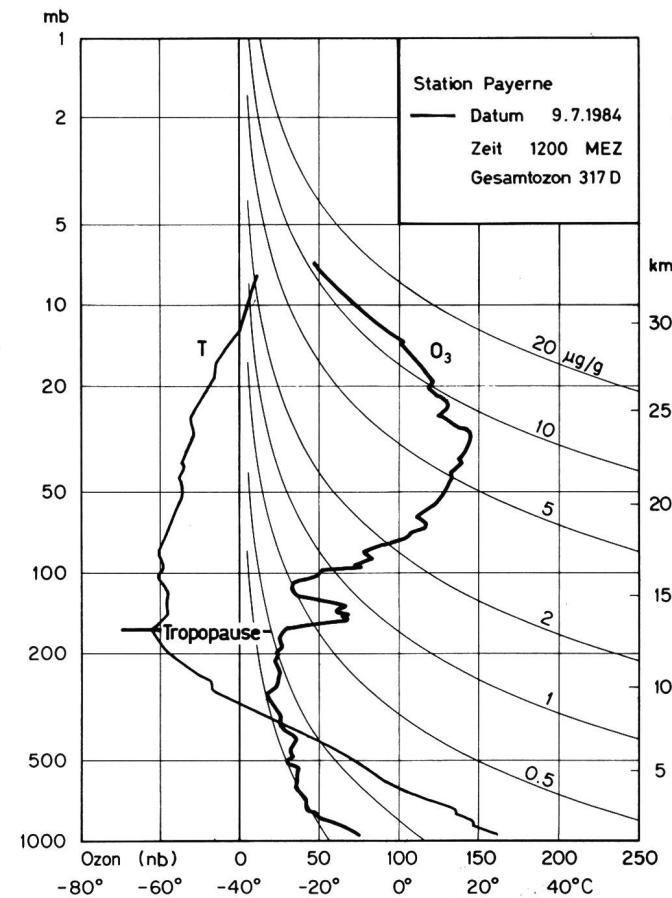


Reaktionsgeschwindigkeit: k_4

wieder in gewöhnlichen Sauerstoff zurückgeführt.



1a: Winter



1b: Sommer

Fig. 1 Vertikale Ozonverteilung nach Sondierungen über Payerne

Ozonanstieg unmittelbar oberhalb der Tropopause, die durch den abrupten Übergang von vertikaler Temperaturabnahme in der Troposphäre zu quasi-isothermer Schichtung in der Stratosphäre charakterisiert ist

Die Ozonkonzentration wird also bestimmt durch ein Gleichgewicht zwischen Bildung ungerader Sauerstoffteilchen durch Reaktion (1) und deren Zerstörung durch Reaktion (4). Die viel schneller ablaufende Umwandlung zwischen den ungeraden Teilchen durch die Reaktionen (2) und (3) bestimmt das Verhältnis zwischen O und O₃, das die Geschwindigkeit von Reaktion (4) beeinflusst. Aus diesen Überlegungen ergibt sich die Gleichgewichtskonzentration des Ozons zu

$$n_3 = n_2^{3/2} \sqrt{k \cdot \frac{f_2}{f_3}}$$

n₃ und n₂ = Ozon bzw. Sauerstoffkonzentration (Moleküle cm⁻³).

f₂ und f₃ = Dissoziationsgeschwindigkeiten von Sauerstoff bzw. Ozon (Zahl der Dissoziationsprozesse pro Molekül und s)

$$k = \frac{k_2}{k_4} \cdot S,$$

wobei k₂ und k₄ die Reaktionsgeschwindigkeiten der entsprechenden Prozesse sind, und

$$S = \frac{n_m}{n_2}$$

n_m = Konzentration der Luftteilchen (N₂ + O₂).

Aus der unterschiedlichen Höhenabhängigkeit aller Größen auf der rechten Seite der Gleichgewichtsgleichung ergibt sich ein Ozonmaximum in etwa 25 km Höhe (Fig. 2). In erster Linie ist dafür die merkwürdige Höhenabhängigkeit der beiden Dissoziationsgeschwindigkeiten verantwortlich. Zwischen 50 und 35 km nehmen diese infolge der Schwächung durch Absorption etwa gleich schnell ab, was wegen der Zunahme der Sauerstoffkonzentration (proportional zur Luftpumpe) zu raschem Anstieg der Ozonkonzentration führt, welcher Effekt durch die Temperaturabhängigkeit von k noch verstärkt wird. Unterhalb 35 km divergieren die beiden Dissoziationsgeschwindigkeiten zunehmend rasch; während f₃ unterhalb 30 km nur noch wenig abnimmt, geht f₂ schnell auf geringfügige Werte zurück (man

beachte die log-Skala!). Dies hat zur Folge, dass die Wirkung des zunehmenden Sauerstoffgehalts überkompensiert wird und die Ozonkonzentration unterhalb eines Maximums bei etwa 25 km wieder abnimmt.

