

# Ozon in der bodennahen Atmosphäre (Leitprogramm)

Ozon ist für die Umweltchemie in zweierlei Hinsicht von Bedeutung: einerseits bildet es in grosser Höhe einen Schutzschild gegen ultraviolette Strahlung, andererseits stellt es in Bodennähe den hierzulande wohl bedeutendsten Luftschadstoff dar. In diesem Leitprogramm lernen Sie Ozon in dieser zweiten Funktion kennen. Damit erhalten Sie eine Grundlage zum Verständnis wichtiger Ursachen der Luftverschmutzung und möglicher Gegenmassnahmen. Ausserdem sind die Vorgänge bei der Ozonbildung ein typisches Beispiel für ein komplexes Fließgleichgewicht, wie es in der Umweltchemie häufig anzutreffen ist.

## 1.) Was ist Ozon?

Ozon ist eine Modifikation des Sauerstoffs mit der Molekülformel  $O_3$ . Das Ozonmolekül ist mesomer<sup>a</sup> und wird durch die folgenden beiden Grenzformeln dargestellt:



Ozon ist ein sehr reaktives Gas und eines der stärksten Oxidationsmittel. Es wird unter anderem zum Bleichen von Papier und zur Sterilisation von Trinkwasser eingesetzt, wobei es zu  $O_2$  zerfällt. Ozon entsteht u. a. bei elektrischen Entladungen (Funken, Blitze) und bei der Einwirkung von kurzwelligem UV-Licht auf  $O_2$ . Ozon hat einen typischen Geruch, der noch bei Konzentrationen um  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  wahrnehmbar ist. Es ist ein starkes Gift; der MAK-Wert<sup>b</sup> beträgt  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

## 2.) Ozon in Stratosphäre und Troposphäre

Die Atmosphäre wird in verschiedene Schichten unterteilt (vgl. die folgende Abbildung), von denen für die Ozonchemie die beiden untersten, die Troposphäre und die Stratosphäre, von Bedeutung sind. 90% des in der Atmosphäre enthaltenen Ozons befinden sich in der Stratosphäre, der Rest in der Troposphäre. Dabei handelt es sich um geringe Mengen: könnte man das gesamte Ozon aus der Atmosphäre abtrennen, so ergäbe es unter normalen Druck- und Temperaturbedingungen eine Schicht von nur 3 mm Dicke.

In der Stratosphäre entsteht Ozon durch die Einwirkung von kurzwelligem UV-Licht auf  $O_2$ -Moleküle. Das stratosphärische Ozon („Ozonschicht“) schützt die Lebewesen auf der Erdoberfläche vor schädlicher UV-Strahlung. Fluorchlorkohlenwasserstoffe kata-

<sup>a</sup> Mesomere Moleküle besitzen Bindungselektronen, welche über mehrere Atome hinweg delokalisiert sind. Aus diesem Grund können sie nicht durch eine konventionelle Elektronenstrichformel dargestellt werden. Man beschreibt sie deshalb als Zwischenzustand zwischen zwei oder mehr sog. Grenzformeln. Für das Ozonmolekül bedeutet dies, dass die beiden Bindungen sich nicht unterscheiden (sie sind Miteigentümer zwischen Einfach- und Doppelbindung) und die beiden endständigen O-Atome dieselbe Ladung tragen.

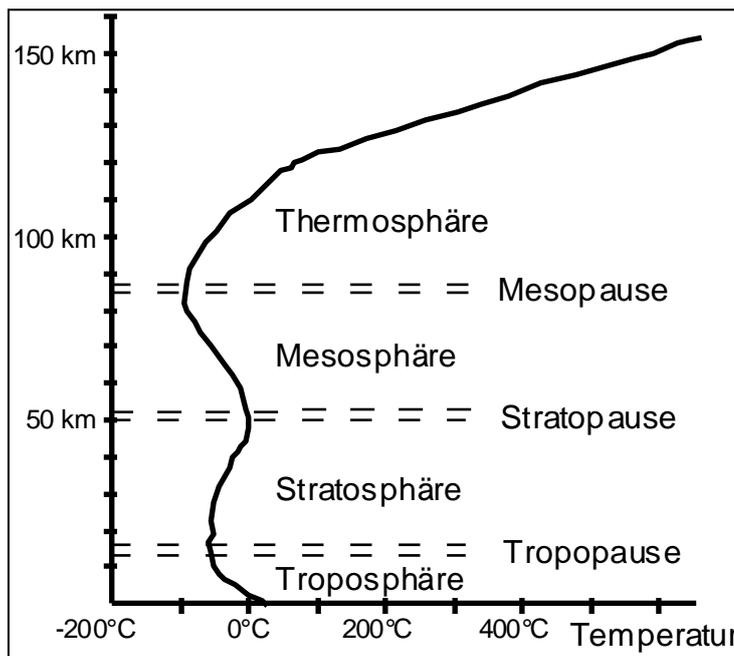
<sup>b</sup> MAK-Werte (MAK = maximale Arbeitsplatz-Konzentration) sind gesetzliche Grenzwerte für Luftschadstoffe an Arbeitsplätzen.

lysieren den Ozonabbau und verschieben so das Gleichgewicht zwischen Entstehung und Abbau zu geringeren Ozonkonzentrationen („Ozonloch“), was zu einer höheren UV-Belastung auf der Erde führt.

In der Troposphäre stellt Ozon wegen seiner Giftigkeit einen Schadstoff dar. Die Entstehung des troposphärischen („bodennahen“) Ozons ist Thema dieses Leitprogramms; das stratosphärische Ozon („Ozonschicht“) wird hier nicht weiter behandelt.

