

Behandlung des Themas Ozon im Chemieunterricht mit Hilfe anschaulicher Experimente

Ilka Parchmann, Bettina Kaminski, Ute Mester, Antje Paschmann

1. Einleitung

"Es geht um den Treibhauseffekt, also das Ozonloch, das durch das CO₂ aus den Schornsteinen verursacht wird."

[NDR-Frühreporter, 16.03.1995]

Aussagen wie diese sind in der Bevölkerung und damit auch in den Köpfen der Schülerinnen und Schüler weit verbreitet sind. Aufgabe eines zeitgemäßen Chemieunterrichts sollte es sein, verständliche Erklärungen für Phänomene zu liefern, die den Schülern in ihrem täglichen Leben begegnen. Eines dieser schwer verständlichen Themen ist die Ozonproblematik. Ein Pressespiegel (z.B. [1]) verdeutlicht die sehr unterschiedlichen und damit häufig verwirrenden Darstellungen zum Thema Ozon. Um die durch Ozon bzw. das Fehlen von Ozon verursachten Zusammenhänge zu verstehen, ist eine getrennte Betrachtung der Rolle des Ozons in der Ozonschicht, also der Stratosphäre und des bodennahen Ozons in der Troposphäre sinnvoll. Dafür sollte im Unterricht der Stoff Ozon mit seinen wichtigsten Eigenschaften vorgestellt und sein natürliches Vorkommen sowie die Verteilung in der Atmosphäre erörtern werden. Einige Experimente, die die Behandlung des Themas Ozon erleichtern, werden im folgenden vorgestellt.

2. Herstellung von Ozon im Chemieunterricht

Für die Untersuchung der Eigenschaften von Ozon ist es notwendig, über eine in der Schule leicht durchzuführende Möglichkeit der Ozondarstellung zu verfügen. Die "Entdeckung" einer solchen Möglichkeit gelingt mit Hilfe eines "History Lifts" in die Zeit der Entdeckung des Ozons. So wurde der Stoff Ozon erstmals von C. F. Schönbein im Jahre 1840 bewußt entdeckt, beschrieben und benannt. Der Name Ozon kommt vom griechischen Wort οζόν und bedeutet riechen oder duften. Schönbein entdeckte diesen eigenartig riechenden Stoff nicht nur nach heftigen Gewittern in der Natur, sondern ebenfalls in seinem Labor:

"Was mich betrifft, so bin ich sehr geneigt anzunehmen, daß die riechende Substanz, welche den Blitz entbindet, ganz dieselbe ist, welche durch die Elektrizität unserer Maschinen und die bei der Elektrolyse des Wassers entbunden wird..." [2]

Damit ist eine Möglichkeit dargestellt, mit der auch in der Schule mit Gerätschaften des Chemieunterrichts Ozon gewonnen werden kann: die Elektrolyse von Wasser bzw. Säure. Diese Methode wurde in der Vergangenheit bereits häufiger beschrieben, so u.a. von [3,4]. Ein Vorteil der hier vorgeschlagenen, von Kaminski entwickelten Apparatur ist einerseits die aufgrund der großen Stromdichte sehr hohe Ausbeute an Ozon, andererseits der Ausschluß einer Gefährdung durch Ozon (u.a. Verdacht auf krebserzeugendes Potential). In der von uns benutzten, geschlossenen Apparatur wird das Ozon vollständig im Kolbenprober aufgefangen, ein direkter Kontakt der Schüler mit Ozon wird vermieden.

Versuch 1: Herstellung von Ozon durch Elektrolyse [5]

Geräte und Chemikalien: 400 ml-Becherglas, 2 Platinelektroden, Glasrohr (Ø ca. 2,5 cm, Länge entsprechend der Platinelektrode), zweifach durchbohrter Gummistopfen, möglichst mit Teflonband umwickelt, gewinkeltes Glasrohr, Gleichspannungsquelle (0...40 V), Verbindungsschnüre, Kolbenprober, ggf. weitere Bechergläser, Waschflaschen mit Fritte, Schwefelsäure, w(H₂SO₄) = 30% (ätzend, C)

Durchführung: Die Apparatur wird laut Abb. 1 aufgebaut. Man verbindet die Elektroden mit der Gleichspannungsquelle und zwar die Platinelektrode im Glasrohr mit dem Pluspol, die andere mit dem Minuspol. Nun elektrolysiert man bei einer Spannung von 20 – 25 V, die Stromstärke beträgt etwa 5 A.