Das merkwürdige Verhalten der Dissoziationsgeschwindigkeiten wird aus Figur 3 verständlich. Oberhalb 30–35 km wird Ozon hauptsächlich durch Wellenlängen zwischen 230 und 280 nm dissoziert (Bereich III in der Fig.), die sehr stark absorbiert und daher nach unten hin rasch ausgelöscht werden, was zu einer raschen Abnahme von f₃ führt. Weiter unten dominieren Beiträge des längerwelligen UV (Bereich IV) und vor allem des in der Figur nicht dargestellten sichtbaren Lichtes, in dessen Bereich die Absorption schwach, die Strahlungsintensität der Sonne aber gross ist, so dass sich ein fast höhenunabhängiger Verlauf von f₃ ergibt. Die stratosphärische Sauerstoffdissoziation (f₂) erfolgt im wesentlichen durch Wellenlängen zwischen etwa 190–230 nm (Bereich II), wo sich O₂- und O₃-Absorption über-

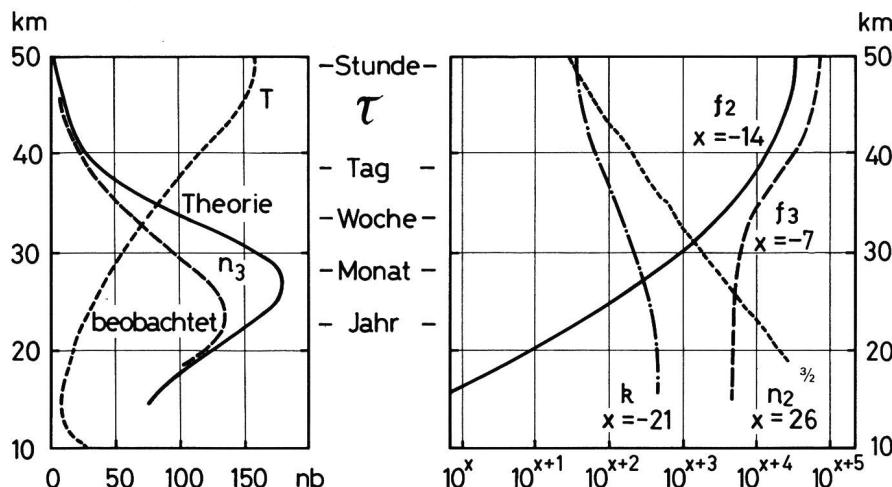


Fig. 2 Links: Vertikale Ozonverteilung im Sommer in 45° Breite
 Volle Linie: nach der klassischen photochemischen Theorie berechnet
 Gestrichelt: mittlere gemessene Verteilung, T: Temperaturverlauf
 Mitte: Relaxationszeit als Funktion der Höhe
 Rechts: Höhenabhängigkeit der einzelnen in die Gleichgewichtsgleichung eingehenden Parameter
 (log. Skala)

lagern, aber relativ schwach sind. Noch kürzere Wellenlängen (Bereich I), die vom Sauerstoff stark absorbiert werden, sind in 50 km Höhe schon völlig ausgelöscht und tragen zur Bildung der stratosphärischen Ozonhauptschicht nichts mehr bei. Durch das Ozonmaximum einerseits und durch den nach unten weiter zunehmenden Sauerstoffgehalt anderseits wird die sauerstoffdissoziierende Strahlung (Bereich II) unterhalb 30–35 km nun ebenfalls sehr rasch geschwächt, so dass sie an der Tropopause praktisch Null ist.

