

# HANSER



Leseprobe

Taschenbuch der Umwelttechnik

Herausgegeben von Karl Schwister

ISBN: 978-3-446-41999-5

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser.de/978-3-446-41999-5>

sowie im Buchhandel.

## 8 Luftverschmutzung

### 8.1 Einteilung und Zusammensetzung der Atmosphäre

Der Luftbereich zwischen Erde und Weltall wird als Atmosphäre bezeichnet. Sie ist, bezogen auf die Masse, mit  $5,3 \cdot 10^{15}$  Tonnen die kleinste der drei zu betrachtenden Bereiche: **Atmosphäre**, **Hydrosphäre** und **Lithosphäre**. Die ca. 500 km dicke gasförmige Atmosphäre absorbiert weitgehend die UV-Strahlung aus dem Weltall und ermöglicht so das Leben auf der Erde. Die Zusammensetzung der Atmosphäre bestimmt die physikalisch-chemischen Eigenschaften des Regens und beeinflusst somit die Verwitterung von Gesteinen. Neben dem Wasser stellt die Atmosphäre das Transportmittel für Stoffe und Energie dar.

Bis zu einer Höhe von 100 km ist die Zusammensetzung der Luft einheitlich; dieser Bereich wird daher auch **Homosphäre** genannt. Erst in den höheren Schichten (**Heterosphäre**) reichern sich leichte Gase an, von denen die leichtesten (Wasserstoff und Helium) das Gravitationsfeld der Erde verlassen können. Der  $H_2$ -Verlust beträgt beispielsweise 25 000 Tonnen pro Jahr.

Die erdnächste Luftschicht wird **Troposphäre** genannt und enthält neben den Hauptbestandteilen Stickstoff und Sauerstoff auch Kohlenstoffdioxid, Argon sowie weitere Edelgase (vgl. Tabelle 8-1). Die Troposphäre reicht von der Erdoberfläche bis zu einer Höhe von ca. 15 km. Hier finden die Lebensprozesse und das Wettergeschehen (Wolken, Niederschlag, Schnee, Wind usw.) statt. Die Durchmischungszeit der Luft beträgt auf einer Erdhalbkugel 1...2 Monate, während eine gleichmäßige Durchmischung über den Äquator hinweg eine Zeit von 1...2 Jahren benötigt. In der Troposphäre sinkt die Temperatur mit zunehmender Höhe um ca.  $6\text{ °C}$  pro 1 000 m.

Die darüber liegende Schicht reicht bis zu einer Höhe von 50 km und wird **Stratosphäre** genannt. In etwa 50 km Höhe (Stratopause) herrscht eine Lufttemperatur von ca.  $0\text{ °C}$ , deren Entstehung der UV-Absorption an dem hier vorkommenden Ozon ( $O_3$ ) zu verdanken ist. Über der Ozonschicht nimmt die Temperatur wieder ab.

Bis 80 km erstreckt sich die **Mesosphäre**, in der die Temperatur mit zunehmender Höhe bis auf  $-130\text{ °C}$  absinkt. In der daran anschließenden **Thermosphäre** steigt die Temperatur in 150...400 km Höhe auf über

1000 °C an; sie bildet den Übergang zum interplanetarischen Raum (**Exosphäre**).

Tabelle 8-1: Zusammensetzung der troposphärischen Luft [8.1]

| Bestandteil (Formel)                       | Anteil in Vol.-%                | Quelle  |
|--|---------------------------------|---------|
| Stickstoff (N <sub>2</sub> )               | 78,1                            | B, V    |
| Sauerstoff (O <sub>2</sub> )               | 20,9                            | B       |
| Argon (Ar)                                 | 0,93                            | R       |
| Kohlenstoffdioxid (CO <sub>2</sub> )       | $354 \cdot 10^{-6}$             | B, A, V |
| Neon (Ne)                                  | $18,2 \cdot 10^{-6}$            | V       |
| Helium (He)                                | $5,2 \cdot 10^{-6}$             | R       |
| Krypton (Kr)                               | $1,1 \cdot 10^{-6}$             | R       |
| Xenon (Xe)                                 | $0,09 \cdot 10^{-6}$            | R       |
| Methan (CH <sub>4</sub> )                  | $1,72 \cdot 10^{-6}$            | B, A    |
| Wasserstoff (H <sub>2</sub> )              | $0,5 \cdot 10^{-6}$             | B, A, P |
| Distickstoffoxid (NO)                      | $310 \cdot 10^{-9}$             | B, A, P |
| Ozon (O <sub>3</sub> )                     | $(10 \dots 100) \cdot 10^{-9}$  | P       |
| Schwefeldioxid (SO <sub>2</sub> )          | $0,2 \cdot 10^{-9}$             | A, P, V |
| Stickstoffdioxid (NO <sub>2</sub> )        | $(10 \dots 100) \cdot 10^{-12}$ | B, P    |
| Stickstoffoxid (NO)                        | $(5 \dots 100) \cdot 10^{-12}$  | B, A, P |
| Ammoniak (NH <sub>3</sub> )                | $(0,1 \dots 1) \cdot 10^{-12}$  | B, A    |
| Kohlenstoffmonoxid (CO)                    | $(40 \dots 150) \cdot 10^{-12}$ | B, A, P |
| Formaldehyd (CH <sub>2</sub> O)            | $(0,1 \dots 1) \cdot 10^{-12}$  | A, P    |
| FCKW 11 (CFCl <sub>3</sub> )               | $280 \cdot 10^{-12}$            | A       |
| FCKW 12 (CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> ) | $480 \cdot 10^{-12}$            | A       |

