

B LUFTVERSCHMUTZUNG

1 Einleitung

Die Luftverschmutzung ist größtenteils auf Schadstoffe zurückzuführen, die bei den Energiewandlungen aus fossilen und nuklearen Rohstoffen entstehen. Diese erfolgen beispielsweise zur Stromerzeugung (in Kraftwerken), zum Heizen (von Gebäuden) und zur Gewährleistung der Mobilität (im Flugverkehr und auf der Straße).

1.1 Zusammensetzung der Atmosphäre

Als Atmosphäre bezeichnet man den ca. 500 km dicken Luftbereich zwischen der Erde und dem Weltall. Dieser absorbiert den größten Teil der einfallenden UV- (ultravioletten) Strahlung und ermöglicht dadurch das Leben der Menschen auf diesem Planeten.

Die uns (meist ☺) bekannte Zusammensetzung der Luft (Abb.1) gilt für die **Troposphäre**, die ca.10 bis 15 km dicke Luftschicht, die der Erde am nächsten ist.

Gas	Anteil in Vol%
Stickstoff	78,09
Sauerstoff	20,94
Edelgase	0,93
Restliche Luft	0,04
(davon Kohlenstoffdioxid)	(0,038)

Abb.1: Zusammensetzung trockner Luft

Der Abb.2 sind die Anteile oder Konzentrationen weiterer Stoffe zu entnehmen, die in der Atmosphäre vorzufinden sind.

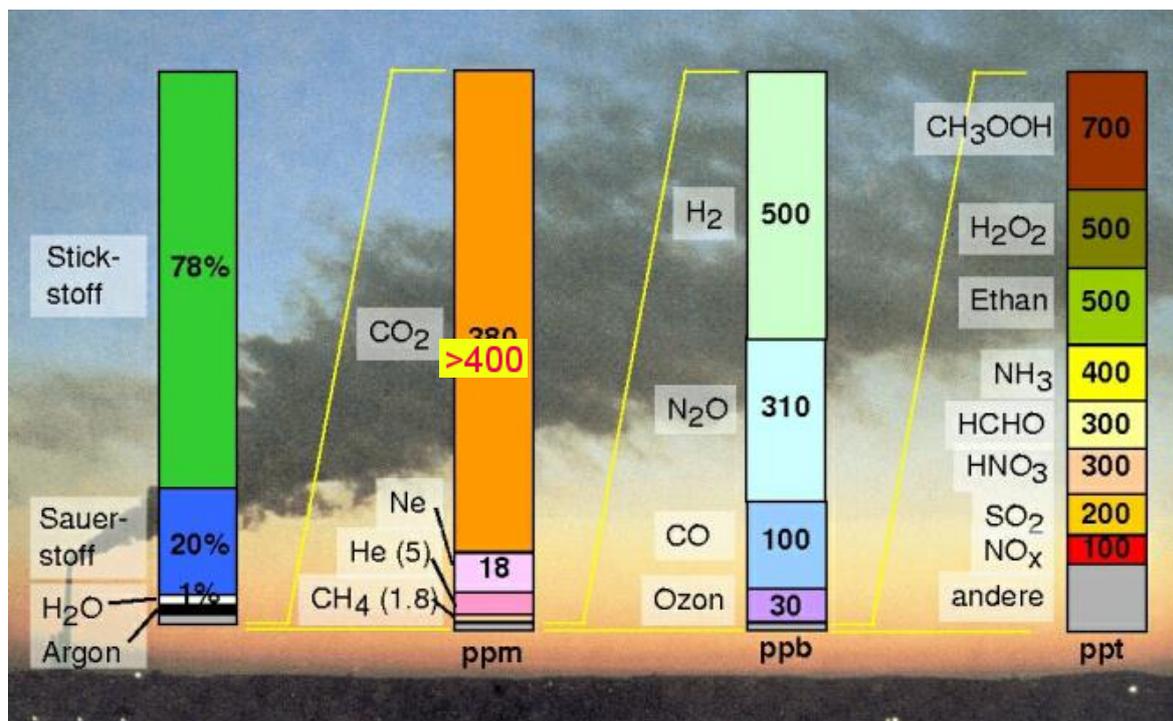


Abb.2: Zusammensetzung der Atmosphäre (Quelle: Dr.Schultz/Max-Planck-Institut)

Über der Troposphäre befindet sich die **Stratosphäre**. Sie reicht bis zu einer Höhe von ca. 50 km und nimmt die einfallende UV-Strahlung auf.

1.2 Luftfeuchtigkeit

Neben diesen Gasen enthält die Luft eine bestimmte, zeitlich und räumlich schwankende Menge an Wasser. Dieses kann in unterschiedlichen Aggregatzuständen vorliegen: fest (Hagel, Schnee), flüssig (Regentropfen, Nebel) oder gasförmig (Wasserdampf).

Unter **Luftfeuchtigkeit** versteht man den Gehalt der Atmosphäre an gasförmigem Wasserdampf.

Die **absolute Feuchte** ist die in der Luft enthaltene Masse an Wasserdampf.

$$f = \frac{m_W}{V}$$

f: absolute Feuchte in kg/m³
m_W: Wasserdampfmenge in kg
V: Volumen in m³

Üblicherweise wird für die absolute Feuchte die Einheit g/ m³ verwendet.

Die **Sättigungsfeuchte** oder **maximale Feuchte** ist die maximale Masse an Wasserdampf, die in der Luft enthalten sein kann.

$$f_{\max} = \frac{m_{W,\max}}{V}$$

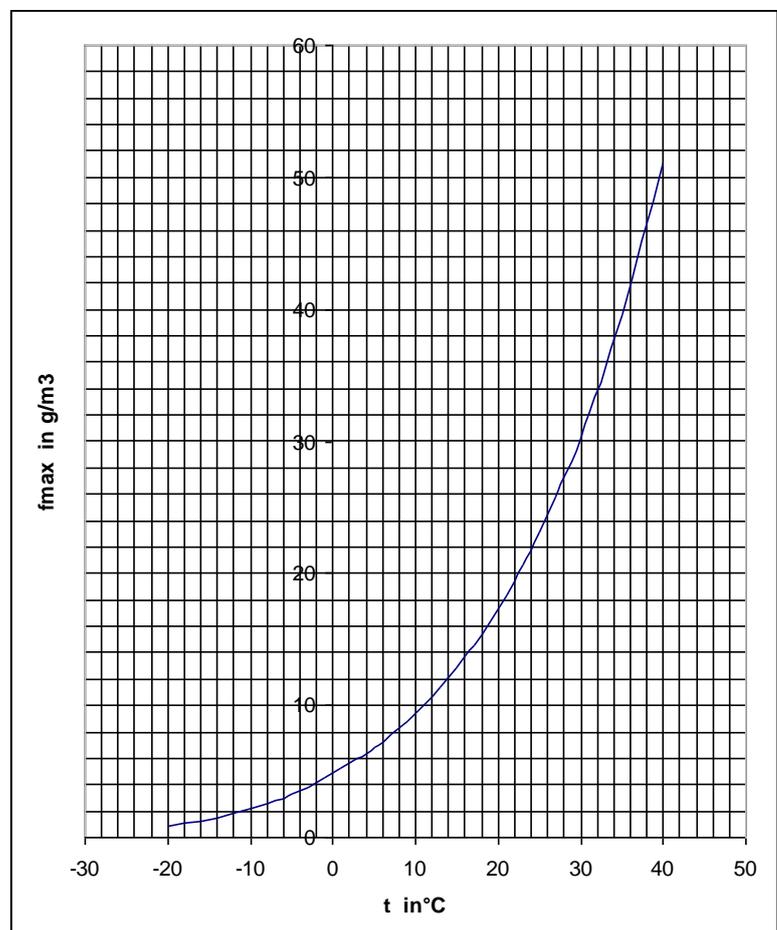
f_{max}: absolute Feuchte in kg/m³
m_{W,max}: maximale Wasserdampfmenge in kg
V: Volumen in m³