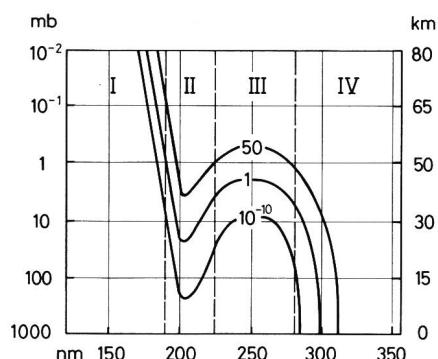


Fig. 3 Prozentuale Schwächung der einfallenden Sonnenstrahlung (Sonnenhöhe 30°) als Funktion von Höhe und Wellenlänge (Reststrahlung in Prozent des extraterrestrischen Wertes)

Wellenlängenbereich I wird oberhalb 50 km durch Sauerstoff absorbiert.
 Wellenlängenbereich II bewirkt Ozonbildung in der Stratosphäre. Überlappung von Sauerstoff- und Ozonabsorption.
 Wellenlängenbereich III: Hauptanteil der Ozonphotodissoziation oberhalb 30–35 km; sehr starke Ozonabsorption.
 Wellenlängenbereich IV plus Teile des sichtbaren Spektrums bewirken im wesentlichen Ozondissociation unterhalb 30 km.

Man kann aus den Reaktionen (1) bis (4) auch die sog. Relaxationszeit des Ozons ableiten, d.h. die Zeit, in der eine Störung des photochemischen Gleichgewichts auf den e -ten Teil abgeklungen ist

$$\tau = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{k \cdot n_2}{f_2 \cdot f_3}}$$

Sie nimmt von 50 km nach unten sehr rasch zu, da der Zähler steigt und der Nenner abnimmt. Von etwa 1 Stunde in 50 km Höhe steigt sie auf Wochen in 30 km und über ein Jahr unterhalb 20 km. Dies bedeutet, dass im unteren Teil der Ozonschicht die Verteilung nicht mehr primär durch photochemische Prozesse, sondern durch den Ozontransport durch die stratosphärische Zirkulation bestimmt wird, was die in Figur 1a gezeigten enormen Tag-zu-Tag-Schwankungen in diesem Bereich verständlich macht.

Es ergeben sich zwei wesentliche Folgerungen aus der klassischen Theorie:

Da nur die natürlichen Hauptbestandteile der Atmosphäre (O_2 und N_2) am Ozonhaushalt beteiligt sind, ist dieser der menschlichen Einflussnahme entzogen, und die Ozonbildung ist auf die Stratosphäre beschränkt, da die ozonbildende Sauerstoffdissoziation bereits oberhalb der Tropopause verschwindet. Import aus der Stratosphäre ist nach dieser Theorie die einzige Quelle für troposphärisches Ozon, das seine einzige Senke am Boden hat. Ozonsondierungen (und auch Flugzeugbeobachtungen) demonstrieren,

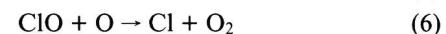
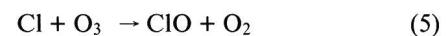
dass schubweiser Übertritt ozonreicher stratosphärischer Luft in die Troposphäre erfolgt. Figur 4a zeigt das ozonreiche stratosphärische Luftpaket unmittelbar unterhalb der Tropopause, d.h. während des Übertritts in die Troposphäre, während in Figur 4b ein solches Paket bereits die mittlere Troposphäre (in etwa 5 km Höhe) erreicht hat. Infolge der starken vertikalen Durchmischung in der Troposphäre wird das eingeflossene Ozon rasch gleichmäßig verteilt.

Der Vergleich der theoretisch berechneten mit einer mittleren gemessenen vertikalen Ozonverteilung in Figur 2 zeigt zwar qualitativ gute Übereinstimmung, doch liegen im oberen Teil der Schicht die theoretischen Werte deutlich über den beobachteten, was darauf hinweist, dass in der einfachen klassischen Theorie gewisse ozonzerstörende Vorgänge nicht berücksichtigt sind.

3. Die moderne photochemische Theorie

3.1 Ozon als zentrale Substanz eines komplexen Spurengassystems

In den vergangenen 20 Jahren ist die photochemische Theorie weiterentwickelt worden. Es hat sich gezeigt, dass es in der Atmosphäre 3 Gruppen von reaktiven Radikalen: HO_x (H , OH , HO_2), NO_x (NO , NO_2) und ClO_x (Cl , ClO) gibt, welche die Ozonzerstörung durch katalytische Kreisprozesse beschleunigen, z.B.:



Total:



entsprechend Reaktion (4), aber z.T. schneller ablaufend als diese.