A = anthropogene Emission, B = Biosphäre, P = Photochemie, R = radioaktiver Zerfall, V = Vulkanismus

## 8.2 Grundbegriffe

### 8.2.1 Luftdruck

Die Atmosphäre lastet mit einem Gewicht von  $1 \text{ kg/cm}^2$  auf der Erdoberfläche, da sie wie jeder andere Körper durch die Schwerkraft der Erde angezogen wird. Der sich so ergebende Luftdruck beträgt auf Meereshöhe  $1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  (früher = 1 atm). Mit einem Manometer (z. B. Federrohr-, Plattenfeder- oder Flüssigkeitsmanometer) lässt sich der Luftdruck messen und in Pascal ( $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ ) angeben. Die Dichte der Atmosphäre und damit der Luftdruck nimmt mit zunehmender Höhe ab. Im erdnahen Bereich sinkt er pro 10 m Höhenanstieg um ca. 133 Pa (= barometrische Höhenstufe). Der Luftdruck ändert sich in Abhängigkeit von der Zeit und vom Ort durch unterschiedliche Erwärmung der Atmosphäre.

## 8.2.2 Luftfeuchtigkeit

Unter der Luftfeuchtigkeit versteht man den Gehalt der Atmosphäre an gasförmigem Wasserdampf, wobei z. B. Nebel kein Wasserdampf, sondern in feinen Tröpfchen verteiltes flüssiges Wasser ist. Die in einem Kubikmeter Luft tatsächlich enthaltene Wasserdampfmenge heißt **absolute Feuchte** ( $f_{\text{abs}}$ ).

$$f_{\text{abs}} = \frac{m_W}{V} \quad (8-1)$$

$m_W$  Wasserdampfmenge,  $V$  Volumen

Die bei einer bestimmten Temperatur maximal mögliche Wasserdampfmenge wird **maximale Feuchte (Sättigungsfeuchte)** genannt.

$$f_{\text{abs, max}} = \frac{m_{W, \text{max}}}{V} \quad (8-2)$$

$f_{\text{abs, max}}$  maximale Feuchte,  $m_{W, \text{max}}$  maximale Wasserdampfmenge,  $V$  Volumen

In Tabelle 8-2 ist die Sättigungsfeuchte in Abhängigkeit von der Temperatur beispielhaft gezeigt.

Tabelle 8-2: Sättigungsfeuchte in Abhängigkeit von der Temperatur

| Temperatur in °C                      | -20 | -10 | 0   | +10 | +20  | +30  |
|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|
| Sättigungsfeuchte in g/m <sup>3</sup> | 1,0 | 2,1 | 4,7 | 9,4 | 17,3 | 30,4 |

Eine übliche Angabe zur Luftfeuchtigkeit ist die **relative Feuchte** ( $f_{\text{rel}}$ ). Sie ist der Quotient aus absoluter Feuchte und bei der gleichen Temperatur maximal möglichen Feuchte.

$$f_{\text{rel}} = \frac{f_{\text{abs}}}{f_{\text{abs, max}}} \quad (8-3)$$

$f_{\text{abs}}$  absolute Feuchte,  $f_{\text{abs, max}}$  maximale Feuchte

Nach Tabelle 8-2 kann bei 20 °C die Luft maximal 17,3 g Wasserdampf pro 1 m<sup>3</sup> aufnehmen. Dieser Zustand entspricht 100 % relativer Feuchte und wird **Taupunkt** genannt. Sinkt die Temperatur z. B. von 20 °C auf 10 °C ab, so kondensiert der überschüssige Wasserdampf (17,3 g – 9,4 g = 7,9 g) zu kleinen Wassertröpfchen, die sich z. B. an Gebäuden oder Pflanzen als **Tau** niederschlagen. Verbleibt das Wasser in Form kleiner Tröpfchen in der Luft, so bezeichnet man das System als **Nebel**.

### 8.2.3 Luftkeime

Unter dem Sammelbegriff **Luftkeime** verbergen sich Bakterien, Pilzsporen und Viren. Sie haften in der Regel an Staubpartikeln und den sich in der Luft befindenden feinsten Wassertröpfchen. Der Keimgehalt in der Außenluft liegt je nach Jahreszeit und Standort zwischen 100 und 500 Keimen/m<sup>3</sup> (Bakterien und Pilze), das sind um das bis zu 5fache weniger als in geschlossenen Räumen. Eine Vermehrung der Luftkeime kann wegen Trockenheit, UV-Strahlung (Sonne) und Kälte weitgehend ausgeschlossen werden. Eine Überlebenschance über einen längeren Zeitraum haben jedoch eine Vielzahl von Pilzsporen.

### 8.2.4 Emission, Transmission und Immission

Die Quelle einer Luftverunreinigung (Emissionsquelle) entspricht der Austrittsstelle von Abgasen oder schadstoffhaltiger Abluft in die freie Atmosphäre. Der Vorgang selbst wird **Emission** genannt (lat. *emittere*: ausschicken).