In der Troposphäre nimmt die Temperatur mit zunehmender

Höhe ab, in der Stratosphäre hingegen - wegen der Absorption von UV-Strahlung - zu. Zwischen den beiden Schichten befindet sich eine dünne Schicht ohne Temperaturgradienten, die Tropopause. Sie stellt eine Barriere dar, welche die Durchmischung von Troposphäre und Stratosphäre stark einschränkt. Zwischen Ozonschicht und bodennahem Ozon besteht deshalb normalerweise kaum ein Zusammenhang. Gelegentlich kann jedoch die Tropopause kurzzeitig und örtlich begrenzt aufreissen, so dass kalte und ozonreiche Luft in die Troposphäre absinkt (sog. stratosphärische Injektion).



### 3.) Übersicht bodennahes Ozon: Wirkung & Entstehung

Ozon ist ein sog. Sekundärschadstoff, d. h. ein Schadstoff, welcher nicht selbst emittiert wird, sondern durch chemische Umwandlung aus anderen Stoffen in der Umwelt entsteht.

**Aufgabe 1:** Besuchen Sie die Internetseite des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) [www.bafu.admin.ch](http://www.bafu.admin.ch) und wählen Sie dort das Thema Luft. Informationen über Ozon finden Sie unter Schadstoffe > Ozon sowie Themen > Sommersmog. Suchen Sie Antworten auf die folgenden Fragen:

- Aus welchen Vorläuferstoffen entsteht Ozon? Von welchen Verursachern stammen diese?
- Welche Wetterbedingungen fördern die Ozonbildung?
- Was ist Sommersmog?
- Welche gesundheitlichen und ökologischen Auswirkungen haben hohe Ozonkonzentrationen?

Wenn bei Luftschadstoffen von „hohen“ Konzentrationen die Rede ist, ist dies relativ zu ihrer Wirkung zu verstehen. Absolut gesehen sind die Konzentrationen klein, meist weniger als  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

**Aufgabe 2:** In dicht besiedelten Gegenden in der Schweiz beträgt die durchschnittliche  $\text{NO}_2$ -Konzentration in Bodennähe zwischen 25 und 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . - Eines von wievielen Molekülen in der Luft ist ein  $\text{NO}_2$ -Molekül? Gehen Sie aus von einer  $\text{NO}_2$ -Konzentration von 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  und einem molaren Volumen<sup>c</sup> von 24 l/mol.

Bei den als Vorläufersubstanzen bedeutsamen Stickstoffoxiden (auch Stickoxide genannt) handelt es sich um die beiden Gase NO (Stickstoffmonoxid) und  $\text{NO}_2$  (Stickstoffdioxid); gemeinsam werden sie auch als  $\text{NO}_x$  bezeichnet. NO entsteht bei Verbrennungen - vor allem bei solchen, die nicht kontinuierlich verlaufen, was der Fall ist in Benzin- und Dieselmotoren.

**Aufgabe 3:** Obwohl Benzin und Diesel praktisch keine Stickstoffverbindungen enthalten, entsteht bei deren Verbrennung in Motoren Stickstoffmonoxid.

- a) Woher stammt der Stickstoff für die Bildung von Stickstoffmonoxid?  
 b) Auf welche Weise entsteht NO? Schreiben Sie die Reaktionsgleichung auf.

Die Reaktion in Aufgabe (b) ist endotherm. Sie tritt bei hohen Temperaturen auf - ausser bei Verbrennungen beispielsweise auch bei Blitzen. Bei Umgebungstemperaturen hingegen ist die NO-Bildung nicht möglich, da das Gleichgewicht sehr stark auf der Eduktseite liegt.

- c) Mit welcher Regel lässt sich erklären, dass das Gleichgewicht bei Umgebungstemperatur viel stärker auf der Eduktseite liegt als bei Verbrennungstemperatur?  
 d) Wenn das Gleichgewicht bei Umgebungstemperatur so stark auf der Eduktseite liegt - warum enthält die Luft trotzdem NO?  
 e) Die Brenner moderner Ölheizungen arbeiten mit relativ tiefen Flammentemperaturen. Welchen Vorteil hat dies?

NO reagiert mit Luftsauerstoff zu  $\text{NO}_2$  nach der Gleichung  $2 \text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{NO}_2$ . Diese Reaktion verläuft bedeutend langsamer als die durch flüchtige organische Verbindungen verursachte Umwandlung von NO in  $\text{NO}_2$ , die weiter unten (Gleichungen [8] bis [12]) beschrieben wird.

## 4.) Entstehung und Abbau von Ozon in der Troposphäre

Die wichtigste Ozonquelle in der Troposphäre ist die Reaktion von  $\text{NO}_2$  mit  $\text{O}_2$ . Sie erfolgt in zwei Schritten. Der erste besteht in der Spaltung von  $\text{NO}_2$  durch kurzwelliges Licht ( $\lambda \leq 410 \text{ nm}^d$ ), wobei atomarer Sauerstoff entsteht:



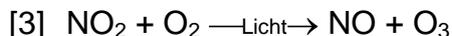
<sup>c</sup> Nach dem Satz von Avogadro ist das molare Volumen für alle idealen Gase gleich, ungeachtet ihrer chemischen Zusammensetzung. Wie alle Gasvolumen hängt es von der Temperatur ab; bei 19.5 °C beträgt es 24 l/mol.

<sup>d</sup> Mit  $\lambda$  bezeichnet man die Wellenlänge des Lichts. Der Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts erstreckt sich von 400 bis 700 nm; ultraviolettes Licht (UV) besitzt kürzere, infrarotes längere Wellenlängen.