Das Anodengas wird direkt mit dem Kolbenprober aufgefangen, dabei sollte man durch vorsichtiges Ziehen am Kolbenprober immer einen leichten Unterdruck im Glasrohr erzeugen. Nach Beendigung der Elektrolyse kann man mit dem Anodengas die Untersuchungen auf Ozon durchführen.

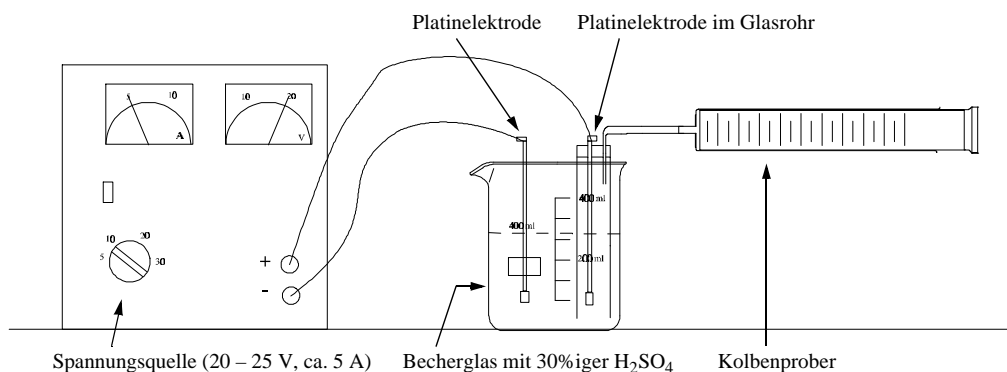
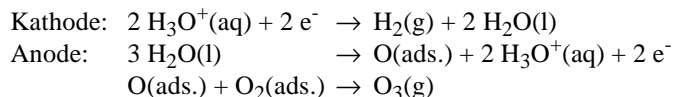


Abb.1: Herstellung von Ozon durch Elektrolyse

Ilka Parchmann, Bettina Kaminski, Ute Mester, Antje Paschmann,
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Didaktik der Chemie,
Postfach 2503, D-26111 Oldenburg

Ergebnis und Auswertung: Das Anodengas enthält je nach Versuchsbedingungen (z.B. Temperatur) bis zu 1% Ozon. Dabei laufen – vereinfacht – folgende Reaktionen ab:

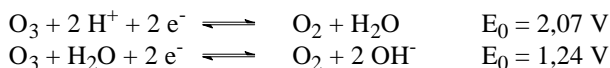


Als Nebenprodukt entsteht weiterhin Peroxodischwefelsäure.

3. Eigenschaften von Ozon

Eine neben dem charakteristischen Geruch sehr wesentliche Eigenschaft des Ozons ist seine starke Oxidationswirkung (s.u.).

Potentiale von Ozon [6]:



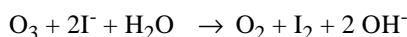
Ozon ist neben Fluor das stärkste Oxidationsmittel überhaupt. Auf dieser Oxidationswirkung beruhen etliche, z.T. schon früh entdeckte Nachweismethoden für Ozon, die bekannteste ist die Kaliumiodidmethode. Sie wurde bereits von Schönbein im Jahre 1844 beschrieben und für halbquantitative Ozonmessungen in der Atmosphäre verwendet [7]. Sie kann auch im Schulversuch sehr einfach qualitativ durchgeführt werden.

Versuch 2: Oxidation von Iodidionen zu Iod durch Ozon

Geräte und Chemikalien: Porzellanschale, Filterpapier, Pinzette, ggf. Waschflasche mit Fritte, Silikon Schlauch, Kolbenprober mit Anodengas aus Versuch 1, Kaliumiodidlösung, w(KI) ca. 5%, ggf. KI-Stärkepapiere oder KI-Stärke Lösung.

Durchführung: Einige Milliliter des Anodengases werden auf ein mit Kaliumiodidlösung getränktes Filterpapier geleitet. Alternativ kann das Gas durch eine Waschflasche geleitet werden, in der sich dieselbe Lösung befindet.

Ergebnis und Auswertung: Das Filterpapier bzw. die Lösung in der Waschflasche verfärben sich sofort braun, die Iodidionen werden zu Iod oxidiert.