Als Quellen von **Luftverunreinigungen anthropogener Art** werden nur solche **künstlicher Art** (z. B. Fabrik- und Hausschornsteine, Auspuffrohre von Kraftfahrzeugen), nicht jedoch solche **natürlicher Art** wie Sandstürme oder Vulkanausbrüche angesehen. Eine weitere Unterscheidungsmöglichkeit erfolgt hinsichtlich der Gestaltung von Emissionsquellen:

- Punktquellen (z. B. Schornsteine),
- Linienquellen (z. B. Kraftfahrzeugkolonnen),
- Flächenquellen (z. B. Summe aller Schornsteine eines Stadtteils).

**Primäre Schadstoffe** (SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, CO, Halogene) werden aus identifizierbaren Quellen freigesetzt, während **sekundäre Schadstoffe** (Ozon, Aldehyde) erst in der Atmosphäre aus den primären luftverunreinigenden Stoffen entstehen,

Meteorologische Merkmale wie Windrichtung/-geschwindigkeit oder Luftturbulenzen sorgen für eine Ausbreitung (**Transmission**) der Schadstoffe (lat. *transmittere*: hinübersenden), wodurch eine Verdünnung der Luftverunreinigung erfolgt. Die Verdünnung der Schadstoffe fällt umso größer aus, je höher die Emissionsquelle liegt (Hochschornsteinpolitik). Partikel mit einer sehr großen Oberfläche (z. B. Ruß) tragen durch Adsorption von Schadstoffen zum Transport in der Atmosphäre bei.

Luftschadstoffe wirken nach ihrer Ausbreitung und Verdünnung auf Menschen, Tiere, Pflanzen, Boden und Materialien (**Immission**, lat.

*immittere*: einwirken). Sie können dabei zu erheblichen Schäden führen (vgl. Tabelle 8-3).

Tabelle 8-3: Luftschadstoffe einiger Emissionsquellen [8.2]

| Emittent                           | Luftverunreinigung   |
|------------------------------------|--|
| Kohle-Kraftwerke                   | SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, H <sub>2</sub> S, HF, Flugasche (basisch, F- und As-haltig)                            |
| Öl-Heizungen                       | SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> , Ruß  |
| Synthese-Chemie                    | SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , SO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S, CO, Kohlenwasserstoffe, Phenole, Amine, Ruß, Flugasche |
| Zementwerke                        | SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, Zementstaub (basisch, F-haltig)  |
| Glaserzeugung und Glasverarbeitung | SO <sub>2</sub> , HF, SiF <sub>4</sub> , Stäube (F- und Pb-haltig), Flugasche  |
| Zellstoffwerke                     | SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , Mercaptane  |
| Tier-Intensivhaltung               | NH <sub>3</sub> , Amine  |
| Kraftfahrzeuge                     | NO <sub>x</sub> , CO, Kohlenwasserstoffe   |

### 8.3 Beschreibung der Luftschadstoffe

#### 8.3.1 Kohlenstoffdioxid

Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) ist ein geruchloses und nicht brennbares Gas. Es entsteht bei allen Atmungs- und Verbrennungsvorgängen fossiler Energieträger. Natürliche Vorgänge, wie die Assimilation von CO<sub>2</sub> durch Pflanzen (z. B. Waldatmung) und der Gasaustausch in den Weltmeeren, spielen eine wichtige Rolle. Es ist anzunehmen, dass die CO<sub>2</sub>-Aufnahmekapazität der Ozeane bald erschöpft sein wird. Ein weiterer Anstieg der anthropogen verursachten Kohlenstoffdioxid-Emission würde dann zu einer Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre führen. Dies hätte im Rahmen des Treibhauseffektes auch klimatische Auswirkungen (vgl. Abschn. 8.4). Das eigentlich ungiftige CO<sub>2</sub> (Ausatemungsluft 3...4 Vol.-%) wird durch seine hohe Dichte (1,5-mal schwerer als Luft) häufig in Kellern (Wein- und Mostkellereien), Jauchegruben, Silos, Kohlegruben sowie bei Bauarbeiten so stark angereichert, dass durch Verdrängung des Sauerstoffs Erstickung eintreten kann.

Beim Menschen wirken CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von 20 Vol.-% tödlich; bei 8...10 Vol.-% treten Atemnot, Kopfschmerzen, Schwindel, Schwächegefühl und schließlich Bewusstlosigkeit ein. Eine brennende Kerze erlicht bei 8...10 Vol.-% CO<sub>2</sub> und zeigt damit den Beginn der gefährlichen Konzentration an. In Arbeitsräumen sollte die **maximale Arbeitsplatzkonzentration MAK** von 5 000 ppm nicht überschritten werden.

### 8.3.2 Kohlenstoffmonoxid

Das farb- und geruchlose, in Wasser kaum lösliche und giftige Gas Kohlenstoffmonoxid (CO) entsteht vor allem bei unvollständiger Verbrennung von fossilen Energieträgern (Sauerstoffmangel) und ist auch in den Abgasen von Benzinmotoren enthalten [8.3]. Hauptursache ist der städtische Individualverkehr, da CO vorwiegend bei niedrigen Motortemperaturen (Leerlauf) gebildet wird, ebenso wie bei schlecht eingestellten Heizungen.