Üblicherweise wird für die Sättigungsfeuchte die Einheit g/m³ verwendet.

Die Sättigungsfeuchte ist temperaturabhängig (Abb.2).

Die Sättigungsfeuchte spielt im Alltag eine größere Rolle. So kommt es beispielsweise in der Natur beim Abkühlen der Atmosphäre zur Bildung von Nebel in der Luft oder Tau auf den Pflanzen. In der Technik kann aufgewärmte Luft bei Trocknungsvorgängen die Feuchtigkeit von Stoffen aufnehmen.

Abb.2: Temperaturabhängigkeit der Sättigungsfeuchte



Die **relative Feuchte** ist das Verhältnis der tatsächlichen zur maximal möglichen Masse an Wasserdampf in der Luft.

$$\varphi = \frac{f}{f_{\max}} \cdot 100$$

φ : relative Feuchte in %
 f : absolute Feuchte in kg/m^3
 f_{\max} : maximale Feuchte in kg/m^3

2 Emissionen

Bei der Umwandlung der fossilen und nuklearen Energierohstoffe in Nutzenergie finden zum einen Energieverluste in Form von Abwärme statt, zum anderen entstehen große Mengen an Abfällen, die teilweise Schadstoffe darstellen.

Das Freisetzen von Abgasen, schadstoffhaltiger Abluft oder anderen Störfaktoren in die Atmosphäre bezeichnet man als **Emission**.

Emissionen können demnach **Feststoffe** (z.B. Staub, Ruß, Schwermetalle), **Flüssigkeiten**, **Gase**, **Strahlen** (z.B. Radioaktivität, elektromagnetische Strahlen), **Geräusche** (z.B. Lärm) oder **Wärme** sein.

Man bezeichnet die Verursacher der Emissionen als **Emittenten**.

Für jeden Emittenten, z.B. jede technische Anlage vom Automobil bis zum Kraftwerk, gibt es im Rahmen des Gesundheit- und des Umweltschutzes gesetzliche Auflagen, die die maximal erlaubten Emissionen festlegen. Giftige, gesundheits- und umweltgefährdende Stoffe dürfen nicht oder nur bedingt aus Anlagen ausgestoßen werden.

Zu den Mengen, die dadurch in die Atmosphäre gelangen, sei bemerkt, dass deren Auswirkungen oder Belastungen für die Umwelt in erster Linie von den physikalischen und chemischen Eigenschaften des Stoffes abhängen. Die Menge (oder Konzentration in der Luft) eines Stoffes alleine sagt nichts darüber aus, wie bedeutend oder unbedeutend er für die Umwelt ist.

Als **Immission** wird die Gesamtheit an Schadstoffen bezeichnet, die an einer beliebigen Stelle in der Luft gemessen wird.

Die Immissionen setzen sich aus den Emissionen mehrerer Anlagen zusammen, wobei man die genauen Verursacher häufig nicht kennt.

In diesem Zusammenhang sei noch erwähnt, dass für die einzelnen Schadstoffe nachfolgende Werte gesetzlich festgelegt sind:

- **AGW: Arbeitsplatzgrenzwert** (früher MAK: Maximale Arbeitsplatzkonzentration).
Es ist die maximal zulässige Konzentration an Luftschadstoffen in Atemhöhe am Arbeitsplatz, z.B. in der Anlage oder neben einem Reaktor. Sie bezieht sich auf eine Arbeitszeit von acht Stunden.
- **MIK: Maximal zulässige Immissionskonzentration:**
Maximale Konzentration an Schadstoffen in bodennaher Luft an einem Ort, z.B. in einem Industriegebiet oder einem Wohngebiet. Diese ist für Menschen, Tiere und Pflanzen unbedenklich.

3 Luftschadstoffe

3.1 Kohlenstoffoxide

Es gibt die **Kohlenstoffoxide Kohlenstoffmonoxid CO** und **Kohlenstoffdioxid CO₂**.

3.1.1 Kohlenstoffmonoxid

Kohlenstoffmonoxid CO entsteht bei der unvollständigen Verbrennung kohlenstoffhaltiger Brennstoffe. Darunter fallen sowohl fossile Brennstoffe als auch Biomasse.

Sauerstoffmangel oder schlechte Verbrennungsprozesse führen demnach zur unerwünschten Kohlenstoffmonoxidbildung. Die dabei freigesetzte Wärmemenge ist geringer als bei einer vollständigen Verbrennung (mit Bildung von Kohlenstoffdioxid).

Insbesondere bei Motoren mit innerer Verbrennung (Ottomotor, Dieselmotor) und schlecht eingestellten Heizungsanlagen (im Haushalt) kommt es zur Bildung von Kohlenstoffmonoxid.

Das Kohlenstoffmonoxid reagiert in der Atmosphäre mit dem dort vorhandenen Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid.

3.1.2 Kohlenstoffdioxid

Kohlenstoffdioxid CO₂ ist **kein Luftschadstoff**. Da es jedoch im Zusammenhang mit Umweltproblemen eine bedeutende Rolle spielt, wird er in diesem Kapitel behandelt.

Kohlenstoffdioxid ist ein wichtiger Bestandteil im Kreislauf des Kohlenstoffs, ohne den Leben auf diesem Planeten nicht möglich wäre. Grüne Pflanzen nehmen bei der **Photosynthese** Kohlenstoff auf und produzieren dabei den für viele Lebewesen wichtigen Sauerstoff.

Kohlenstoffdioxid entsteht auf natürliche Art und Weise bei der Atmung der Menschen und Tiere, bei Pflanzen in der Dunkelheit (umgekehrte Photosynthese), bei Vulkanausbrüchen und Waldbränden.

Bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen zu Heizzwecken, zur Gewährleistung der Mobilität, zur Produktion mechanischer Arbeit und zur Stromgewinnung werden weltweit enorm grosse Mengen an Kohlenstoffdioxid freigesetzt.

Die Verbrennung von Biomasse führt natürlich auch zu Kohlenstoffdioxidemissionen. Hier sei auf die Brandrodung der tropischen Regenwälder hingewiesen, durch die ebenfalls grosse Mengen an Kohlenstoffdioxid freigesetzt werden.

3.2 Kohlenwasserstoffe

Kohlenwasserstoffe gehören der großen Familie (über 15 Millionen Stoffe) der Verbindungen der organischen Chemie an.

Die **organische Chemie** ist die Chemie der **Kohlenstoffverbindungen**.

Einziges Ausnahmen an Kohlenstoffverbindungen sind Kohlensäure, Karbonate, Carbide, die Kohlenstoffoxide und Metallkarbonyle. Diese sind der **anorganischen** oder **mineralischen Chemie** zuzuordnen.

Kohlenwasserstoffe sind **Kohlenstoffverbindungen** mit Atomen der Elemente **Wasserstoff H**, **Sauerstoff O** oder **Stickstoff N**.

In manchen Verbindungen kommen die Elemente Schwefel S oder Phosphor P, Halogene oder einige Metalle (Eisen Fe, Magnesium Mg, Kupfer Cu) vor.

Kohlenwasserstoffe haben eine große wirtschaftlich Bedeutung als Energieträger, als Rohstoffe (z.B. zur Kunststoffherstellung) und als Endprodukte.

3.2.1 Methan

Methan CH₄ ist der Hauptbestandteil von Erdgas. Es entsteht größtenteils aus faulenden Pflanzen, die unter Wasser von anaeroben Bakterien zersetzt werden. Dies passiert in **Feuchtgebieten** (Moore, Sümpfe) oder in **Reisfelder** (beim Nassreisanbau).

Daneben werden durch die **Fermentation** in den Mägen von Schafen und Kühen weltweit gesehen große Mengen freigesetzt.

Das **Biogas**, das in gleichnamigen Anlagen oder in Faultürmen von **Kläranlagen** produziert wird, enthält einen hohen Anteil an Methan, das durch Verbrennungsprozesse zur Energiegewinnung genutzt wird.

In Mülldeponien, beim Kohlebergbau (siehe Grubenunfälle) und aus natürlichen Gasvorkommen (z.B. Umweltproblem **Permafrost** in der Tundra) wird Methan in die Atmosphäre freigesetzt.

3.2.2 Unverbrannte Kohlenwasserstoffe

Bei unvollständiger Verbrennung fossiler Brennstoffe können **unverbrannte Kohlenwasserstoffe C_xH_y** entstehen. Dies passiert hauptsächlich in Motoren mit innerer Verbrennung (Otto- und Dieselmotor).

3.2.3 Halogenierte Kohlenwasserstoffe

Halogenierte Kohlenwasserstoffe sind Kohlenwasserstoffverbindungen, bei denen ein oder mehrere Wasserstoffatome durch **Halogenatome** substituiert wurden.

Die **halogenierte Kohlenwasserstoffe** sind häufig **Halogenalkane** (Summenformel **C_nH_{2n+2}**), die aus **Alkanen** hergestellt werden. Daneben gibt es auch **Halogenalkene**, hergestellt aus **Alkenen** (Summenformel **C_nH_{2n}**).

Diese Moleküle bestehen aus Kohlenwasserstoffketten oder -ringen, bei denen mindestens ein Wasserstoffatom durch ein Atom der Elemente **Fluor F**, **Chlor Cl**, **Brom Br** oder **Iod I** **substituiert** wurde.

Halogenierte Kohlenwasserstoffe sind reaktionsträge und **lipophil**, jedoch oft gute Lösungsmittel für organische, nicht wasserlösliche Verbindungen wie Öle und Fette. Daher werden sie in Reinigungsmittel (z.B. chemische Reinigung) oder industriell zum Entfetten von Metallen verwendet.

Viele dieser Stoffe sind giftig. Auch die unmittelbar nicht so giftigen Verbindungen können später zu Gesundheitsschäden führen, da sie sich gut in Fett lösen. Sie können sich daher schnell in Lebensmitteln, im tierischen oder menschlichen Fettgewebe anreichern. Einige Verbindungen sind höchstwahrscheinlich krebserregend.

Da sie sehr reaktionsträge sind, wurden sie lange Zeit als unschädlich für die Umwelt eingestuft.

- **Lösungs- und Reinigungsmittel.**
- **Pestizide** (Pflanzen- und Schädlingsbekämpfung).
- **Feuerlöschmittel.**
- Herstellung von **Kunststoffen** und **Arzneimittel.**

Bekannteste Beispiele sind Trichlormethan CHCl_3 (Chloroform) oder Bromtrifluormethan CBrF_3 .

Da viele der Verbindung nach heutigen Wissensstand doch umweltschädlich sind (siehe nachfolgende Abschnitte), dürfen sie seit Ende der neunziger Jahre nur noch eingeschränkt verwendet werden.

Die Umweltprobleme sind damit noch nicht gelöst, da sie einerseits noch in Apparaten „in Betrieb“ sind und es andererseits bis zu 20 Jahren dauern kann, bis die Moleküle vom Boden in die Atmosphäre aufgestiegen sind.

3.2.4 Fluorchlorkohlenwasserstoffe (*»chlorofluorocarbures d'hydrogène«* oder *»fluorochlorocarbones«*)

Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW, auch CFKW, »CFC« oder »FCC«) gehören der Familie der **halogenierten Kohlenwasserstoffverbindungen** an. Sie enthalten an Halogenen mindestens ein **Fluor-** und mindestens ein **Chloratom**.

Die Fluorchlorkohlenwasserstoffe sind sehr reaktionsträge, nicht brennbar und wenig toxisch. Dadurch haben sie auch eine lange Verweilzeit in der Atmosphäre und gelangen bis in die Stratosphäre.

An physikalischen Eigenschaften sind ihre niedrigen Siedepunkte (z.B. -30°C oder $3,5^\circ\text{C}$) von Bedeutung. Sie lassen sich durch Komprimieren einfach verflüssigen.

Daher werden sie hauptsächlich als **Kältemittel** (Kühlschränke, Klimaanlage, Wärmepumpen) und **Treibgase** (Spraydosen, geschäumte Kunststoffe (Isolationsmaterialien, Schaumstoffe)) verwendet.

Bekanntesten Namen sind „**Frigen**“ bzw. „**Freon**“. Dies ist jedoch nicht jeweils ein Stoff, sondern der rechtlich geschützte Firmenname von jeweils einer Gruppe von Verbindungen der Firmen Hoechst bzw. Dupont.