Das KI-Verfahren wurde bis vor einigen Jahren in der Bundesrepublik Deutschland als offizielles Meßverfahren für bodennahes Ozon benutzt, indem man ein definiertes Luftvolumen durch eine KI-Lösung leitete und die Iodkonzentration titrimetrisch mit Natriumthiosulfat bestimmte. Dieses Verfahren hat sich allerdings als fehlerhaft herausgestellt, da die Iodidionen ebenfalls mit anderen oxidierend wirkenden Stoffen in der Atmosphäre, so z.B. NO₂, reagieren. Da NO₂ als Vorläufersubstanz von Ozon (s.u.) immer dann in der Atmosphäre vorkommt, wenn auch Ozon vorhanden ist, liefert ein solches

Meßverfahren zwangsläufig zu hohe Werte. Das Problem kann weitestgehend umgangen werden, wenn die jeweilige Lösung auf einen bestimmten pH-Wert gepuffert wird, wie z.B. von Rumpel vorgeschlagen [8], das Verfahren wird dadurch jedoch sehr viel aufwendiger. Alternativ kann die Oxidationswirkung von Ozon durch die Reaktion mit gelbem Blutlaugensalz (Oxidation des Eisens, Bildung des roten Blutlaugensalzes) [5], mit Mn²⁺-Salzen (Oxidation zu MnO₂) oder PbS (Oxidation zu PbSO₄) demonstriert werden [9].

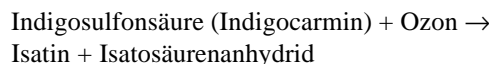
Eine weitere bedeutsame Eigenschaft von Ozon ist die Ozonisierung von Doppelbindungen in organischen Molekülen. Hierauf beruhen u.a. die Entfärbung von Farbstoffen, aber auch die Zerstörung von Gummi. Die Entdeckung und Nutzung der Entfärbung verschiedener Farbstoffe durch Ozon war ebenfalls schon im 19. Jahrhundert bekannt. So wird z.B. eine verdünnte Lösung eines Universalindikators durch das Anodengas aus Versuch 1 vollständig entfärbt. Noch interessanter ist allerdings die Reaktion mit dem blauen Farbstoff Indigo-carmin, die im folgenden Experiment demonstriert wird.

Versuch 3: Entfärbung von Indigo-carmin durch Ozon

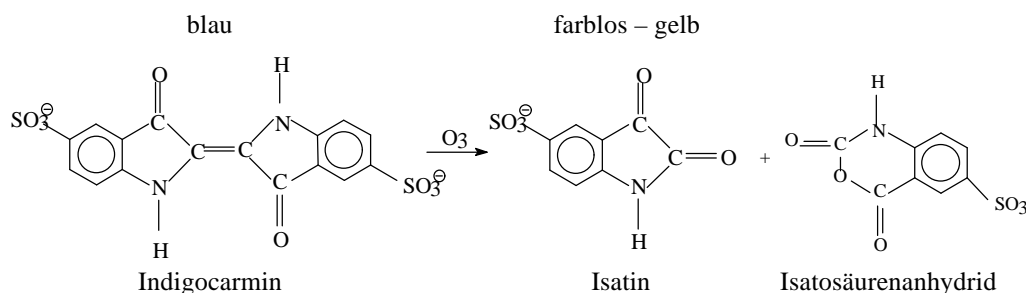
Geräte und Chemikalien: Waschflasche mit Fritte, Silikon-schlauch, Kolbenprober mit Anodengas aus Versuch 1, Indigo-carminlösung, w(C₁₆H₈N₂Na₂O₈S₂) = 0,0005 – 0,001%

Durchführung: Man leitet das Anodengas durch etwa 50 ml der Indigo-carminlösung. Die Waschflasche mit der Lösung wird dabei leicht geschüttelt.