Die CO-Emission bei Kraftfahrzeugen kann durch die Katalysatortechnik im Rahmen einer Nachverbrennung drastisch reduziert werden. Ähnliche Maßnahmen werden bei industriellen Prozessen zur Abgasreinigung ergriffen (vgl. Kap. 20).

Beim Menschen besteht die Giftwirkung von Kohlenstoffmonoxid in einer Blockade des O<sub>2</sub>-Transportes im Blut, da es sich mit einer ca. 300-fach größeren Affinität gegenüber Sauerstoff an den roten Blutfarbstoff (Hämoglobin) bindet. Die Vergiftungserscheinungen reichen von Kopfschmerzen, Schwindel, Mattigkeit über Atemnot bis hin zum Tod. CO-Vergiftungen sind immer noch eine der häufigsten Vergiftungsmethoden, so z. B. in Ländern (z. B. Großbritannien, Frankreich, USA) mit CO-haltigem Leuchtgas oder durch Einatmung von Autogasen in geschlossenen Garagen.

In der Luft sind Werte bis 10 ppm CO als bedenkenlos einzustufen. In Großstädten können Stundenmittelwerte von 30...50 ppm und Spitzenkonzentrationen von 100...300 ppm erreicht werden. Nimmt man als Maß für die Giftigkeit die CO-Konzentration im Blut, so beobachtet man z. B. bei Rauchern, dass 3 % des Hämoglobins (Hb) mit CO belegt sind. Bei Kettenrauchern kann die CO-Hb-Konzentration auf 10...15 % steigen. Bei 20 % CO-Hb treten Vergiftungserscheinungen auf, und 65 % CO-Hb sind für den Menschen tödlich. Auffällig ist eine angeborene und nicht erworbene Resistenz einiger Menschen gegenüber Kohlenstoffmonoxid.

### 8.3.3 Methan

Methan wurde als natürlicher Bestandteil der Erdatmosphäre relativ spät als solcher erkannt. Eiskernbohrungen haben für die letzten 25 000 Jahre eine schwankende CH<sub>4</sub>-Konzentration ergeben. Erst seit dem 17. Jahrhundert stieg der Methananteil der Luft kontinuierlich auf 1,25 ppm und im letzten Jahrhundert exponentiell auf 1,72 ppm (1990) an. Die Me-

thankonzentration ist wie die  $\text{CO}_2$ -Konzentration von der Jahreszeit abhängig.

Tabelle 8-4: Schätzung natürlicher und anthropogener Quellen von Methan [8.4]

| Methan-Quellen                        | Mio. Tonnen/Jahr |
|---------------------------------------|------------------|
| Feuchtgebiete (Moore, Sümpfe, Tundra) | 115,0 (50...200) |
| Ozeane und Seen                       | 15,0 (5...25)    |
| Termiten und andere Insekten          | 40,0 (10...100)  |
| Reisfelder (Nassreis)                 | 130,0 (70...170) |
| Fermentation durch Wiederkäuer        | 75,0 (70...80)   |
| Verbrennung von Biomasse              | 40,0 (20...80)   |
| Mülldeponien                          | 40,0 (20...60)   |
| Kohlebergbau                          | 35,0 (10...80)   |

In Klammern ist der Bereich der Schätzung angegeben

Mehr als die Hälfte der Methan-Emissionen stammt aus der Umsetzung von Pflanzen durch anaerobe Bakterien in Reisfeldern und anderen Feuchtgebieten, in den Mägen von Schafen und Kühen sowie im Verdauungstrakt von Termiten. Weitere Quellen sind Kohlebergbau, Kläranlagen, natürliche Gasvorkommen und Deponien.

Die Atmosphäre enthält zz. ca. 1,75 ppm Methan, wobei durch Zunahme der Weltbevölkerung eine proportionale Steigerung zu erwarten ist.

### 8.3.4 Schwefeldioxid

Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) ist neben Kohlenstoffmonoxid die wichtigste Schadstoffkomponente der städtischen Luft.  $\text{SO}_2$  entsteht bei der Verbrennung schwefelhaltiger, fossiler Brennstoffe (Kohle, Diesel- und Heizöl). Es ist ein farbloses und stechend riechendes Gas, das bei hoher atmosphärischer Belastung (z. B. Smog-Situation) ohne weiteres vom Menschen wahrgenommen wird.  $\text{SO}_2$  ist gut wasserlöslich und bildet mit der Luftfeuchtigkeit zunächst schweflige Säure ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ), die zu Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) oxidiert werden kann (vgl. Abschn. 2.3.2).

Die oberen Atemwege und der Bronchialraum werden von den Schwefeloxiden ( $\text{SO}_2/\text{SO}_3$ ) unmittelbar beeinträchtigt. Dies kann zu Lähmungserscheinungen, zum Absterben der Flimmerhärchen und zur Beeinträchtigung der Atemfunktion (Krämpfe der Bronchien, Einengung der Atemwege) führen. In den Zellen greift  $\text{SO}_2$  in den Energiestoffwechsel ein und verhindert die ATP-Bildung.