Bekanntestes Beispiel an Frigen ist Dichlordifluormethan CCl_2F_2 .

Weltweit werden zurzeit (Daten von 2010) ca. 1 Million Tonnen Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) produziert, wobei aufgrund von Verboten und beschränkten Anwendungen seit Jahren ein Rückgang zu beobachten ist.

3.3 Schwefeloxide

An **Schwefeloxiden** gibt es **Schwefeldioxid SO_2** und **Schwefeltrioxid SO_3** .

3.3.1 Schwefeldioxid

Bei der Verbrennung von Schwefel und schwefelhaltigen Brennstoffen entsteht **Schwefeldioxid SO_2** . Alle fossilen Brennstoffe sind schwefelhaltig, davon

insbesondere Kohle. Aus den Erdölprodukten Benzin, Dieselkraftstoff und Heizöl wird in Raffinerien der größte Anteil entfernt. Jedoch selbst im Erdgas sind Spuren von Schwefel vorzufinden.

Schwefeldioxid SO_2 reagiert mit Wasser unter Bildung von **schwefliger Säure H_2SO_3** . Diese wird teilweise zu **Schwefelsäure H_2SO_4** weiter oxidiert.

3.3.2 Schwefeltrioxid

Schwefeltrioxid SO_3 wird hauptsächlich aus Schwefeldioxid SO_2 hergestellt, indem dieser an einem Katalysator oxidiert wird. Bei der Verbrennung fossiler, schwefelhaltiger Brennstoffe entsteht Schwefeltrioxid SO_3 , wenn das Abgas enthaltende Schwefeldioxid SO_2 mit katalytisch wirkenden Oberflächen in Kontakt kommen.

Schwefeltrioxid SO_3 ist gut löslich in Wasser und bildet mit diesem **Schwefelsäure H_2SO_4** .

3.4 Stickstoffoxide

Bei den **Stickstoffoxiden NO_x** unterscheidet man zwischen **Stickstoffmonoxid NO** , **Stickstoffdioxid NO_2** und **Distickstoffmonoxid N_2O** .

3.4.1 Stickstoffmonoxid

Stickstoffmonoxid NO und **Stickstoffdioxid NO_2** entstehen hauptsächlich bei Verbrennungs-Prozessen, bei denen hohe Temperaturen (um 1000°C) vorliegen. Dann reagieren der Stickstoff aus der Luft mit dem ebenfalls darin vorhandenen Sauerstoff zu Stickstoffmonoxid NO und Stickstoffdioxid NO_2 .

Dies passiert hauptsächlich in Kraftfahrzeugen und Wärmekraftwerken, teilweise auch bei industriellen Prozessen (z.B. beim Schweißen).

Beim Ausstoß aus dem Kamin oder Auspuff ist der Anteil des Stickstoffmonoxids NO zunächst größer (ca. 90%), dieses wird jedoch später in Stickstoffdioxid NO_2 aufoxidiert. Die Stickstoffoxide in der Atmosphäre bestehen zu etwa gleichen Anteilen aus Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid.

3.4.2 Stickstoffdioxid

Stickstoffdioxid NO_2 ist schwer löslich in Wasser. Es bildet bei der Reaktion mit Wasser und alkalischen Lösungen **Nitrite NO_2^-** und **Nitrate NO_3^-** , die Salze der **salpetrigen Säure HNO_2** bzw. der **Salpetersäure HNO_3** .

3.4.3 Distickstoffmonoxide

Distickstoffmonoxid N_2O ist besser bekannt unter dem Namen **Lachgas**.

Es entsteht auf natürliche Weise durch bakteriellen Abbau in Böden und in Meeren.

Es entsteht verstärkt bei starkem Düngen (in der Landwirtschaft), wenn im Boden nicht genügend Sauerstoff vorhanden ist. Des Weiteren wird es in der chemischen Industrie bei einigen Prozessen freigesetzt.

Es wird für unterschiedliche Zwecke hergestellt: als Treibgas in Sprühdosen findet es sogar im Lebensmittelbereich (Schlagsahne) Anwendung. In der Medizin wird es bei

kleinen operativen Eingriffen als Narkosemittel verwendet. Im Kraftfahrzeugbereich kann es zur kurzzeitigen Leistungssteigerung (Tuning) dienen, beim Antrieb von Raketen liefert es ebenfalls den zur Verbrennung erforderlichen Sauerstoff.

4 Saurer Regen («*pluies acides*»)

4.1 Verursacher

Der **saure Regen** ist eine direkte Folge der Selbstreinigungskraft der Atmosphäre vor allem für **Stickstoffoxiden NO_x** und **Schwefeldioxid SO₂**.

Mit der industriellen Tätigkeit des Menschen hat dieser Vorgang immer größere Ausmaße angenommen. Während unbelastetes Regenwasser durch das Kohlenstoffdioxid bedingt einen pH-Wert von 5,6 hat, beträgt in der Bundesrepublik Deutschland inzwischen der mittlere pH-Wert etwa 4. In Skandinavien ist im Regenwasser und Schnee bereits gelegentlich ein pH-Wert von 2,3 und im Nebel von Los Angeles sogar von 2 gemessen worden.

Der saure Regen ist nicht nur auf ein bloßes Auswaschen der Stickstoffoxide und des Schwefeldioxids zurückzuführen. In der Troposphäre, der Luftschicht bis zu einer Höhe von zehn bis fünfzehn Kilometern, entstehen unter dem Einfluß des UV-Anteils des Sonnenlichtes aus **Ozon O₃** und **Wasser H₂O** sehr reaktive **Hydroxylradikale** (OH-Radikale). Diese leiten die Bildung von **salpetriger Säure HNO₂** und **Salpetersäure HNO₃** aus Stickstoffdioxid und von **schwefeliger Säure H₂SO₃** und **Schwefelsäure H₂SO₄** aus Schwefeldioxid ein.

Die gebildeten Säuren gelangen durch Trockendeposition als trockene Stäube oder aber mit Tau, Nebel, Regen oder Schnee (Naßdeposition) als „saurer Regen“ zur Erde. Die Folgeprodukte der Stickstoffoxide tragen zu einem Drittel am sauren Regen bei, die restlichen zwei Drittel sind Folgen des Schwefeldioxids.

4.2 Auswirkungen

Es gibt zahlreiche, unübersehbare Schäden in unserer Umwelt:

- Übersäuerung von Gewässern, die teilweise zu fischleeren Seen führen.
- Übersäuerung von Böden (Abb.3), die zum Waldsterben beitragen: die in die Erde eindringende Säure löst Aluminiumverbindungen in der Erde, die nicht wasserlöslich sind. Die neu entstandenen, wasserlöslichen Aluminiumverbindungen schädigen die Wurzeln der Bäume und stören die Wasser- und Nährsalzaufnahme.
- Waldsterben bedingt durch die direkte Einwirkung des sauren Regens auf die Nadeln und Blätter der Bäume.