Ergebnis und Auswertung: Die blaue Lösung kann durch 20 – 100 ml (je nach Konzentration des Ozons) des Anodengasgemisches vollständig entfärbt werden. Die Doppelbindung im Indigo-carminmolekül wird ozonisiert, als Endprodukt entsteht das hellgelbe Isatin (Gleichung vereinfacht nach [10]) (s.u.):



Diese Reaktion ist deswegen von besonderem Interesse, weil sie ebenfalls als einfache Meßmethode für bodennahes Ozon genutzt werden kann. Wie von uns durchgeführte Untersuchungen gezeigt haben, bestehen relevante Querempfindlichkeiten wahrscheinlich nur hinsichtlich anderer, hoch reaktiver Peroxide (z.B. Peroxyacetylnitrat, PAN). Diese haben einen ähnlichen Entstehungsmechanismus in der Atmosphäre wie Ozon, außerdem eine vergleichbare Wirkung auf Organismen. Ihre Konzentration in der Atmosphäre ist allerdings sehr gering, so daß diese Querempfindlichkeit vermutlich zu vernachlässigen ist. (Nähere Angaben zu diesem von uns seit drei Jahren durchgeführten Verfahren sind in [11] nachzulesen. Weiters wurde es als "Jugend forscht"-Projekt von Ebel et al. in Chemie in der Schule, 43 (1996) 6, beschrieben.)



Dieses Verfahren ist innerhalb bestimmter Fehlergrenzen (bis zu $20 \mu\text{g}/\text{m}^3 \cong \text{ca. } 10 \text{ ppb}$) gut geeignet, um auch in der Schule bodennahes Ozon zu messen. Die zur Zeit an offiziellen Ozonmeßstellen praktizierte Methode der UV-Photometrie ist für die Schule aufgrund des großen apparativen Aufwandes sicherlich nicht geeignet. Sie kann allerdings, wie bereits von Kremer und Fritz vorgeschlagen, qualitativ demonstriert werden, indem man ein ozonhaltiges Gas, z.B. aus Versuch 1, zwischen eine UV-Handlampe ($\lambda_{\text{max}} = 254 \text{ nm}$) und einen mit einem Fluoreszenzindikator behafteten Dünnschichtchromatographieschirm bläst. Man erkennt "rosafarbende Wölkchen", die durch die UV-Absorption des Ozons entstehen, da dann die Fluoreszenz auf dem Schirm nicht mehr angeregt werden kann [5, 12, 13].

Eine weitere sehr eindrucksvolle Methode zur Demonstration der Ozonisierung organischer Moleküle an deren Doppelbindungen ist die Zerstörung von Gummi. So müssen Gummischläuche, die mit Ozon in Kontakt kommen, bereits nach sehr kurzer Zeit ausgewechselt werden. Eindrucksvoller zur Demonstration dieser Reaktion von Ozon mit Gummi ist jedoch der folgende Versuch.

Versuch 4: Zerstörung von Gummi durch Ozon

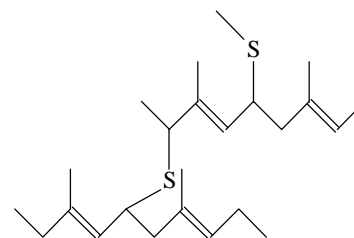
Geräte und Chemikalien: Luftballon, möglichst dünnwandig und prall aufgeblasen, Kolbenprober mit Anodengas aus Versuch 1

Durchführung: Man bläst das ozonhaltige Gas direkt auf den Luftballon.

Ergebnis und Auswertung: Ein dünner und prall aufgeblasener Luftballon platzt augenblicklich, sobald er mit Ozon in Kontakt kommt. Qualitativ bessere Ballons verlieren schon nach kurzer Zeit deutlich an Luft. Die Doppelbindungen im Gummi werden von Ozon gespalten (s.u.).

Die durch Ozon verursachten Verfärbungen an Blättern beruhen vermutlich ebenfalls auf der oxidierenden bzw. der ozonisierenden Wirkung auf Zellwände oder Zellinhaltsstoffe.

Zur Ermittlung der in Abb. 3 dargestellten Ozonverteilung in der Atmosphäre wird neben den photometrischen Verfahren noch eine weitere Methode angewandt: die Chemilumineszenz.



Gummi, vulkanisiert (Ausschnitt)

zenz. Grundlage dieses Verfahrens ist die Aussendung von Strahlung, die als Folge einer Reaktion mit Ozon von Stoffen wie Rhodamin B oder Eosin emittiert wird [14]. Im Schulunterricht kann diese Leuchterscheinung ebenfalls eindrucksvoll demonstriert werden, siehe dazu auch Brandl und Tausch [15].