Schwefeldioxid ist kein relativ langlebiger Schadstoff und kann über größere Entfernungen transportiert werden. Daher ist  $\text{SO}_2$  ein typisches Beispiel für grenzüberschreitende Schadstoffe. Die maximale  $\text{SO}_2$ -Emission wurde in der Bundesrepublik 1973 mit ca. 3,8 Mio. Tonnen erreicht. Seit dem konnte der  $\text{SO}_2$ -Ausstoß, flankiert durch gesetzliche Regelungen zur Begrenzung des Schwefelgehalts, wesentlich reduziert werden, durch z. B.:

- höhere Wirkungsgrade bei der Kraftwerkstechnik,
- verbesserte Produktionstechnologie in Industrie und Wirtschaft,
- Brennstoffumstellungen.

Die Beeinträchtigungen durch  $\text{SO}_2$ -Schädigungen sind zwar reversibel, können in Einzelfällen jedoch ein bedrohliches Ausmaß annehmen. Bei Menschen liegt die Reizschwelle bei 5,0...6,5 mg/m<sup>3</sup>  $\text{SO}_2$ . Pflanzen reagieren bei Überschreitung der Immissionsgrenzwerte (IW-1 Wert: 0,14 mg/m<sup>3</sup>, IW-2 Wert: 0,4 mg/m<sup>3</sup>) mit einer erhöhten Verdunstung (Wasserstress) sowie mit Nadel- und Blattnekrosen (Waldschädigung). **Schwefelsaurer Regen** ist auch für Bauwerks- und Materialschäden (Steinpest) verantwortlich, aber kaum zu quantifizieren. Als Indikatorpflanzen für  $\text{SO}_2$  können Flechten, aber auch Fichten oder Lupinien herangezogen werden [8.5].

### 8.3.5 Stickstoffoxide

Stickstoffoxide entstehen überwiegend bei Verbrennungsprozessen mit hoher Temperatur (Kfz-Verkehr, Kraft- und Heizwerke, Industrie) und zählen zu den klassischen Schadstoffen industrieller Luftverschmutzung.  $\text{NO}_x$  wird als Sammelbezeichnung für alle Stickstoffoxide verwendet. Unter atmosphärischen Bedingungen liegen fast ausschließlich Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) vor. Aus Kraftfahrzeugen und Kraftwerken wird überwiegend NO emittiert (ca. 90 % des gesamten  $\text{NO}_x$ ). In der Atmosphäre liegen jedoch beide Gase zu gleichen Anteilen vor. Da die Oxidation zu  $\text{NO}_2$  nur langsam verläuft, muss das  $\text{NO}_2$  in der Atmosphäre überwiegend bakteriellen Ursprungs sein (vgl. Abschn. 2.4.2).

NO ist farblos und in Wasser nur wenig löslich. Das rotbraune, ebenfalls schwer lösliche  $\text{NO}_2$  bildet in Wasser und alkalischen Lösungen Nitrate und Nitrite.  $\text{NO}_2$  führt wie  $\text{SO}_2$  beim Menschen zu akuter oder chronischer Schleimhautreizung. NO ist nur insofern bedeutsam, da es zu  $\text{NO}_2$  oxidiert werden kann.

Stickstoffoxide wirken auf zwei verschiedene Arten umweltschädlich:

- Bildung von salpetriger und Salpetersäure („saurer Regen“),
- Reaktion mit gasförmigen, ungesättigten Kohlenwasserstoffen sowie UV-Licht unter Bildung von Photooxidantien (z. B. Ozon).

Die Immissionsgrenzwerte IW-1 und IW-2 der TA-Luft (2002) betragen für  $\text{NO}_2$  80 und  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Für NO werden seit 1986 keine Werte mehr angegeben. In Großstädten mit hohem Verkehrsaufkommen können Kurzzeitwerte von  $500 \dots 1\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  Stickstoffoxid erreicht werden.

### 8.3.6 Formaldehyd

Formaldehyd entsteht als Zwischenprodukt bei der Methanoxidation in der Atmosphäre sowie bei unvollständigen Verbrennungsprozessen. Der Schadstoff ist ein farbloses, stechend riechendes Gas mit einem Geruchsschwellenwert von  $100 \dots 1\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Diese Konzentration liegt knapp über dem typischen Gehalt von unbelasteten Wohnräumen ( $30 \dots 90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

1990 wurden in der Bundesrepublik ca. 700 000 t Formaldehyd hergestellt. 2/3 der Produktion werden zur Formaldehyd-Harz-Herstellung (z. B. Klebstoff in Spanplatten) verwendet. Seit Ende des vorletzten Jahrhunderts wird Formaldehyd als Desinfektionsmittel angewandt. Heute dienen ca. 6 % der Produktion, wegen des breiten bioziden Wirkungsspektrums, zu Desinfektions-, Sterilisations- und Konservierungszwecken.

Formaldehyd verursacht bei Inhalation hoher Konzentrationen ( $> 1,2 \text{ mg}/\text{m}^3$ ) Entzündungen an Augen und Atemwegen. Es besteht auch der Verdacht auf Krebs erzeugende und mutagene Wirkung.