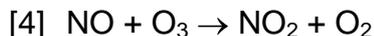
Sauerstoffatome sind sehr reaktiv und bilden beim Zusammenstoß mit Sauerstoffmolekülen sofort Ozon:



Die Kombination der Gleichungen [1] und [2] ergibt für die Ozonentstehung

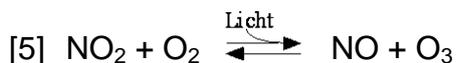


Ozon wird aber auch abgebaut, und zwar hauptsächlich durch die Reaktion



für welche kein Licht benötigt wird.

Aus den gleichzeitig ablaufenden Reaktionen [3] und [4] resultiert ein Gleichgewicht mit konstanten Konzentrationen:



#### Aufgabe 4:

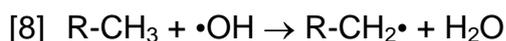
- Auf welche Seite verschiebt sich dieses Gleichgewicht, wenn die Lichtintensität zunimmt, auf welche, wenn sie abnimmt?
- Was geschieht, wenn zusätzlich noch eine weitere Reaktion abläuft, welche NO verbraucht und NO<sub>2</sub> produziert, im Unterschied zu Reaktion [4] aber kein O<sub>3</sub> verbraucht (eine solche Reaktion entzieht also dem Gleichgewicht [5] ständig NO und führt ihm NO<sub>2</sub> zu)?

Eine Reaktion mit den in Aufgabe 5.b erwähnten Eigenschaften erfolgt tatsächlich, sofern Kohlenwasserstoffe oder Moleküle mit Kohlenwasserstoffresten in der Luft vorhanden sind. Solche Stoffe fasst man in der Atmosphärenchemie unter dem Begriff „flüchtige organische Verbindungen“ („volatile organic compounds“ = VOC) zusammen. Es handelt sich um Lösungsmitteldämpfe, die hauptsächlich von Gewerbe und Industrie emittiert werden, und um Dämpfe von Brenn- und Treibstoffen wie Benzin.

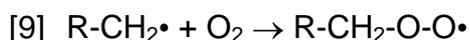
Die erwähnte Reaktion umfasst mehrere Schritte und wird im folgenden mit den Gleichungen [8] bis [12] beschrieben. Sie wird katalysiert durch Hydroxylradikale<sup>e</sup> (•OH), welche nach den Gleichungen [6] und [7] aus Ozon und Wasserdampf entstehen. Reaktion [6] benötigt UV-Licht ( $\lambda \leq 310 \text{ nm}$ ); dabei entsteht ein angeregtes (energiereiches) O-Atom (O\*):



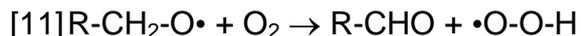
Bei der Reaktion eines VOC-Moleküls R-CH<sub>3</sub> mit einem Hydroxylradikal entsteht wiederum ein Radikal:



Auch an den Folgereaktionen sind Radikale beteiligt:



<sup>e</sup> Als Radikale bezeichnet man Teilchen mit ungepaarten Elektronen. Solche Teilchen sind sehr reaktiv. Ungepaarte Elektronen werden in Elektronenstrichformeln mit einem Punkt dargestellt.



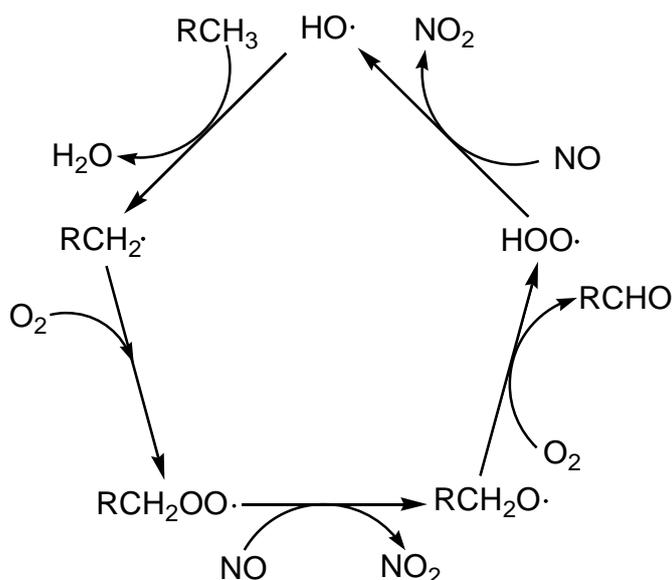
In Gleichungen [10] und [12] wird je ein NO- in ein NO<sub>2</sub>-Molekül übergeführt. In Gleichung [11] entsteht ein Aldehyd<sup>f</sup>, ebenfalls ein im Sommersmog enthaltenes Reizgas.

### Aufgabe 5:

- Addieren Sie die Reaktionsgleichungen [8] bis [12], sodass sich daraus die Gleichung der Gesamtreaktion ergibt.
- Erklären Sie, warum es sich beim Hydroxylradikal nicht um ein Edukt, sondern um einen Katalysator handelt.

### Aufgabe 6: Studieren Sie das folgende Schema.

- Bezeichnen Sie darin die Reaktionen mit den Nummern, die im bisherigen Text verwendet wurden.
- Wieviele Ozonmoleküle entstehen pro verbrauchtes VOC-Molekül?



Wenn die Randbedingungen wie Lichtintensität, Luftbewegung, Schadstoffzufuhr usw. nicht ändern, stellt sich mit der Zeit ein Zustand ein, in welchem die Reaktionen [8] bis [12] mit konstanter Geschwindigkeit ablaufen. Die Teilchen innerhalb des Kreislaufs ( $\cdot\text{OH}$ ,  $\text{R-CH}_2\cdot$ ,  $\text{R-CH}_2\text{-O-O}\cdot$ ,  $\text{R-CH}_2\text{-O}\cdot$ ,  $\cdot\text{O-O-H}$ ) liegen dann in konstanten Konzentrationen vor; ihre Bildungs- und Zerfallsgeschwindigkeiten sind also gleich. Einen solchen Zustand bezeichnet man als Fließgleichgewicht.