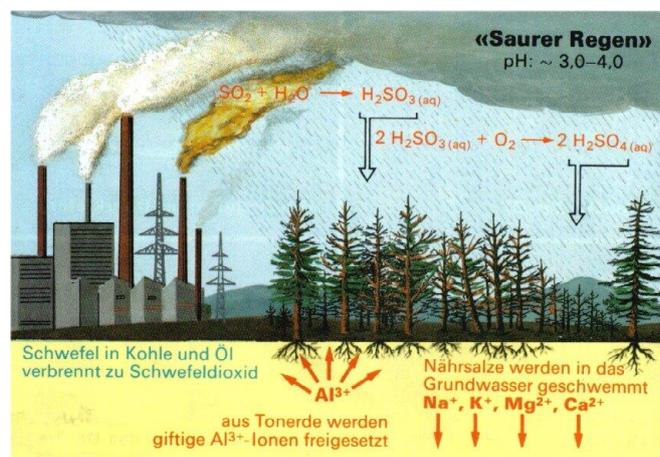


Abb.3: Saurer Regen und Waldsterben
(Quelle: Chemie Buch /Schuphan
Knappe)

- Verwitterung von Gebäuden, Kunstdenkmälern (Abb.4), Hausfassaden und Betonbrücken. **Kalkstein (CaCO_3)** reagiert mit Schwefelsäure zu wasserlöslichem **Calciumsulfat (CaSO_4)**. Dieser wird dann durch Regen ausgewaschen.



Abb.4: Schäden an Kunstwerken (Quelle: *elemente chemie II/ Amann u.a.*)

Ein erhebliches Gewicht wird diesen Schadstoffen aus der Luft auch im Zusammenhang mit der Eutrophierung der Nordsee beigemessen.

5 Smog («smog«)

Smog ist eine Wortschöpfung aus dem Englischen „smoke“ (Rauch) und „fog“ (Nebel). Es ist eine **Luftverschmutzung** mit gasförmigen, flüssigen oder festen Bestandteilen, die meistens über einer dicht besiedelten Gegend oder Stadt auftritt.

Eine starke Luftverschmutzung kann an **windarmen** Tagen zu **Smog** führen.

Eine **ungünstige Topographie** (ein Tal mit beidseitig hohen Bergketten oder eine Kessellage (wie z.B. in Los Angeles oder Santiago de Chile) mit ringförmigem Gebirgsgürtel) begünstigt die Bildung von Smog. Es entsteht eine Dunstglocke an Schadstoffen über dem Gebiet. Hierbei handelt es sich meistens um **Sommersmog**.

Auch eine so genannte **Inversionswetterlage** kann zu Smog führen. Dann befindet sich eine warme Luftschicht über einer kälteren. Die kalte Luft kann nicht mehr nach oben entweichen. Dies passiert eher in der kalten Jahreszeit und wird als **Wintersmog** (z.B. in London) bezeichnet.

5.1 Verursacher

Zu hohe Emissionen aus Kohlekraftwerken, Verbrennungsmotoren, Industrie und Heizungen können zur Bildung von Smog beitragen.

Schwefeldioxid SO_2 , **Stickoxide NO_x** , **Kohlenstoffmonoxid CO** , **Russpartikel**, **Stäube**, **Lösungsmittel** sind emittierte Schadstoffe, die teilweise mit der Luftfeuchtigkeit oder Nebel oder unter dem Einfluss des ultravioletten Lichtes zu weiteren Schadstoffen (z.B. **saurem Regen** oder **Ozon O_3**) reagieren.

5.2 Auswirkungen

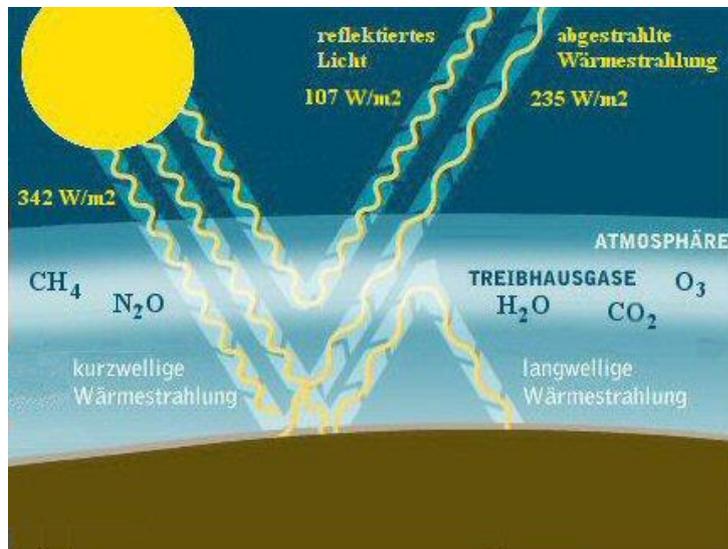
Die Menschen leiden teilweise unter Kopfschmerzen und Reizung der Augen.

Die Schleimhäute werden gereizt, es können Atmungsschwierigkeiten auftreten und es können chronische Erkrankungen der Atemwege erfolgen.

Es kann von Kreislaufbeschwerden bis hin zu Herzbeschwerden kommen.

6 Treibhauseffekt («*effet de serre*»)(„*green house*“)

Die Sonnenstrahlen fallen auf die Erde und erwärmen sie. Es sind kurzwellige elektromagnetische Strahlen, die die Atmosphäre zu einem grossen Teil durchdringen konnten (Abb.5).



Die von der Erde abgestrahlten, energieärmeren Strahlen sind unsichtbar, sie haben eine grössere Wellenlänge (im UV-Bereich) als zuvor. Sie können die Atmosphäre nicht ungehindert durchdringen, sondern werden kurzzeitig von den Molekülen der so genannten Spurengase absorbiert.

Diese geben dann eine Strahlung in alle Richtungen ab, ein Teil davon trifft auf die Erde und erwärmt diese zusätzlich.

Abb.5: Treibhauseffekt (Quelle: greenpeace.at; überarbeitet)

6.1 Natürliche Verursacher

Der natürliche Treibhauseffekt ermöglicht erst ein Leben auf dieser Welt in der Form, wie wir es kennen. Die durchschnittliche Temperatur auf der Welt beträgt 15°C, ohne den natürlichen Treibhauseffekt würde sie bei -18°C liegen.

Die am Treibhauseffekt beteiligten Spurengase sind hauptsächlich Wasserdampf H₂O, Kohlenstoffdioxid CO₂, Ozon O₃, Distickstoffoxid N₂O und Methan CH₄. In Abb.6 ist der Beitrag der einzelnen Spurengase festgehalten.