Da die Geschwindigkeit von Reaktion (7) zur Radikalkonzentration proportional ist und diese Radikale z.T. anthropogener Herkunft sind, muss nun mit der Möglichkeit menschlicher Einflussnahme auf die Ozonschicht gerechnet werden. So stammen die ClO_x -Radikale in der Stratosphäre, für die es allerdings auch eine natürliche Quelle gibt (das im Meer durch biologische Vorgänge produzierte Methylchlorid), heute bereits überwiegend aus dem stratosphärischen Abbau von Chlorfluormethan-Verbindungen (meist unter dem Markennamen Freon

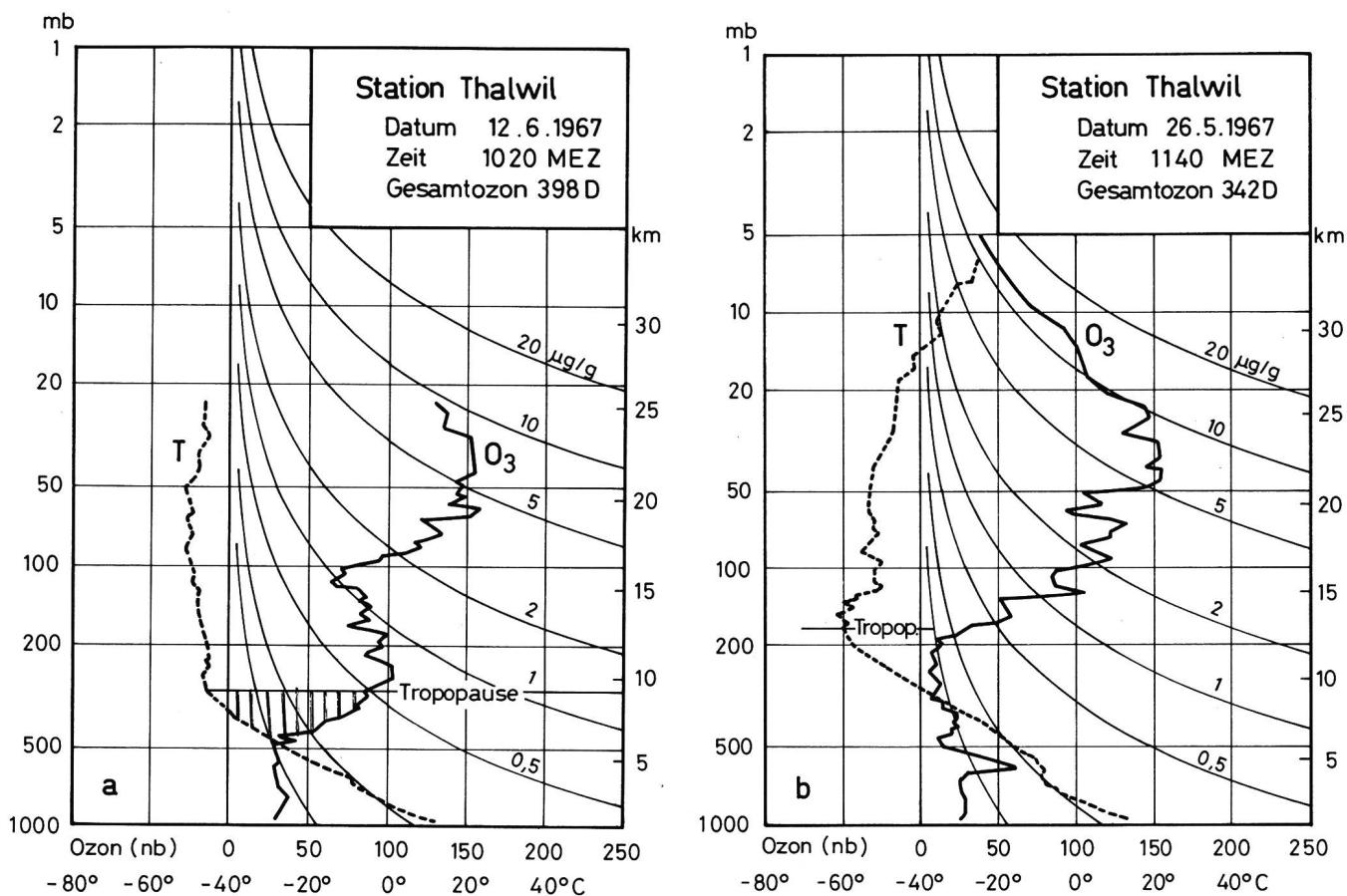


Fig. 4 Ozonübergang in die Troposphäre

a: Stratosphärische Luft ist eben in die Troposphäre übergetreten (schraffierter Bereich); der Ozonanstieg beginnt daher unterhalb der Tropopause.