Sind alle an einem solchen System beteiligten Reaktionen mit den sie charakterisierenden Daten (Gleichgewichtskonstanten, Geschwindigkeitsgesetze<sup>g</sup>) sowie die Rand-

<sup>f</sup> Aldehyde sind organische Stoffe mit der allgemeinen Formel  $\text{R}-\underset{\text{H}}{\text{C}}=\text{O}$  (abgekürzt: R-CHO).

<sup>g</sup> Als Geschwindigkeitsgesetz bezeichnet man den mathematischen Zusammenhang zwischen Reaktionsgeschwindigkeit und Eduktkonzentrationen.

bedingungen bekannt, so lassen sich die Konzentrationen aller Stoffe berechnen. Da aber stets nur ein Teil der Informationen vorhanden ist, und da viele Vorgänge (z. B. meteorologische) wegen ihrer Komplexität nicht berechnet werden können, weisen die Ergebnisse solcher Modellrechnungen immer Unsicherheiten auf.

Das oben dargestellte System ist in Wirklichkeit kein geschlossenes. Die beteiligten Stoffe nehmen vielmehr an zahlreichen weiteren Reaktionen teil, die hier um der Einfachheit und Überschaubarkeit willen weggelassen sind, wie zum Beispiel:

- Bildung sog. Fotooxidantien (Bestandteile des Sommersmogs, in ihrer Wirkung dem Ozon ähnlich).
- Reaktion von  $\text{NO}_2$  mit  $\cdot\text{OH}$  zu  $\text{HNO}_3$  (Salpetersäure), welche im Gegensatz zu  $\text{NO}_2$  gut wasserlöslich ist und deshalb bei Regen aus der Atmosphäre ausgewaschen wird.
- Entfernung von Ozon durch Deposition, d. h. durch Reaktion mit der Erdoberfläche (inkl. Vegetation).
- Einfluss von Kohlenstoffmonoxid (CO): In Anwesenheit von Stickoxiden bildet dieses unter dem Einfluss von Sonnenlicht Ozon - in ähnlicher Weise wie die VOC. In Reinluftgebieten hingegen, wo die Stickoxidkonzentrationen sehr gering sind, fördert Kohlenstoffmonoxid den Ozonabbau.

Die anthropogene Luftverschmutzung stellt also einen Eingriff in ein ziemlich komplexes dynamisches Fließgleichgewicht dar.

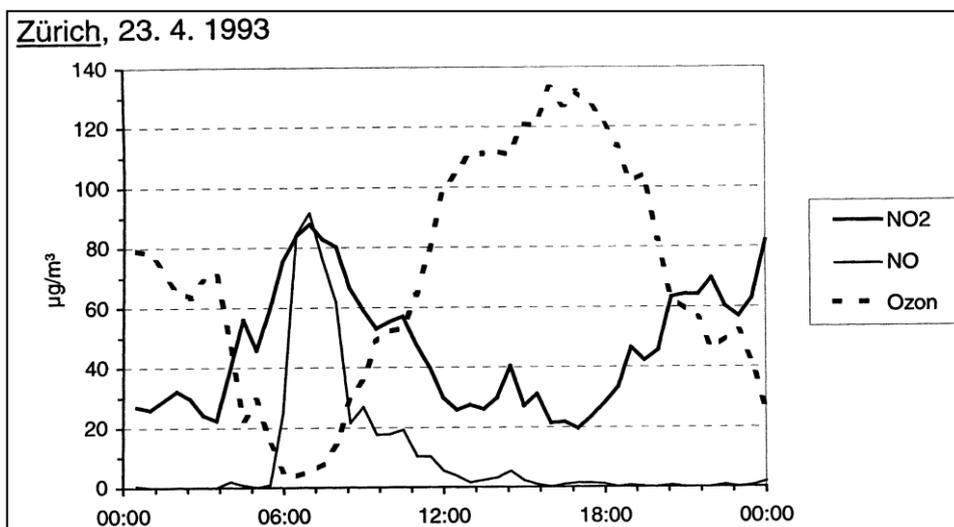
Die Ozonbildung lässt sich nur vermindern, indem man den Ausstoss der Vorläufersubstanzen (VOC und  $\text{NO}_x$ ) verringert. Bei den Stickoxiden ist dies ohnehin vonnöten, da sie selbst auch als Schadstoffe wirken: einerseits schaden sie den Atemwegen, andererseits bilden sie Salpetersäure, welche Pflanzen und Bauwerke schädigt und deren Salze als Düngemittel wirken und so die Artenvielfalt in nährstoffarmen Ökosystemen verringern.

## 5.) Zeitliche und örtliche Schwankungen der Ozonkonzentration

### Tageszeit:

Die nebenstehende Grafik zeigt einen typischen Tagesgang der Konzentrationen von  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$  und  $\text{O}_3$  an einem sonnigen Tag in einem Stadtzentrum.