### 8.3.7 Kohlenwasserstoffe

Organische Verbindungen, die nur aus den Elementen Kohlenstoff und Wasserstoff bestehen, werden Kohlenwasserstoffe (KW) genannt. Sie lassen sich in kettenförmige (aliphatische) KW (z. B. Ethan, Propan, Octan) und ringförmige (alicyclische und aromatische) KW (z. B. Cyclohexan, Benzen) einteilen. Kohlenwasserstoffe haben als **Energieträger** (z. B. Erdgas, Erdöl) und **Rohstoff** (z. B. Kunststoffindustrie) größte wirtschaftliche Bedeutung.

Natürliche und anthropogene Emissionen werden zusammen auf 500 bis 1 000 Mio. Tonnen pro Jahr geschätzt [8.2, 8.3]. Typische Quellen sind

die Verwendung von Erdölprodukten (z. B. Löse- und Reinigungsmittel, Kraftstoffe), aber auch natürliche Quellen (z. B. Meeresorganismen). Die KW-Konzentrationen liegen in ländlichen Gegenden um 20 bis 100 ppb und in Ballungsgebieten bei 100...1 000 ppb. Der Individualverkehr ist der Hauptverursacher von KW-Emissionen.

### 8.3.8 Halogenierte Kohlenwasserstoffe

Als Sammelbezeichnung für Kohlenwasserstoffe, an denen Halogene gebunden sind, hat sich die Bezeichnung **halogenierte Kohlenwasserstoffe (HKW)** eingebürgert. Diese Verbindungen werden als Lösungsmittel (z. B. chemische Reinigung), Treibgas (z. B. Spraydosen, Schaumstoffe) und Kühlmittel (z. B. Kühlschrank) verwendet.

**Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW)** gehören ebenfalls zu den halogenierten Kohlenwasserstoffen. Die Weltjahresproduktion beträgt zurzeit über 1 Mio. Tonnen, wobei durch Anwendungsverbote bzw. Beschränkung ein Rückgang zu beobachten ist. FCKW sind vermutlich die Hauptverursacher der Ozonerstörung in der Stratosphäre (vgl. Abschn. 8.5). Die Industrie versucht Ersatzstoffe zu entwickeln und einzusetzen. So werden die Kohlenwasserstoffe Propan und Butan als Treibmittel bereits verwendet.

### 8.3.9 Asbest

Unter dem Begriff **Asbest** fasst man eine Gruppe natürlicher Silicatmineralien mit faseriger, verfilzter Struktur zusammen. Asbestfasern haben wegen ihrer extremen Hitze- und Chemikalienbeständigkeit, aber auch wegen ihrer erstaunlichen mechanischen Festigkeit vielfältige Einsatzbereiche gefunden. Das feuerfeste, schlecht wärmeleitende und chemisch inerte Material wurde bis in die 70er-Jahre in vielen Gegenständen des täglichen Lebens eingesetzt. Die Verwendung in Bodenbelägen, Wand- und Deckenverkleidungen, Dachpappe, Rohren, Farben, Dichtungen, Isolationen, Nachtspeicheröfen und Brandabschottungen sind nur einige Beispiele hierfür.

Für die Wirkung auf den Menschen sind die Faserlänge und das Länge-Breite-Verhältnis entscheidend. Fasern mit einer Länge  $> 5 \mu\text{m}$  und einer Breite  $< 3 \mu\text{m}$  sind besonders leicht lungengängig und bleiben in den Atemwegen stecken. Sie schädigen dort die Funktion der Lungenbläschen (Alveolen) und können zu Krebs führen. Die Asbestose ist unheilbar und wird seit 1936 als Berufskrankheit anerkannt. Die Faserkonzentration in der Luft sollte  $500 \text{ Fasern/m}^3$  nicht überschreiten.

## 8.4 Treibhauseffekt

Unter dem Begriff **Klima** versteht man im Allgemeinen den durchschnittlichen Wetterverlauf über einen längeren Zeitraum. Veränderungen des Klimas entstehen durch **komplexe Wechselwirkungen** zwischen Luft (Atmosphäre), Wasser (Hydrosphäre), Boden (Pedosphäre) und Lebewesen (Biosphäre). Dabei kommt der Strahlungsbilanz der Erde eine besondere Rolle zu. Es spielen aber auch **externe Parameter**, wie z. B. die Position der Erde zur Sonne, vulkanische Aktivitäten und anthropogene Einflüsse eine wichtige Rolle. Der Mensch greift durch unterschiedliche Formen der Landnutzung und über Veränderung der atmosphärischen Zusammensetzung in das klimatische Geschehen ein.

Klimaschwankungen hat es in der Erdgeschichte schon vor dem Auftreten des Menschen gegeben. So herrschte beispielsweise vor 3 Mrd. Jahren ein Klima mit einer Durchschnittstemperatur von über +50 °C. Die Vereisung der Antarktis begann vor ca. 40 Mio. Jahren. Aber auch in den letzten Jahrtausenden gab es große Temperatursprünge, häufig auch innerhalb einiger Jahrzehnte, aber mit katastrophalen Folgen.