b: Ein ursprüngliches stratosphärisches Luftpaket, das nach ungefähr einem Tag bis 5 km Höhe abgestiegen ist, zeichnet sich noch durch seinen hohen Ozonhaushalt aus.

bekannt). Dies und die Möglichkeit der anthropogenen Beeinflussung der Bildung von NO_x -Radikalen durch in der Stratosphäre verkehrende Überschallflugzeuge bzw. durch die Verstärkung der natürlichen (biologischen) N_2O -Bildung im Boden durch ständig steigende Kunstdüngeranwendung hat schwere Bedenken geweckt und zu umfangreichen Forschungsprogrammen geführt. Es war dies das erste voll zur Kenntnis genommene globale Luftverschmutzungsproblem.

Die neue photochemische Theorie ist ausserordentlich komplex geworden und kann hier nur schematisch durch Figur 5 skizziert werden. Grundlegend ist die Tatsache, dass bei der Photodissociation von Ozon durch Wellenlängen $< 310 \text{ nm}$ (die z.T., wenn auch stark geschwächt, bis zum Boden vordringen können) angeregte Sauerstoffatome ($\text{O}^1\text{D} \equiv \text{O}^*$) entstehen, welche energiereich genug sind, um sonst chemisch stabile atmosphärische Spurenstoffe (in Fig. 5 als Quellsubstanzen bezeichnet) aufzuspalten

und in reaktive Radikale überzuführen, welche den Ozonabbau katalysieren; z.B.



Das dabei entstehende OH-Radikal kann seinerseits wasserstoffhaltige organische Verbindungen aufspalten, und die Chlorfluormethan-Verbindungen CFCl_3 und CF_2Cl_2 (F_{11} und F_{12}) schliesslich werden in der Stratosphäre durch dieselben ultravioletten Wellenlängen ($\approx 210 \text{ nm}$) aufgekennelt, die durch Sauerstoffdissoziation zur Ozonbildung führen.

Während die Quellsubstanzen alle vom Boden stammen und teils natürlicher (meist biologischer), teils anthropogener Herkunft sind, erfolgt die Umwandlung in Radikale vorwiegend in der Stratosphäre, wo diese auch ihre ozonzerstörende Wirkung entfalten. Somit ist ein Transportvorgang (der durch die tropische Tropopause hindurchgeht) zwischen die Abgabe der

Quellsubstanzen an die Atmosphäre und ihre indirekten Ozonwirksamkeit in der Stratosphäre geschaltet.

Da NO_x - und ClO_x -Radikale (im Gegensatz zu HO_x) nicht in die Ausgangsstoffe zurückverwandelt werden, würde ihre Konzentration und damit die Ozonzerstörung rasch hohe Werte erreichen, wenn nicht eine Überführung der Radikale in zwar immer noch recht reaktive, aber nicht mehr ozonabbauende Verbindungen wie HNO_3 , HCl , ClNO_3 usw. stattfinden würde. Diese Vorgänge sind allerdings umkehrbar, so dass sich ein Gleichgewicht zwischen den entstehenden sog. Reservoirsubstanzen und den Radikalen einstellt, von dessen Lage die ozonzerstörende Wirkung der letzten abhängt. Der Ablauf wird noch dadurch kompliziert, dass (im Gegensatz zu der vereinfachten Darstellung in Fig. 5) die verschiedenen Radikalgruppen in diesen Übergängen ineinander hineingreifen, wie sie sich auch bei der katalytischen Ozonzerstörung gegenseitig beeinflussen.