Versuch 5: Chemilumineszenz durch Ozon [13]

Geräte und Chemikalien: 2 Kolbenprober, 250ml-Rundkolben, doppelt durchbohrter Stopfen, mit Teflonband umwickelt, 2 gewinkelte Glasrohre, Schlauchmaterial aus Silikon, ggf. Magnetrührer mit Rührkern, Anodengas aus Versuch 1, gesättigte Eosin- oder Fluoresceinlösung in Ethanol (abs.)

Aufbau: siehe Abb. 2

Durchführung: Man leitet das Anodengas aus Versuch 1 mehrmals über die Eosin- oder Fluoresceinlösung. Der Raum ist während des Versuches unbedingt abzudunkeln. In der Regel ist der Effekt deutlicher zu erkennen, wenn die Lösung während des Herüberleitens gerührt wird.

Ergebnis und Auswertung: Das Anodengas erzeugt eine deutliche, rötlich bis grüne Fluoreszenz über der Lösung, diese ist sogar bei einem mehrmaligem Herüberleiten noch sichtbar. Mit reiner Luft tritt dagegen kein Leuchten auf. Der genaue Mechanismus der durch Ozon angeregten Chemilumineszenz ist nach Brandl und Tausch [15] noch nicht bekannt.

Dieses Experiment ist im Hinblick auf die Gesundheitsgefährdung durch Ozon ebenfalls unproblematisch, da das Ozon nicht entweichen kann.

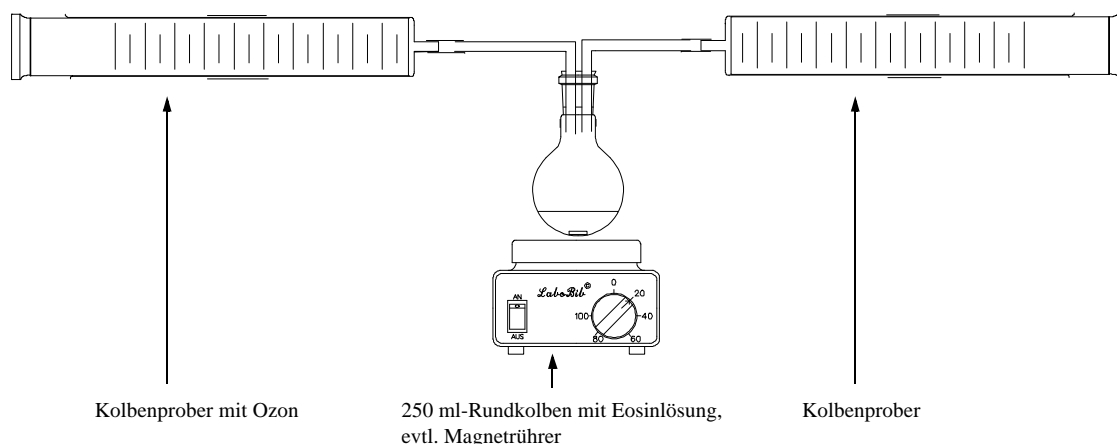


Abb.2: Ozoninduzierte Chemilumineszenz

4. Ozon in der Atmosphäre



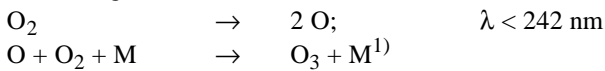
Abb.3: Ozonverteilung in der Atmosphäre [14]; Die Einheit "D" steht für "Dobson-Unit", definiert als $1D \equiv 10^{-3} \text{ cm} \times \text{atm}$. Würde man die gesamte Masse einer Ozonsäule in der Atmosphäre (durchschnittlich 300DU) unter Normalbedingungen auf eine Schicht zusammenpressen, so wäre diese Schicht nur 3mm dick!

Abb. 3 zeigt die Ozonverteilung in der Atmosphäre. Dabei erkennt man ein deutliches Maximum in der Stratosphäre, in etwa 20 – 50 km Höhe über der Erde. Hier liegt die sogenannte Ozonschicht. Um in der Schule deren Zustandekommen zu demonstrieren, sind teure UV-Lampen notwendig, die eine sehr kurzwellige Strahlung ($<220 \text{ nm}$) emittieren. Nur diese ist in der Lage, molekularen Sauerstoff zu spalten. Entsprechende Apparaturen sowie Versuchsvorschriften sind von Kremer und Fritz und von Tausch entwickelt und beschrieben worden [12, 16]. In der Stratosphäre sowie in den jeweiligen Versuchsaapparaturen kommt es zur Bildung und zum Abbau von Ozon nach folgendem Mechanismus:

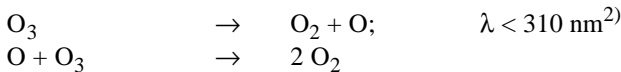
Chapman-Mechanismus in der Stratosphäre

(verändert nach [17]):

Ozonbildung:



Ozonabbau:



Auf dieser Absorption von UV-Strahlung durch Ozon beruht die Schutzwirkung der Ozonschicht, ein Vordringen der energiereichen UV-Strahlung zur Erde wird verhindert.