Die Möglichkeit einer anthropogen verursachten Klimaveränderung wird bereits seit den 70er-Jahren diskutiert. Derzeit leben wir, absolut betrachtet, in einer der kohlenstoffdioxidärmsten Epochen, trotz eines CO<sub>2</sub>-Anstiegs seit 40 Jahren. Inwieweit diese Zunahme auf die Verbrennung fossiler Energieträger oder die Rodung tropischer Wälder (CO<sub>2</sub>-Senke) zurückgeführt werden kann, ist nicht endgültig geklärt.

### 8.4.1 Natürlicher Treibhauseffekt

Der natürliche Treibhauseffekt beschreibt das Strahlungsgleichgewicht der Erde zwischen **Absorption des Sonnenlichtes** und **Emission der Wärmestrahlung** von Erdoberfläche und Atmosphäre. Dieses Strahlungsgleichgewicht wird durch die in der Atmosphäre vorhandenen **Spurengase** (z. B. CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>3</sub>) bestimmt. Ein großer Teil der von der Erdoberfläche emittierten Wärmestrahlung wird daher nicht direkt in den Weltraum abgestrahlt, sondern in der unteren Atmosphäre absorbiert und wieder zur Erde zurückgestrahlt (vgl. Bild 8-1). Die gute Durchlässigkeit der Atmosphäre für kurzwellige Ultraviolettstrahlung (UV) und die relative Undurchlässigkeit für langwellige Infrarotstrahlung (IR) verursacht eine Erwärmung über die direkte Wärmestrahlung der Sonne hinaus (vgl. Tab. 8-5).

Eine von anthropogenen Einflüssen ungestörte Atmosphäre ergibt im Rahmen des Strahlungsgleichgewichtes der Erde in Bodenhöhe eine langjährige mittlere Temperatur von  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ohne die klimarelevanten Spurengase in der Atmosphäre würde die Temperatur nur  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  betragen.

Tabelle 8-5: Beitrag wichtiger Spurengase zum natürlichen Treibhauseffekt [8.6]

| Spurengase                                | Anteil in der Atmosphäre | Temperaturerhöhung in $^{\circ}\text{C}$ |
|---|--------------------------|--|
| Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ )      | 26 % (Mittelwert)        | 20,6                                     |
| Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ )       | 350 ppm                  | 7,2                                      |
| Ozon ( $\text{O}_3$ )                     | 30 ppb                   | 2,4                                      |
| Distickstoffoxid ( $\text{N}_2\text{O}$ ) | 0,3 ppm                  | 1,4                                      |
| Methan ( $\text{CH}_4$ )                  | 1,7 ppm                  | 0,8                                      |
| sonstige                                  | 1 ppm                    | 0,8                                      |

Die Differenz von  $+33,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  zu ansonsten  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  ohne Spurengase ergibt die heutige mittlere Welttemperatur von  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

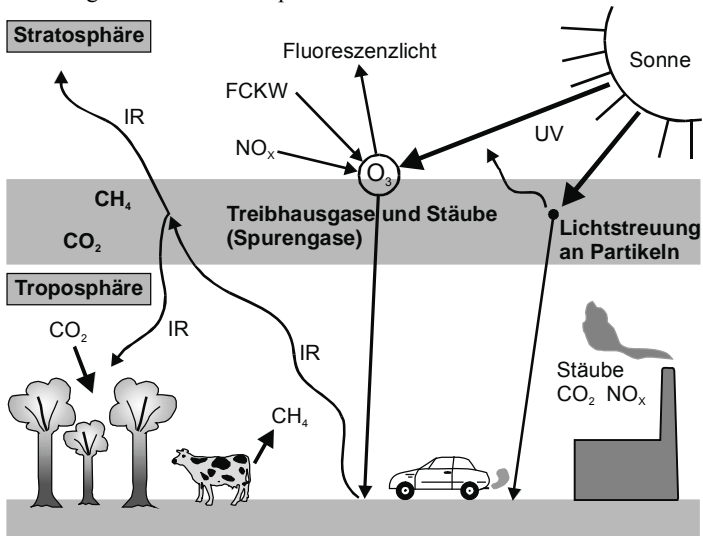


Bild 8-1: Wechselwirkungen von atmosphärischen Spurenstoffen mit dem Strahlungshaushalt der Erde (IR: Wärmestrahlung)

### 8.4.2 Anthropogener Treibhauseffekt

Durch seine Aktivitäten trägt der Mensch zur Emission weiterer treibhausrelevanter Spurengase bei. Es wird nicht nur die Konzentration der bereits vorhandenen Klimagase (z. B.  $\text{CO}_2$  und  $\text{CH}_4$ ) erhöht, sondern auch neue Verbindungen (z. B. FCKW) werden erzeugt, die ihrerseits ebenfalls Auswirkungen auf den Treibhauseffekt haben. Kohlenstoffdioxid aus der Verbrennung fossiler Energieträger könnte zu einer stärkeren Absorption der Wärmestrahlung als bisher führen. Daneben können ozonzerstörende Substanzen wie Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) in der Stratosphäre zu einer erhöhten UV-Strahlung auf der Erde führen. Insgesamt würde mehr Sonnenenergie auf die Erde gelangen und für eine höhere mittlere Durchschnittstemperatur sorgen. Da die Lufttemperatur jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen ist und die mittlere Durchschnittstemperatur selbst periodischen Schwankungen unterliegt, können langfristige Tendenzen nur über längere Zeiträume ermittelt werden.