Mit den Abgasen des Morgenverkehrs wird  $\text{NO}$  emittiert, welches

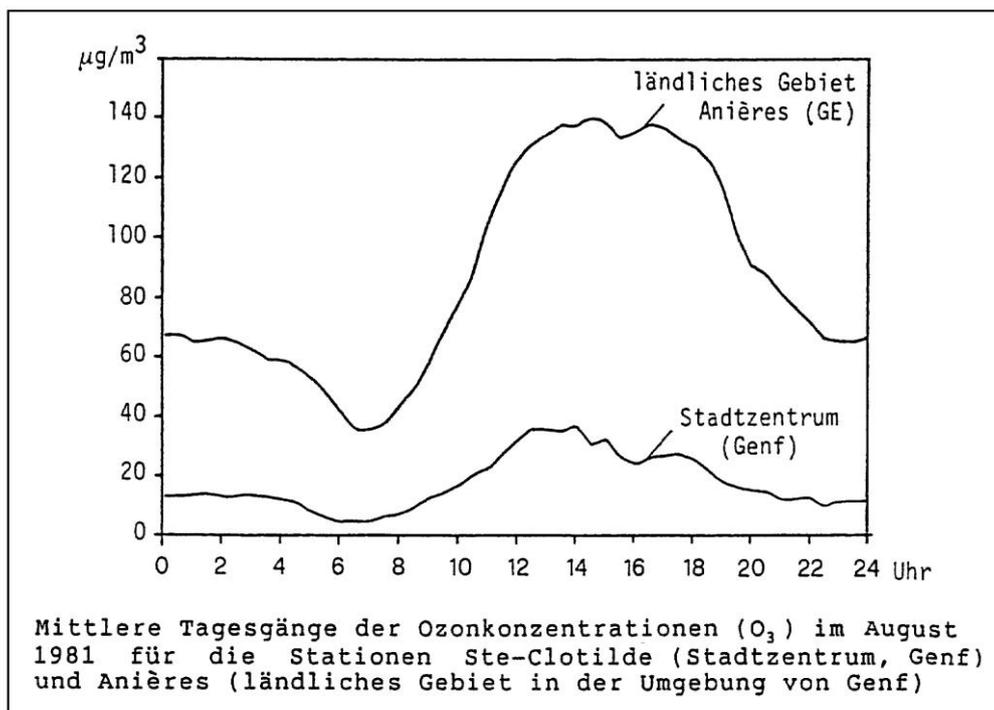


mit dem noch vom Vortag vorhandenen  $O_3$  zu  $NO_2$  reagiert. Deshalb steigt die Konzentration von  $NO_2$ , während diejenige von  $O_3$  sinkt. Erst wenn fast kein  $O_3$  mehr vorhanden ist, steigt die  $NO$ -Konzentration an. - Unter dem Einfluss der zunehmenden Sonneneinstrahlung wird dann tagsüber Ozon gebildet, dessen Konzentration stark ansteigt. Das dabei zu  $NO$  umgesetzte  $NO_2$  wird laufend durch die  $VOC$  regeneriert. Die Konzentration der noch hauptsächlich vom Morgenverkehr stammenden Stickoxide sinkt allmählich wegen der durch die Schadstoffausbreitung verursachten Verdünnung. Gegen Abend lässt die Ozonproduktion wegen der abnehmenden Sonnenscheinintensität nach.

**Aufgabe 7:** Warum verursacht der Abendverkehr im Gegensatz zum Morgenverkehr keinen Anstieg der  $NO$ -Konzentration?

## Stadt und Land:

In der folgenden Abbildung wird der Tagesgang der Ozonkonzentration in einem Stadtzentrum mit demjenigen in einer ländlichen Gegend verglichen:



In ländlichen Gebieten sind die Ozontagesgänge und insbesondere der abendliche Abfall der Ozonkonzentrationen wegen der geringeren Emissionen von Primärschadstoffen ( $NO$ ,  $VOC$ ) in der Regel weniger ausgeprägt. Hingegen kann das während der Bildung aus den Ballungsräumen in ländliche Gebiete verfrachtete Ozon dort über Nacht erhalten bleiben und während mehreren Tagen angereichert werden. Die Ozonbelastung ist deshalb auf dem Lande häufig höher als in der Stadt.

Obige Abbildung stammt aus der Zeit vor der Einführung des Abgaskatalysators. Heute ist der Unterschied zwischen städtischer und ländlicher Ozonbelastung geringer, denn als Folge der Einführung des Katalysators ist auch in den Städten weniger ozonabbauendes  $NO$  vorhanden.