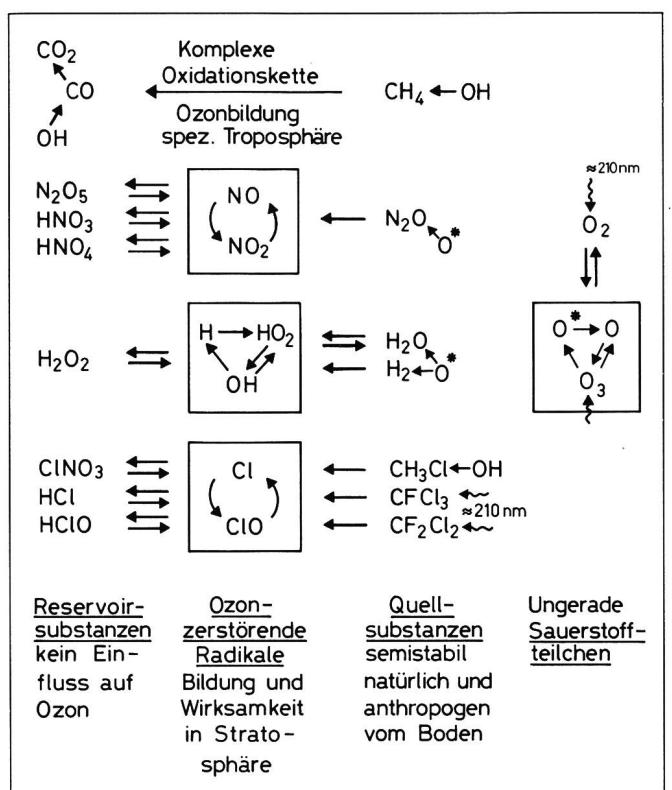
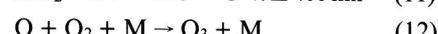
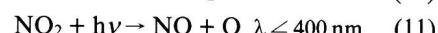
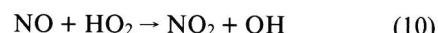