Spurengas		Temperaturerhöhung in °C
Wasserdampf	H ₂ O	20,6
Kohlenstoffdioxid	CO ₂	7,2
Ozon	O ₃	2,4
Distickstoffoxid	N ₂ O	1,4
Methan	CH ₄	0,8
Sonstige		0,8

Abb.6: Einfluss der Spurengase am Treibhauseffekt (Quelle: Schönwiese, Runge/Uni Frankfurt)

Ozon O₃ entsteht in der Atmosphäre aus Sauerstoff O₂-Molekülen, die durch die UV-Strahlung aufgespalten werden.

6.2 Anthropogene Verursacher

Die Handlungen des Menschen führen zu verstärkten und zusätzlichen Emissionen von Spurengasen. Es entsteht der so genannte **anthropogene** (d.h. von Menschenhand verursachte) Treibhauseffekt, der die Erde zusätzlich aufwärmt.

Das Expertengremium IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) der Vereinten Nationen geht davon aus, dass die Temperaturerhöhungen auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen ist. In Abb.7 ist ein Temperaturverlauf dargestellt.

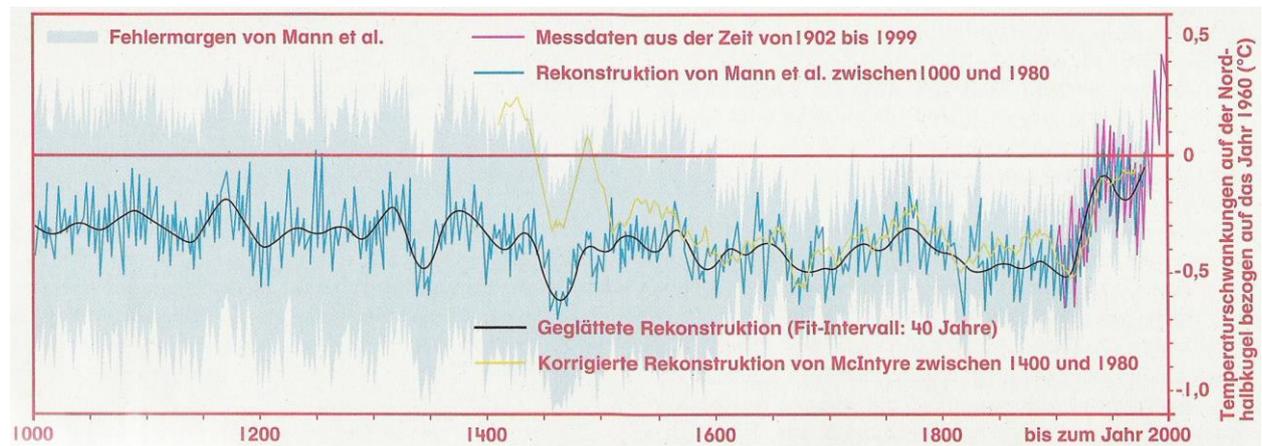


Abb.7: Hockeyschlägerkurve (Quelle: IPCC-Klimabericht 2001/Technology Review)

Die wichtigsten Spurengase sind Kohlenstoffdioxid CO_2 , Fluorchlorkohlenwasserstoffe FCKW, Methan CH_4 und Distickstoffoxid N_2O . In Abb.8 sind die Emittenten mit ihren Emissionen dargestellt. (Im Kapitel 3 sind die Emittenten zu finden).

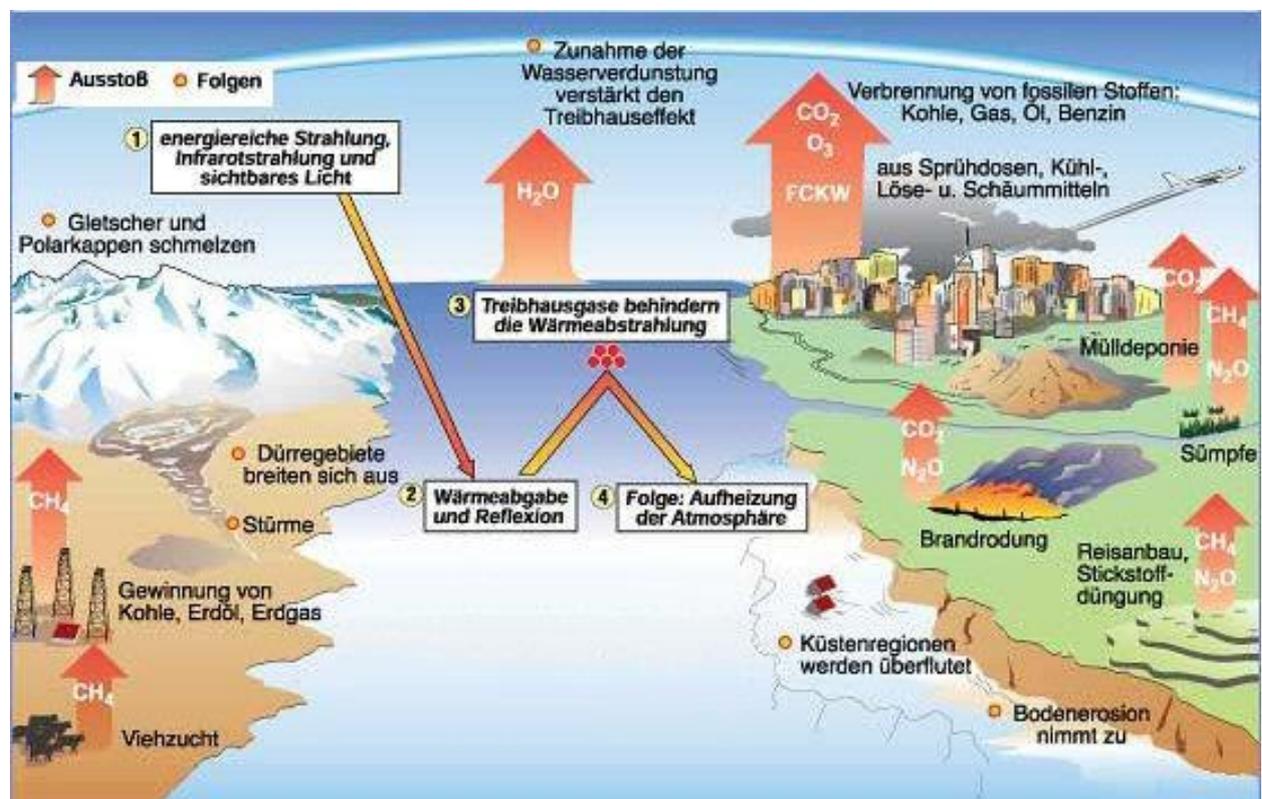


Abb.8: Ursachen und Folgen des anthropogenen Treibhauseffektes (Quelle: EEA, dpa; überarbeitet)

Die verschiedenen Spurengase haben unterschiedliche starke Treibhauswirkungen. In Abb.9 ist ihre Klimawirksamkeit im Vergleich zu Kohlenstoffdioxid dargestellt. Die wichtigsten Fluorchlorkohlenwasserstoffe haben z.B. eine 10 000fach größere Treibhauswirkung. Zusätzlich sind die Verweildauern der Gase in der Atmosphäre in der Abbildung angegeben.