## Jahreszeit und Wetter:

### Aufgabe 8:

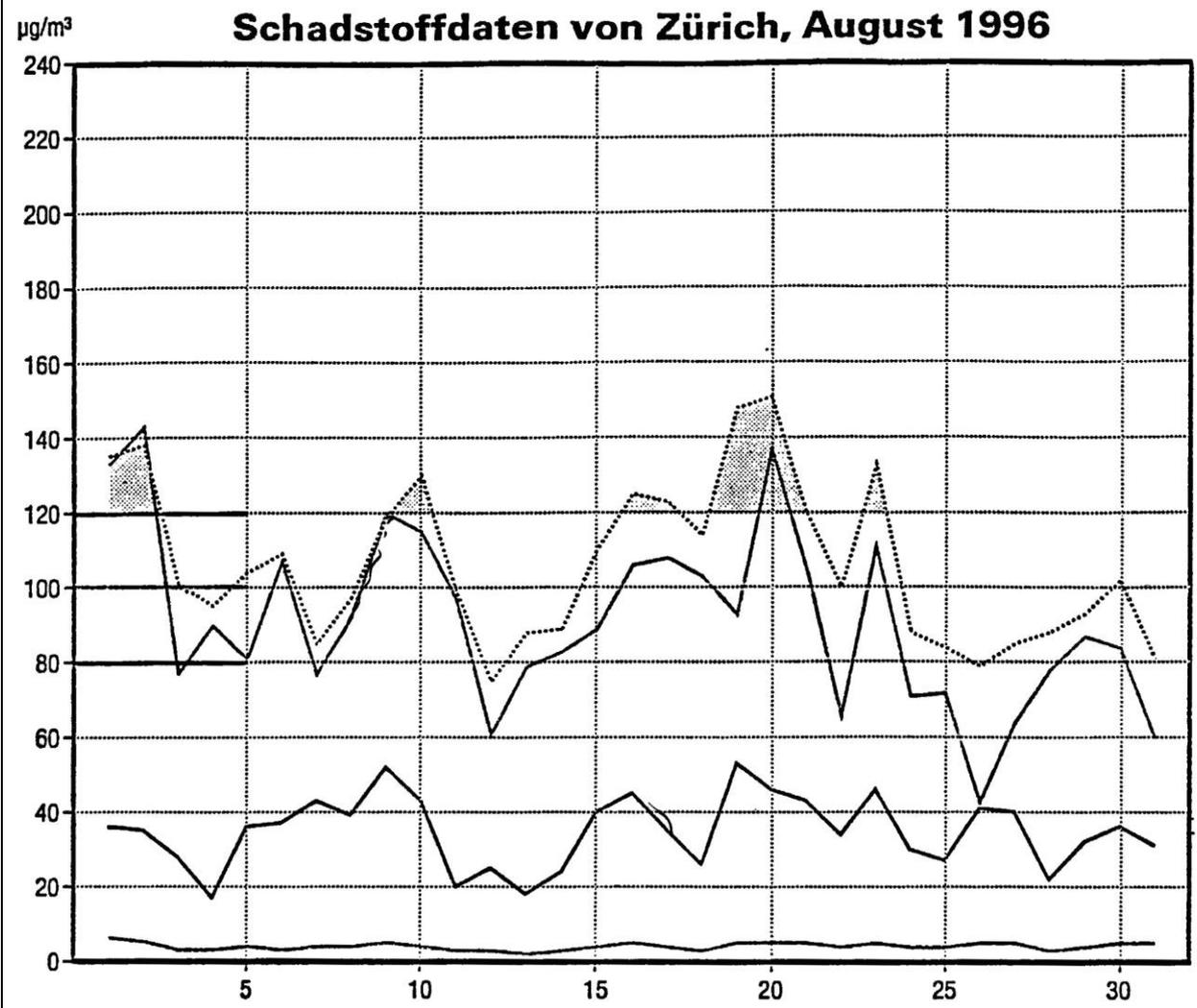
- a) Warum werden die Ozongrenzwerte nur im Sommer überschritten?
- b) Erklären Sie die Schwankungen der Ozon- und der Stickstoffdioxid-Konzentration in der folgenden Grafik; beachten Sie die entsprechenden Wetterdaten auf der nächsten Seite.

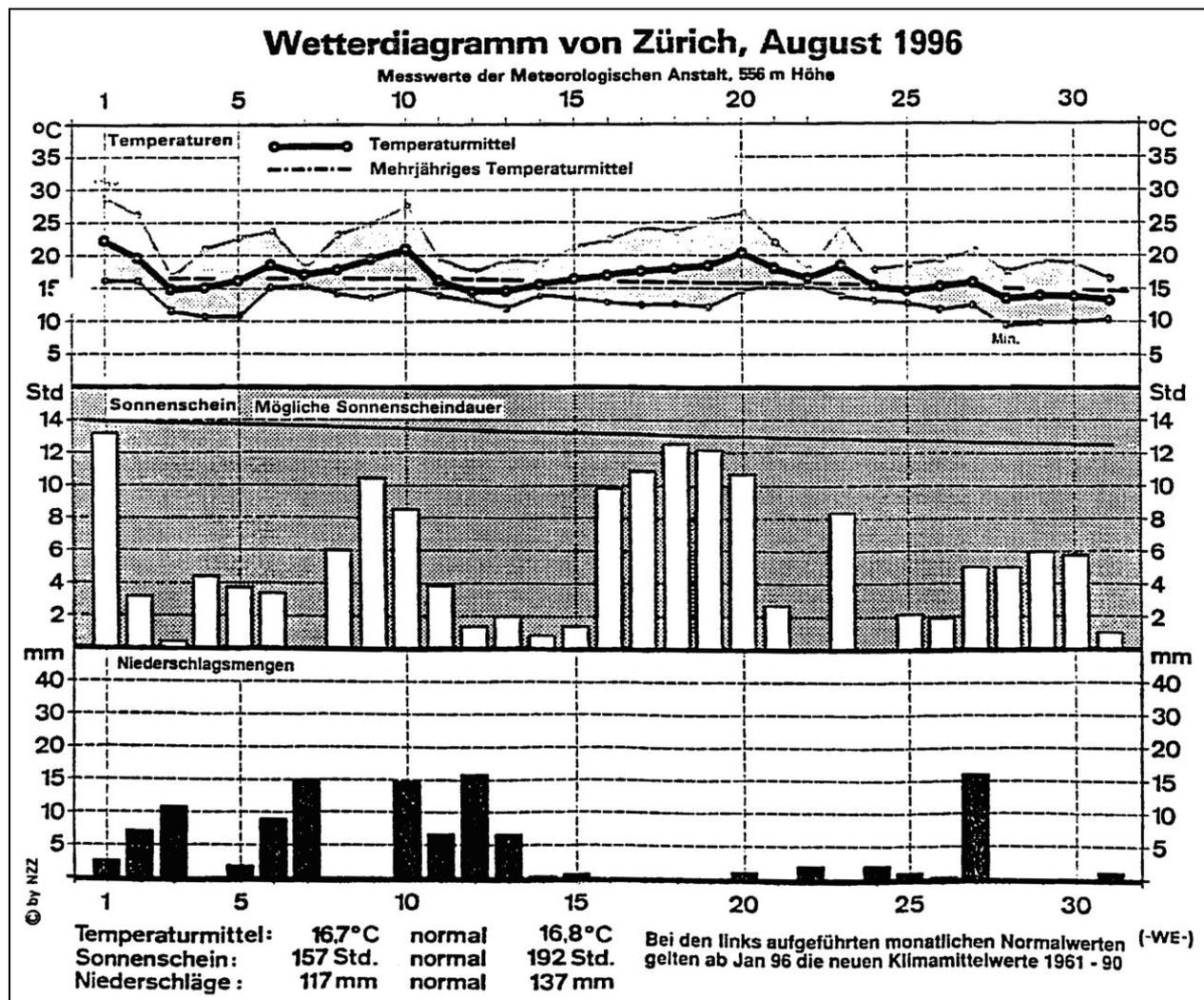
Legende zu den Schadstoffkurven:

- oberste Kurve: Ozon (ausgezogen: Stadt Zürich; gestrichelt: Bachtel)
- zweitunterste Kurve: NO<sub>2</sub>
- unterste Kurve: SO<sub>2</sub>

Zum Vergleich die Grenzwerte der Luftreinhalteverordnung:

O<sub>3</sub>: 120 µg/m<sup>3</sup>; SO<sub>2</sub>: 100 µg/m<sup>3</sup>; NO<sub>2</sub>: 80 µg/m<sup>3</sup>.





## Interpretation von Messdaten:

**Aufgabe 9:** Für diese Aufgabe benötigen Sie einen Computer mit Internetzugang.

- Zu den Messdaten des nationalen Beobachtungsnetzes für Luftschadstoffe (NABEL) gelangen Sie über die Internetseite des Bundesamtes für Umwelt (BAFU): [www.bafu.admin.ch](http://www.bafu.admin.ch). Wählen Sie in der *Themenauswahl* das Thema Luft und darin Luftbelastung > Messnetz NABEL > Messtationen. Das NABEL-Netz umfasst 16 Stationen, die verschiedene typische Standorte repräsentieren. Welche Standorttypen werden unterschieden?
- Entscheiden Sie sich für eine Messstation in Ihrer Nähe. Wählen Sie Luftbelastung > Datenabfrage → Abfrage nach Station. Lassen Sie sich für Ihre Station Stundenmittelwerte von Ozon, Niederschlag und Globalstrahlung über einen Zeitraum von 2 bis 3 Wochen im Sommer graphisch darstellen. Können Sie einen Zusammenhang zwischen Ozon- und Wetterdaten erkennen?
- Lassen Sie sich Stundenmittelwerte von Ozon und NO<sub>2</sub> über einen Zeitraum von wenigen Tagen darstellen. Entsprechen die Kurven dem, was Sie über den Tagesgang der beiden Konzentrationen gelernt haben?

- d) Wählen Sie Abfrage nach Schadstoff → Ozon. Wählen Sie einige Messstationen, die verschiedene Standorttypen repräsentieren, und eine sommerliche etwa einwöchige Periode. Erklären Sie die Unterschiede zwischen den Standorten.
- e) Suchen Sie im Internet die gesetzlichen Grenzwerte für die Ozonbelastung in der Schweiz.
- f) Gehen Sie zurück zur BAFU-Seite und wählen Sie Luftbelastung > Historische Daten > Messberichte. An wievielen Tagen in einem vergangenen Jahr wurde - für einen Standorttyp, der Ihrer Wohnregion entspricht - der Stundengrenzwert für Ozon ( $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) überschritten? Während wievieler Stunden insgesamt? Wieviele waren es im Jahr 2003 mit seinem ausserordentlich heissen Sommer?
- g) Neben dem NABEL gibt es in der Schweiz auch regionale (interkantonale) Messnetze. Für die deutsche Schweiz findet man die Messdaten auf den folgenden Internetseiten:
- [www.in-luft.ch](http://www.in-luft.ch) für die Zentralschweiz und den Aargau
  - [www.ostluft.ch](http://www.ostluft.ch) für die Ostschweiz
  - [www.luft-bs-so.ch](http://www.luft-bs-so.ch) für die Kantone Solothurn und Basel
- Informieren Sie sich über die Luftqualität in Ihrer Region.

## Lösungen:

### Aufgabe 1:

- Aus Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ) und flüchtigen organischen Verbindungen (VOC). Stickoxide stammen grösstenteils aus dem motorisierten Verkehr; VOC werden hauptsächlich von Industrie und Gewerbe emittiert.
- Ozon entsteht bevorzugt bei intensivem Sonnenschein im Sommer.
- Neben Ozon entstehen noch andere Sekundärschadstoffe in der emissionsbelasteten sommerlichen Atmosphäre; das gesamte Gemisch bezeichnet man als Sommersmog.
- Auswirkungen auf die Gesundheit: Schleimhautreizungen, Augenbrennen, Verminderung der Lungenfunktion, Atemwegserkrankungen.  
Auswirkungen auf die Vegetation: Schädigung von Bäumen (Blattschäden, langsames Wachstum), Ertragseinbussen in der Landwirtschaft.

### Aufgabe 2:

Moleküle in  $1 \text{ m}^3$  (= 1000 l) Luft:  $1000 \text{ l} / 24 \text{ l/mol} = 41.67 \text{ mol}$

Moleküle in  $40 \text{ }\mu\text{g}$  (=  $40 \cdot 10^{-6} \text{ g}$ )  $\text{NO}_2$ :  $40 \cdot 10^{-6} \text{ g} / 46 \text{ g/mol} = 8.69 \cdot 10^{-7} \text{ mol}$

Nur 1 in  $41.67 / 8.69 \cdot 10^{-7} = 4.79 \cdot 10^7 \approx 48$  Millionen Molekülen ist ein  $\text{NO}_2$ -Molekül.