Fig. 5
Schema des um das
Ozon gruppierten
Spurengassystems

→ Umwandlungsrichtung
 → Einwirkung von OH bzw. O⁺
 ~~~> Photodissociation der betreffenden Substanz

### 3.2 Troposphärische Photochemie

Während die Umwandlung der meisten Quellsubstanzen die Bildung ozonzerstörender Radikale bewirkt, führt die Aufspaltung des Methans durch das OH-Radikal zu einer komplexen Oxidationskette, in der über eine Reihe von Zwischenstufen Formaldehyd und schliesslich CO und  $\text{CO}_2$  entstehen. Dabei wird als Nebenprodukt eine Anzahl von  $\text{HO}_x$ -Radikalen gebildet, welche bei Anwesenheit von  $\text{NO}_x$ , das als Katalysator wirkt, zu Ozonbildung führen.



Da auch in der Troposphäre OH-Radikale gebildet werden und damit der Methanabbau in Gang kommen kann, bewirken diese Vorgänge nun auch dort Ozonbildung, der allerdings wegen der Anwesenheit vor allem der HO<sub>x</sub>-Radikale auch katalytische Ozonzerstörung ohne Bodenkontakt gegenübersteht. Die troposphärischen photochemischen Prozesse laufen sogar wieder wesentlich schneller als diejenigen in der unteren Stratosphäre – die Relaxationszeit ist auf einige Wochen reduziert.

Die Vorgänge im sog. Photosmog sind den geschilderten Prozessen beim Abbau des natürlich (biologisch) produzierten Methans recht ähnlich. An dessen Stelle treten höhere und z.T. ungesättigte Kohlenwasserstoffe, vor allem aus Verbrennungsmotoren (Automobil), und die Konzentration des Katalysators  $\text{NO}_x$  ist aus der gleichen Quelle ebenfalls stark erhöht. Da diese Kohlenwasserstoffe viel rascher mit OH reagieren als Methan, können innert weniger Stunden sehr hohe Ozonkonzentrationen entstehen (in der Umgebung von Zürich ist in Smoglagen das Drei- bis Vierfache des natürlichen bodennahen Ozongehalts gemessen worden). Da die Smogphotochemie an Sonnenlicht gebunden ist, treten auch starke Tag/Nacht-Schwankungen auf (Fig. 6).

## 4. Abschätzung des bodennahen Ozonhaushalts

Die Untersuchungen des Ozonübertritts von der Stratosphäre in die Troposphäre, der auch in der modernen Theorie eine wesentliche Quelle für den troposphärischen Ozonhaushalt

Da es für die Reservoirsubstanzen in der Stratosphäre keinen chemischen Abbau gibt und der natürliche Reinigungsprozess der Troposphäre, der Niederschlagsprozess, hier fehlt, käme es doch – auch ohne anthropogene Einwirkung – zu einer kontinuierlichen Steigerung der Radikalkonzentration, wenn nicht mit den Luftsüßen, welche Ozon in die Troposphäre transportieren, auch Reservoirsubstanzen und Radikale dorthin geführt würden, wo sie dann ausgewaschen werden.

Es ergibt sich aus diesen Betrachtungen, dass ein äußerst kompliziertes chemisches System – es umfasst nun über 100 Reaktionen – und ebenfalls recht komplizierte Transportprozesse eng miteinander verflochten sind. Eine Berechnung der vertikalen Ozonverteilung und vor allem eine Prognose der durch die zunehmenden anthropogenen Einflüsse zu erwartenden Veränderungen der Ozonschicht kann daher nur mit komplizierten und aufwendigen Computermodellen durchgeführt werden.

Die Prognosen bezüglich einer Veränderung des Gesamtozonwertes durch anthropogene Einwirkungen (die mittlere Dicke der Ozonschicht beträgt etwa 0,3 cm reinen Ozons von Normalbedingungen = 300 Dobson-einheiten [D]) sind wegen vieler, z.T.

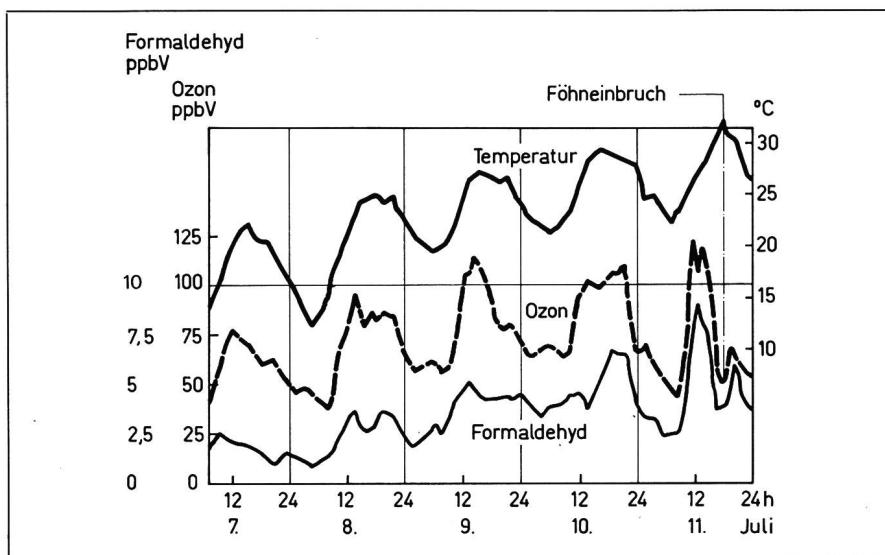


Fig. 6 Entwicklung einer Smoglage bei Zürich nach Messungen des Laboratoriums für Atmosphärenphysik auf dem Albiskamm im Sommer 1984

Der Ozongehalt steigt parallel zur Temperatur und überschreitet mit über 100 ppbV (Teilchen pro MilizLuftmoleküle) an den drei letzten Tagen der Hitzeperiode den am Arbeitsplatz maximal zulässigen Wert. Ebenfalls parallel dazu nimmt die Konzentration des Formaldehyds zu, das ein giftiges Zwischenprodukt beim Abbau der Kohlenwasserstoffe ist. Der Föhneinbruch am 11. Juli verdrängte die bodennähe Smogluft durch Massen aus der freien Atmosphäre, was den Abfall des Ozon- und Formaldehydgehalts erklärt. Dies zeigt, dass die hohe Ozonkonzentration nicht aus der Stratosphäre stammt, sondern in Bodennähe produziert wird.