Treibhausgas		Klimawirksamkeit	Verweildauer in der Atmosphäre
Kohlenstoffdioxid	CO ₂	1	variabel
Methan	CH ₄	21	9 – 15 Jahre
Distickstoffoxid	N ₂ O	310	120 Jahre
Fluorkohlenwasserstoffe	FKW	140 – 11 700	1,5 – 264 Jahre

Abb.9: Klimawirksamkeit und Verweildauer einiger Treibhausgase Anteile einzelner Verursacher (Quelle: unfccc.int/ghg_emissions_data)

Aus der Menge der Treibhausgase in der Atmosphäre einerseits und ihrer Treibhauswirkungen andererseits ergeben sich die **Anteile der einzelnen Gase am Treibhauseffekt**. Diese sind in Abb.10 mit Bezug zu den **Emittenten** dargestellt.

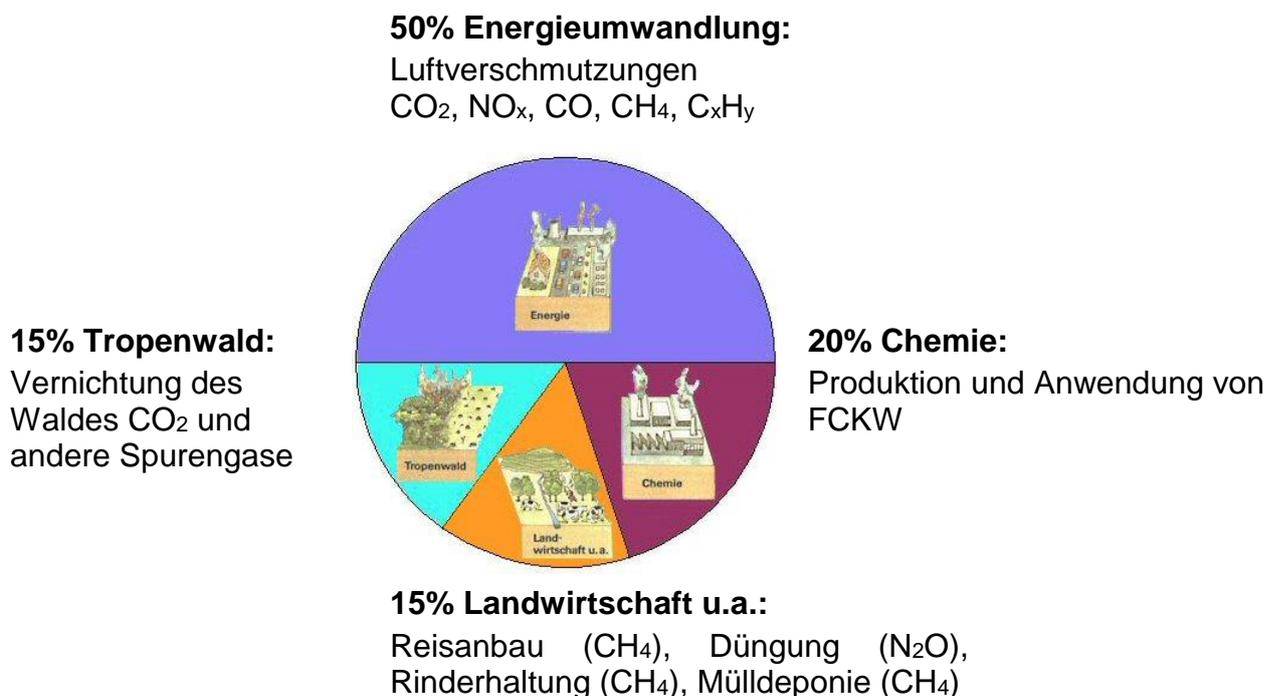


Abb.10: Anteile einzelner Verursacher am anthropogenen Treibhauseffekt

Bei den Emissionen der Energieumwandlung sind die Stickoxide NO_x, Kohlenstoffmonoxid CO und unverbrannte Kohlenwasserstoffe C_xH_y zu finden. Diese bezeichnet man als **indirekte Treibhausgase**, da sie indirekt zum Treibhauseffekt beitragen. Indem sie die Ozonschicht zerstören (siehe nächsten Abschnitt), dringen mehr UV-Strahlen auf die Erde und erwärmen diese.

Zum Tropenwald sei bemerkt, dass durch die Brandrodung nicht nur riesige Mengen an Kohlenstoffdioxid freigesetzt werden. Zudem geht eine grosse **Senke** für Kohlenstoffdioxid verloren, da Wälder diesen vorher durch Photosynthese aufgenommen haben.

6.3 Auswirkungen

Durch den zusätzlichen, antropogenen Treibhauseffekt wird es in einem Jahrhundert zu einem zusätzlichen Temperaturanstieg kommen, der im Mittel zwischen 2°C und 5°C betragen wird.

Hierbei handelt sich um einen **durchschnittlichen, globalen Temperaturanstieg**, was bedeutet, dass regional größere Änderungen anfallen können. Man spricht hierbei von einem **Klimawandel**. Betrachtet man im Vergleich die Übergänge von Eiszeiten auf Warmzeiten, so stellt man fest dass hierbei globale Temperaturänderungen von 4 bis 5°C vorlagen. Allerdings dauerten diese Veränderungen einige Jahrtausende!

Zu den Folgen dieses Klimawandels gibt es etliche Berechnungen, Modellvorstellungen und Interpretationen der viele Beobachtungen (Gletscherschmelzen, Klimaveränderungen, Stürme, Überschwemmungen), die seit Jahren gemacht werden.

Grundsätzlich wird jedenfalls das Gleichgewicht zwischen Klima, Meeren und Vegetation verschoben werden.

Einige mögliche Folgen sind hier aufgeführt. In welchem drastischen Maße und in wie kurzen Zeiträumen diese eintreten werden, kann man nicht genau im Voraus sagen.