Zur Veranschaulichung dieser Zahl: Wären Leute Moleküle in der Atmosphäre, so gäbe es in der ganzen spanischen Bevölkerung nur eine einzige  $\text{NO}_2$ -Person!

### Aufgabe 3:

- Aus der Luft.
- Durch Reaktion der Luftbestandteile Stickstoff und Sauerstoff nach der Gleichung  $\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{ NO}$ .
- Mit dem Prinzip von Le Châtelier. Höhere Temperatur begünstigt die endotherme Reaktion, also die Bildung der (energiereichen) Produkte.
- Weil sich nach der Abkühlung der Verbrennungsabgase das Gleichgewicht nur sehr langsam einstellt: die tiefe Temperatur hat eine geringe Reaktionsgeschwindigkeit zur Folge.
- Es entstehen weniger Stickoxide.

### Aufgabe 4:

- Bei Zunahme der Lichtintensität verschiebt sich das Gleichgewicht [5] nach rechts, bei deren Abnahme nach links.
- Solange diese Reaktion abläuft, wird Ozon produziert.

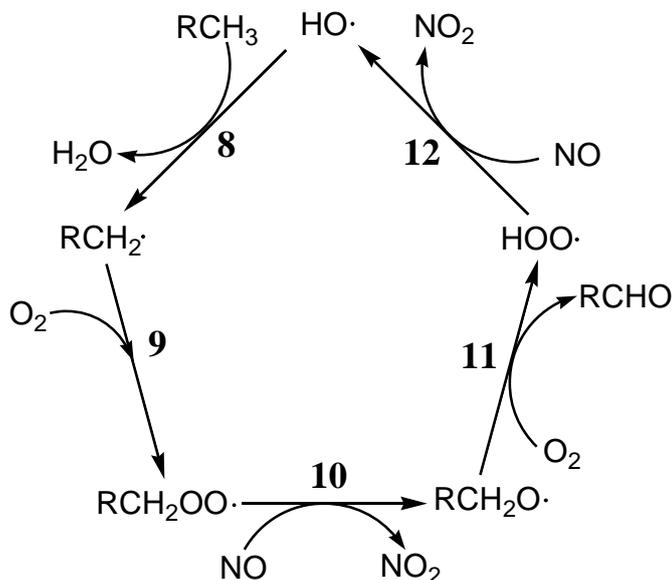
### Aufgabe 5:

a)  $\text{R-CH}_3 + 2 \text{ O}_2 + 2 \text{ NO} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2 \text{ NO}_2 + \text{R-CHO}$

b) Insgesamt wird kein  $\cdot\text{OH}$  verbraucht, da in Reaktion [12] gleichviel entsteht, wie in Reaktion [1] verbraucht wird.

**Aufgabe 6:**

a) Vgl. folgende Abbildung:



b) Zwei, da zwei NO-Moleküle in NO<sub>2</sub>-Moleküle umgewandelt werden, wenn ein VOC-Molekül den Kreislauf durchläuft. Die NO<sub>2</sub>-Moleküle bilden dann in Reaktion [3] je ein Ozonmolekül.

**Aufgabe 7:**

Zur Zeit des Abendverkehrs ist viel Ozon vorhanden; dadurch wird das emittierte NO sogleich in NO<sub>2</sub> umgewandelt (Ozonabbau nach Gleichung [4], verläuft wegen der hohen O<sub>3</sub>-Konzentration relativ rasch). Als Folge steigt die NO<sub>2</sub>-Konzentration, während die O<sub>3</sub>-Konzentration sinkt.

**Aufgabe 8:**

- a) Weil Reaktion [1] lichtabhängig ist (und weil alle beteiligten Reaktionen bei höherer Temperatur schneller verlaufen).
- b) Die Ozonkonzentration folgt mehr oder weniger der Konzentration des Vorläuferschadstoffes NO<sub>2</sub>. In der Stadt ist sie tiefer als auf dem Land (Bachtel). - Die Ozonwerte korrelieren mit der Sonnenscheindauer (mit einer Verzögerung von ein bis zwei Tagen).

**Aufgabe 9:**

- a) städtisch, verkehrsbelastet  
 städtisch  
 vorstädtisch  
 ländlich, an Autobahn  
 ländlich, unterhalb 1000 m  
 ländlich, oberhalb 1000 m  
 Hochgebirge
- b) Bei hoher Globalstrahlung (starkem Sonnenschein) sollten die Ozonwerte hoch sein.
- c) Vgl. Abschnitt „Tageszeit“ in Kapitel 5.

- 
- d) Vgl. Abschnitt „Stadt und Land“ in Kapitel 5. Der bedeutendste Faktor ist die mit der Verkehrsbelastung zusammenhängende NO-Emission. Im Süden (Tessin) spielen neben dem Klima auch die Immissionen aus dem Grossraum Mailand eine Rolle.
- e) Der Einstunden-Mittelwert von  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  darf höchstens einmal pro Jahr überschritten werden.
- 98 % der Halbstunden-Mittelwerte eines Monats dürfen  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  nicht übersteigen. Diese Informationen sind beispielsweise abrufbar auf der Internetseite des BAFU unter Luft > Gesetzgebung und Vollzug > Rechtsgrundlagen → 4. Verordnungen → Immissionsgrenzwerte der Luftreinhalteverordnung