¹⁾ M symbolisiert einen beliebigen Stoßpartner, der zur Energieabfuhr notwendig ist, da das Ozon andernfalls sofort wieder zerfallen würde.

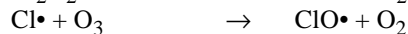
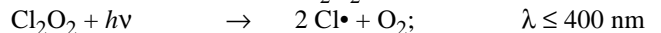
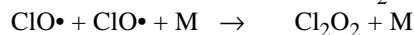
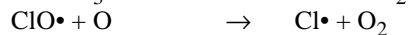
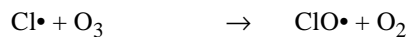
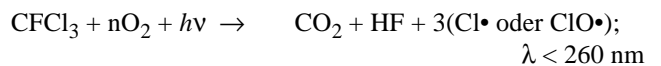
²⁾ Nur durch Einwirkung dieser kurzwelligen Strahlung entsteht der reaktive Singulett-Sauerstoff, während eine Ozonspaltung auch durch längerwelligere Strahlung möglich ist.

Dieser Mechanismus aus Ozonauf- und -abbau wurde 1930 von dem Engländer Sydney Chapman postuliert [17]. Später entdeckten u.a. die letztjährigen Nobelpreisträger Sherwood Rowland, Mario Molina und Paul Crutzen weitere ozonzerstörende Reaktionen in der Atmosphäre, so beispielsweise die mit Stickstoffoxiden. Diese mit Ozon reagierenden Substanzen sind zum Teil natürlichen Ursprungs, andererseits aber auch von Menschen freigesetzt. Insbesondere der Ozonzerstörung durch Chlorradikale aus FCKWs, die aufgrund von meteorologischen Bedingungen hauptsächlich über der Antarktis stattfindet, ist in den letzten Jahren in ihrer Bedeutung erkannt worden (z.B. [18]).

Diese ozonabbauenden Reaktionen in der Stratosphäre, also unter dem Einfluß von UV-Strahlung, können in der Schule mit Hilfe der Apparate von Kremer/Fritz oder Tausch demonstriert werden. Einfacher und vor allem kostengünstiger ist die von uns vorgeschlagene Variante (Versuch 6, nach [13]). Hier wird zunächst das reine Ozon-Sauerstoffgemisch aus Versuch 1 in einem Quarzglasrohr für ca. 20 Minuten mit einer UV-Handlampe ($\lambda_{\text{max}} = 254 \text{ nm}$) bestrahlt (siehe Abb. 4).

Eine Messung der Ozonkonzentration vor und nach der Bestrahlung, z.B. mit der Indigocarminmethode, zeigt eine geringfügige Abnahme der Konzentration aufgrund des oben genannten Ozonabbaus durch UV-Strahlung. Wiederholt man den Versuch anschließend, nachdem man dem Gasgemisch einen FCKW oder auch N_2O zugesetzt hat, so erkennt man nun eine deutliche Abnahme der Ozonkonzentration. Qualitativ kann dieser Ozonabbau mit Hilfe der Chemilumineszenz (siehe Versuch 5) gezeigt werden. Das Gasgemisch vor dem Bestrahlen, aber auch das Gasgemisch nach dem Bestrahlen ohne Zusatz eines ozonabbauenden Stoffes verursachen eine deutliche Chemilumineszenz. Nach der Reaktion des Ozons mit einem FCKW oder N_2O unter UV-Bestrahlung ist dagegen keine Leuchterscheinung sichtbar (Nähere Angaben siehe [13]). Es finden vermutlich – ähnlich wie in der Atmosphäre – die folgenden Reaktionen statt:

Ozonabbau durch FCKW (verändert nach [17]):



usw.