darstellt, ergeben auf Grund der Resultate verschiedener Messsysteme einen mittleren Fluss von etwa  $5 \cdot 10^{10}$  Molekülen  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ , wobei die Unsicherheit etwa einen Faktor 2 betragen dürfte, die hier angegebene Zahl aber wohl näher an der unteren als an der oberen Grenze liegt. Mit ähnlichen oder eher grösseren Unsicherheiten ist die Berechnung der photochemischen Ozonbilanz in der Troposphäre belastet; die grösste Fehlerquelle ist dabei die ungenaue Kenntnis des weltweiten - mit grossen örtlichen Differenzen behafteten -  $\text{NO}_x$ -Gehalts der Troposphäre. Als wahrscheinlichster Wert wird ein Überschuss der Ozonproduktion gegenüber der photochemischen Zersetzung von ebenfalls  $5 \cdot 10^{10}$  Molekülen  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  in einer vertikalen Säule durch die Troposphäre über einem  $\text{cm}^2$  Grundfläche angegeben. Die Summe dieser photochemischen Bilanz und des Flusses aus der Stratosphäre, d.h.  $1 \cdot 10^{11}$  Moleküle  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ , wird am Boden im Kontakt mit verschiedenen, aber vor allem organischen Substanzen laufend zerstört. Um diesen natürlichen Ozonfluss in den Boden, welcher dem natürlichen Ozongewinn der Troposphäre entspricht, im folgenden Vergleich mit der Koronaentladung sicher nicht zu überschätzen, wird bei den weiteren Betrachtungen mit der Hälfte der oben erhaltenen Summe,

nämlich mit  $5 \cdot 10^{10}$  Molekülen  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ , gerechnet.

## 5. Vergleich der Ozonproduktion durch Koronaentladung mit dem natürlichen Ozonhaushalt der Troposphäre

In den USA sind in den 70er Jahren quantitative Untersuchungen über Ozonbildung durch Koronaentladungen mit Messungen der Ozonkonzentration in unmittelbarer Umgebung von Hochspannungsleitungen bei verschiedenen Witterungsbedingungen durchgeführt worden, wobei sich als wahrscheinlichster Wert 2,5 g Ozon pro kWh Koronaverlust ergaben. Diese Zahl ist wohl die unsicherste im ganzen hier durchgeföhrten Vergleich - sie könnte möglicherweise bis 4mal grösser sein.

Die gesamten jährlichen Verluste im schweizerischen Hochspannungsübertragungsnetz - sie stellen nur einen Bruchteil der gesamten Übertragungsverluste dar - betragen  $4,2 \cdot 10^8$  kWh. Nimmt man an, dass der Anteil der Koronaverluste 30% beträgt (der Rest ist Joulsche Wärme), was eine obere Grenze sein dürfte - 10% wären wohl realistischer - so ergeben sich die Ko-

ronaverluste zu  $1,26 \cdot 10^8$  kWh pro Jahr, was einer jährlichen Ozonproduktion von  $3,15 \cdot 10^8$  g (= 315 t) entspricht. Da ein Mol Ozon 48 g wiegt und  $6,03 \cdot 10^{23}$  Moleküle enthält (Avogadro'sche Zahl), ergibt dies  $4 \cdot 10^{30}$  Moleküle über der Fläche der Schweiz, welche  $4,1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^2$  beträgt. Mit  $3,1 \cdot 10^7$  s/Jahr errechnet sich daraus eine zusätzliche Ozonbelastung von ungefähr  $3 \cdot 10^8$  Molekülen  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  im Durchschnitt über das ganze Land. Dies ist weniger als 1% der natürlichen Ozonbilanz der Troposphäre, d.h. des natürlichen Ozonflusses in den Boden. Dieser Vergleich lässt sich an Hand der gesamten Ozonproduktion noch verdeutlichen: Während die jährliche Ozonproduktion durch Koronaentladung nach der oben dargestellten Schätzung für die ganze Schweiz etwa 315 Tonnen beträgt, liegt der natürliche Ozonfluss in den Boden für das ganze Land im Jahr bei etwa 50 000 Tonnen, ist also mehr als 100mal so gross wie die Ozonproduktion durch Koronaentladung.

Bei typischen Smoglagen in der Umgebung von Zürich ist im Reusstal eine Bodenzerstörung von annähernd  $10^{12}$  Molekülen  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  festgestellt worden. Dies bedeutet, dass die Ozonproduktion durch Koronaentladung weniger als 1% der Erzeugung im Photosmog ausmacht. Zusätzlich weist die beobachtete starke Tagesschwankung, wie sie von Figur 6 gezeigt wird, auf eine auf den Tag beschränkte Produktion hin, wie dies den Photosmogverhältnissen entspricht, während die Bildung durch Koronaentladung in der Nacht voll weiterläuft.

Auch wenn einige der hier eingesetzten Zahlen mit beträchtlichen Unsicherheiten behaftet sind - vor allem die Ozonproduktion pro kWh Koronaverlust - , dürfte, da alle anderen Werte sehr konservativ abgeschätzt wurden, im obigen Vergleich die Prozent- bzw. Promillegrenze gegenüber der natürlichen bzw. Smogozonproduktion nicht wesentlich überschritten werden. Das bedeutet, dass die zusätzliche Ozonquelle aus der Hochspannungsübertragung weit innerhalb der natürlichen Schwankungsbreite und auch innerhalb der Messgenauigkeit liegt und damit als irrelevant bezeichnet werden kann. Messbare Überhöhung des natürlichen Ozonpegels könnten höchstens ganz lokal, in unmittelbarer Umgebung der Hochspannungsleitungen bei windschwacher Witterung, eintreten.