- Weltweites Schmelzen von Gletschern.
- Das Schmelzen der Polkappen (Festlandeis) führt zu einer weltweiten Erhöhung der Meeresspiegel.
- Die Temperaturerhöhung der Weltmeere führt ebenfalls zu einer Erhöhung der Wasserspiegel (aufgrund der höheren Dichte).
- Höhere Meeresspiegel führen zur Überschwemmung von Inselgruppen und Küstengegenden, wodurch der Lebensraum von Menschen und Tieren verschwindet. Es kommt zu so genannten Klimaflüchtlingen.
- Weniger Niederschlag in den mittleren Breitengraden (teilweise Trinkwassermangel).
- Zunahme von Wirbelstürmen, Sturmfluten, Überschwemmungen.
- Klimazonen verschieben sich schneller als die Vegetation sich anpassen kann: Wälder versteppen, Wüsten dehnen sich aus. Dadurch gibt es Klimaflüchtlinge.
- Meeresströmungen verändern sich, woraus Klimaänderungen entstehen können (bspw. kälteres Westeuropa durch Verschwinden des Golfstromes).
- Die weltweite Erwärmung der Meere bewirkt eine geringere Löslichkeit für Gase, u.a. Kohlenstoffdioxid. Bei höheren Temperaturen wird zuvor gelöstes Gas (man sagt die Weltmeere sind eine Kohlenstoffdioxidsenke) wieder frei gesetzt werden.
- Weniger Permafrost (Nordkanada, Sibirien) durch wärmere Nordpolarkappen, dadurch Freisetzen von Methan und stärkere Erwärmung der Erde. (Höhere Absorption des Lichtes an dunkler Erde als an weißen Eisflächen, siehe **Albedo** (Maß, Quotient aus reflektiertem zu einfallendem Licht).).

Die letzten beiden Punkte zeigen, dass der Treibhauseffekt durch seine Auswirkungen noch weiterhin verstärkt werden wird.

7 Ozonloch (»trou d'ozone«)

Die Stratosphäre enthält in ihrem obersten Bereich **Ozon O₃**, das die von der Sonne einfallende ultraviolette Strahlung (in einem Wellenbereich λ von 210 bis 310 nm) **absorbiert**.

Messungen, die man zwischen 1950 und 1980 durchgeführt hat, ergaben einen konstanten Anteil an Ozon in der Stratosphäre. Zwischen 1980 und 1990 stellte man fest, dass die Konzentration über der Arktis um 15% und über der Antarktis sogar um 30 % geringer geworden war.

Als **Ozonloch** bezeichnet man die Bereiche der Stratosphäre, die einen geringeren Gehalt an Ozon aufweisen.

Man spricht auch von einer **dünnere Ozonschicht**.

Das Ozonloch der Arktis tritt von Januar bis März auf (Ende des Winters auf der nördlichen Halbkugel). Über der Antarktis wird es hauptsächlich von September bis November größer, wenn auf der südlichen Halbkugel der Frühling beginnt. Hier fällt die Konzentration heutzutage auf 50 bis 0%.

7.1 Verursacher

○ Fluorchlorkohlenwasserstoffe

Die **Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW)** galten lange Zeit als die Hauptverursacher des Ozonloches.

Durch den Einfluß der UV-B-Strahlung in der Stratosphäre werden die Fluorchlorkohlenwasserstoffe abgebaut. Dabei entstehen Halogenatome (Fluor F oder Chlor Cl) in Form von reaktionsfreudigen Radialen. Diese reagieren mit den Ozon O₃-Molekülen, wie am Beispiel von Chlor in Gl.1 dargestellt:



Dabei entsteht ein Sauerstoff O₂-Molekül und ein neues Radikal, das wiederum mit einem Ozon-Molekül entsprechend Gl.2 reagieren kann:



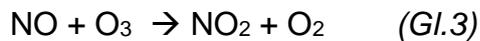
Es entstehen zwei weitere Sauerstoff O₂-Moleküle und das reaktionsfreudige Chlor-Radikal Cl• wird wieder frei. Es kann somit weitere Ozon O₃-Moleküle spalten.

Die Halogenradikale wirken demzufolge als **Katalysator** bei den Spaltreaktionen von Ozon O₃. Ein Halogenradikal kann bis zu 100 000 Ozon-Moleküle spalten.

○ Distickstoffmonoxid

Seit einigen Jahren ist **Distickstoffmonoxid N₂O** der ozonschädlichste Stoff. Dies liegt zum einen daran, dass weniger gefährliche Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) verwendet werden, zum anderen mehr Distickstoffmonoxid N₂O (durch weltweit zunehmende Düngung in der Agrarwirtschaft) freigesetzt wird.

Durch die Wirkung der UV-Strahlung entstehen aus Distickstoffmonoxid N_2O die Stoffe **Stickstoffmonoxid NO** und **Stickstoffdioxid NO_2** . Die Stickstoffmonoxide NO werden vom **Ozon O_3** wiederum zu Stickstoffdioxid NO_2 aufoxidiert (Gl.3), so dass die Menge an Ozon abnimmt.



○ Weitere Gase

Neben diesen Gasen gibt es noch weitere, die die Ozonschicht zerstören. Insbesondere sei auf halogenierte Kohlenwasserstoffe, die beim Abbau Brom-Radikale $\text{Br}\bullet$ freisetzen, sowie Stickoxide NO_x , Kohlenstoffmonoxid CO und unverbrannte Kohlenwasserstoffe C_xH_y hingewiesen.

Die Ozonschicht-zerstörenden Gase sind im Montreal-Protokoll festgehalten.

7.2 Auswirkungen

Bereits eine geringfügig dünnere Ozonschicht führt zu einer erheblich stärkeren UV-Strahlung auf der Erde.

Diese greifen die menschliche Haut an:

- UV-A-Strahlung ($\lambda = 380 - 315 \text{ nm}$) führt zu einer Pigmentierung der Haut
- UV-B-Strahlung ($\lambda = 315 - 280 \text{ nm}$) kann zu schweren Verbrennungen („Sonnenbrand“) führen. Die Augenlinsen können getrübt werden

Die Strahlung dringt am tiefsten in die Haut ein und wird am meisten von der DNA absorbiert, so dass die menschlichen Zellen zerstört werden. Die Folge ist Hautkrebs.

- UV-C-Strahlung (auf der Erde: $\lambda = 280 - 200 \text{ nm}$) kann zu einer Rötung (Entzündung) der Haut führen, ruft jedoch keine länger anhaltenden Schäden hervor.

Zusätzlich kann das Immunsystem des Menschen als Folge von zu hoher Strahlungsbelastung geschwächt werden.

In der Pflanzenwelt kommt es insbesondere durch UV-C-Strahlung zu Schäden. Die Blätter werden beschädigt oder sterben ganz ab, so dass die Pflanzen ebenfalls absterben.

Durch die beiden anderen Strahlungen werden die verschiedenen Pflanzen unterschiedlich stark geschädigt, der Ertrag von Nahrungsmittelpflanzen kann darunter leiden.

Insbesondere in Brasilien und Australien sind seit Jahren die Folgen des Ozonloches zu sehen und zu messen.