Für das Vorkommen von Ozon in der Troposphäre muß es eine andere Erklärung geben, da die zur Sauerstoffspaltung not-

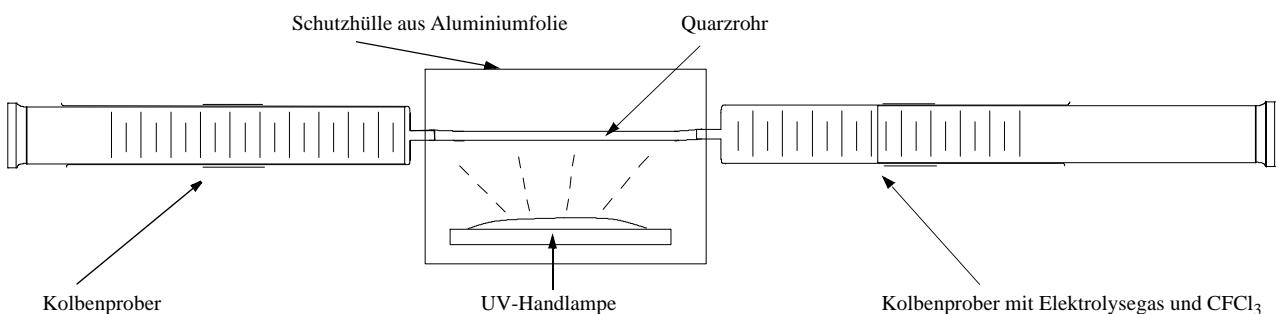
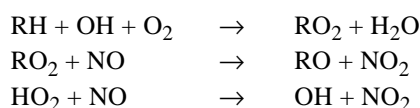


Abb. 4: Ozonabbau durch FCKW unter dem Einfluß kurzwelliger UV-Strahlung [13]

wendige kurzweilige UV-Strahlung den Erdboden u.a. durch die Absorptionsfähigkeit des Ozons nicht erreicht. Schüler vermuten oftmals, daß das "Ozon vom Himmel fällt", weil Ozon schwerer ist als Luft. Diese Diffusion aus der Stratosphäre in die Troposphäre wird jedoch schon durch die deutliche Temperaturabnahme unter der Ozonschicht weitestgehend unterbunden. Auch würde der größte Teil des Ozon aufgrund seiner Reaktivität in der Troposphäre abreaktieren, bevor es den Erdboden erreicht. Da also auf diesem Wege nur ein geringer Teil des Ozons zum Erdboden gelangt, muß es direkt in Bodennähe einen Mechanismus der Ozonbildung geben. Auch hier ist die Sonnenstrahlung beteiligt. Durch längerwelligere UV-A-Strahlung kann Stickstoffdioxid gespalten werden, wobei ebenfalls atomarer Sauerstoff entsteht, der zur Ozonbildung führt (verändert nach [17]):



Diese Ozonbildung wird durch weitere Luftverunreinigungen, z.B. Kohlenwasserstoffe, die Stickstoffmonoxid über mehrere Reaktionsschritte zum Stickstoffdioxid aufoxidieren, verstärkt, vereinfacht nach:



Da es sich um eine lichtabhängige Gleichgewichtsreaktion handelt, kommt es ohne die notwendige UV-Strahlung zum schadstoffkatalysierten Ozonabbau nach



So wird auch verständlich, warum im Jahresmittel häufig die Ozonkonzentrationen in sogenannten Reinluftgebieten, insbesondere in Höhenlagen aufgrund der stärkeren Sonneneinstrahlung, höher sind als in den Ballungszentren. In Ballungszentren führen hohe Schadstoffkonzentrationen (NO_2 , KW u.a.) bei intensiver Sonnenstrahlung oftmals zu extrem großen Ozonkonzentrationen. Diese werden jedoch gegen Abend auch sehr schnell durch andere Schadstoffe (z.B. NO) wieder fast vollständig abgebaut. Weiterhin kommt es natürlich zu einem Transport von Schadstoffen, so daß auch in den umgebenden Gebieten eine, allerdings deutlich geringere Ozonbildung stattfindet. Der Abbau ist hier jedoch aufgrund fehlender Reaktionspartner sehr unvollständig, so daß sich das Ozon über das Jahr hin akkumuliert (s.u.).

Tab.1a: Jahresmittelwerte für Ozon in Hannover/Linden und auf dem Wurmberg/Braunlage [19]

Station	1991	1992	1993	1994
Hannover/Linden	40	50	46	49
Wurmberg/Braunlage	87	91	87	91

Tab.1b: Jahreshöchstwerte für Ozon in Hannover/Linden und auf dem Wurmberg/Braunlage [19]

Station	1991	1992	1993	1994
Hannover/Linden	221	271	220	291
Wurmberg/Braunlage	279	266	212	235

5. Anmerkungen zum Unterricht

Die hier vorgestellte Fülle von Experimenten mit unterschiedlichem Aufwand und Schwierigkeitsgrad erleichtert eine anschauliche Behandlung der Ozonthematiken im Unterricht. So ist es möglich, mit jüngeren Schülerinnen und Schülern lediglich auf einem phänomenologischen Niveau den Stoff Ozon sowie seine Eigenschaften, Bedeutung und Wirkung vorzustellen und ggf. seine Konzentration in Bodennähe zu messen. Mit älteren Schülern können dann die Reaktionen, insbesondere die unter dem Einfluß von UV-Strahlung, im Detail besprochen werden.

Wir danken Herrn Prof. Jansen für die Unterstützung der Arbeit und die permanente Bereitschaft zur konstruktiven Diskussion.

Literatur

- [1] Haupt, P.: *Die Chemie im Spiegel einer regionalen Tageszeitung*, Bd. 1-4, Oldenburg 1987-1996
- [2] Schönbein, C.F.: *Beobachtungen über den bei der Elektrolyse des Wassers und dem Ausströmen der gewöhnlichen Elektrizität aus Spitzen sich entwickelnden Geruch*; in: J.C. Poggendorff (Hrsg.): *Annalen der Physik und Chemie*, Bd. 50, Leipzig: Verlag J.A. Barth, 1840; S.632
- [3] Reinboldt/Schmitz-DuMont: *Chemische Unterrichtsversuche*, Dresden u. Leipzig: Th. Steinkopff, 1948
- [4] Boeck, H.: *Chemische Schulexperimente*, Bd. 3, Frankfurt: Harri Deutsch, 1978
- [5] Kaminski, B.: *Ozon durch Elektrolyse von Schwefelsäure*, CHEMKON 2/96 (1996) S. 85f
- [6] Weast, R.C. (Ed.): *Handbook of Chemistry and Physics*, 56th ed., Cleveland: CRC-Press, 1975
- [7] Schönbein, C.F.: *Über die Erzeugung des Ozons auf chemischem Wege*; Basel, 1844, S. 103ff
- [8] Rumpel, K.-J. et al.: *Ozon-Meßverfahren*; in: PdN-Ch. 2/45 (1996), S. 14ff
- [9] Blume, R. et al.: *Ozon aus der Elektrolyse von Schwefelsäure*; in: PdN-Ch. 2/45 (1996), S. 35ff
- [10] Grosjean, D. et al.: *Ozone Fading of Natural Organic Colorants: Mechanism and Products of the Reaction of Ozone with Indigos*; in: *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 22, No. 3, 1988; S. 292ff
- [11] Parchmann, I. et al.: *Das Indigocarminverfahren – eine schulrelevante Meßmethode für bodennahe Ozon*; in: CHEMKON, im Druck
- [12] Fritz, H, Kremer, M.: *Die Ozonproblematik im fächerverbindenden Unterricht*, Tuttingen 1992
- [13] Parchmann, I. und Paschmann, A.: *Abbau von Ozon durch FCKW oder N_2O* ; in: MNU, im Druck, 1996
- [14] Feister, U.: *Ozon – Sonnenbrille der Erde*, Leipzig: Teubner, 1990; S. 25
- [15] Brandl, H. und Tausch, M.: *Lichtbeteiligung bei chemischen Reaktionen*, MNU im Druck; und pers. Mitt.
- [16] Tausch, M. et al.: *Ozon – der andere Sauerstoff*, PdN-Ch 1/42 (1993) 26ff
- [17] Graedel, T.E.; Crutzen, P.J.: *Chemie der Atmosphäre*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford, 1994
- [18] Rowland, F.S.: *Der Abbau des stratosphärischen Ozons durch Chlor-Fluor-Kohlenwasserstoffe*; in: *Angew. Chemie*, 108 (1996), S. 1909ff
- [19] Lufthygienisches Überwachungssystem Niedersachsen: Ozonkonzentrationen in Niedersachsen 1984-1994; S.15