Derzeitige Schätzungen der Entwicklung der mittleren Jahrestemperatur, auf der Basis mathematisch sehr aufwendiger Computermodelle (**globale Klimamodelle**), schwanken zwischen  $1\text{ }^\circ\text{C}$  und  $4\text{ }^\circ\text{C}$  über einen Zeitraum von 30 Jahren [8.7, 8.8, 8.9]. Temperaturschwankungen dieser Größenordnung sind gravierend für das Erdklima und haben folgende Auswirkungen:

- Abschmelzen der Polareiskappen und Ansteigen des Weltmeerespiegel und durch Wärmeausdehnung des Wassers,
- vermehrtes Auftreten von Extremwetterlagen (z. B. Sturmfluten),
- Verschiebung regionaler Ökosysteme (z. B. Waldgebiete der nördlichen Breiten wandern weiter nach Norden), Ausdehnung von Wüsten.

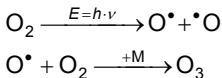
Neben der Emission von Kohlenstoffdioxid bei der Verbrennung fossiler Energieträger entstehen Ruß- und Flugaschepartikel. Sie werden als **atmosphärisches Aerosol** bezeichnet. Natürliche Quellen für Aerosole sind z. B. Staubstürme und Vulkanausbrüche. Aerosole Wechselwirkungen mit der Sonnen- und atmosphärisch-terrestrischen Strahlung tragen daher zur Klimaveränderung bei. Die auftretende Strahlung wird einerseits absorbiert und andererseits am Partikel gestreut (vgl. Bild 8-1). Ein Teil der Sonnenstrahlung gelangt somit nicht zur Erdoberfläche und kann daher nicht zur Erwärmung beitragen. Es kommt zu einer Abkühlung der bodennahen Luftschichten. Man nimmt an, dass zurzeit der abkühlende Effekt überwiegt.

Aerosole beeinflussen auch die optischen Eigenschaften von Wolken, die Wolkenbildung und die Verweilzeit der Wolken. Schätzungen zufolge führt die Beeinflussung der Wolken durch anthropogene Aerosole zu einer Abkühlung in Bodennähe.

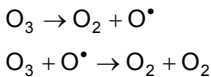
## 8.5 Ozonloch

Ozon ( $O_3$ ), als chemische Variante des Sauerstoffs, entsteht unter dem Einfluss kurzwelliger UV-Strahlung der Sonne aus dem normalen Luftsauerstoff ( $O_2$ ) in der Stratosphäre. Es herrscht ein Gleichgewicht zwischen Ozon auf- und Ozon abbauenden Prozessen. Dieser Vorgang filtert den überwiegenden Teil der gefährlichen UV-B-Strahlung aus dem Sonnenlicht.

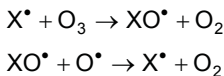
Als Primärschritt erfolgt eine photoinduzierte  $O_2$ -Spaltung durch kurzwellige UV-C-Strahlung ( $\leq 242$  nm), gefolgt von der Ozonbildung durch Dreierstoß, wobei M der zur Aufnahme der freigesetzten Energie notwendige Stoßparameter ist.



Anschließend führt die Photolyse durch Licht der Wellenlänge  $\leq 360$  nm wieder zur Spaltung des Ozons.



Eine Verschiebung dieses stratosphärischen Ozongleichgewichtes erfolgt durch katalysierte Abbaureaktionen. Die hierzu erforderlichen Halogenradikale ( $X^\bullet$ ) stammen aus in Bodennähe emittierenden Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW) und Distickstoffoxid ( $N_2O$ ). Die Lebensdauer einzelner halogenierter, ozonabbauender Kohlenwasserstoffe ist mit 2 bis mehr als 400 Jahren sehr unterschiedlich. [8.10]



Die FCKW sind fluorierte und chlorierte Kohlenwasserstoffe überwiegend von Methan und Ethan. Es wird zwischen voll- und teilhalogenierten FCKW unterschieden, wobei die vollhalogenierten FCKW das weit aus größere Problem für die Zerstörung der Ozonschicht darstellen. Die

typischen Eigenschaften (z. B. Unbrennbarkeit, geringe Toxizität) haben in der Industrie für ein breites Anwendungsspektrum geführt. Internationale Abkommen zur Verhinderung von FCKW-Emissionen und auch die deutsche FCKW-Halon-Verbotsverordnung aus dem Jahre 1991 sind erste Schritte in die richtige Richtung.

- Treibgas in Spraydosen (ca. 49 %),
- Aufschäummittel für Kunststoffe (ca. 34 %),
- Kältemittel in Kühlaggregaten (ca. 11 %),
- Lösungsmittel (ca. 6 %).

Zwischenzeitlich ist die Verwendung in Spraydosen drastisch gesunken und auch für den Bereich Aufschäumung von Kunststoffen sind Alternativen gefunden worden. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass FCKW neben der Zerstörung der Ozonschicht auch mit einem hohen Faktor am Treibhauseffekt mitwirkt (vgl. Abschn. 8.4).

Ende der 70er-Jahre wurde das **Ozonloch-Phänomen** als räumlich und zeitlich begrenzte Ausdünnung der stratosphärischen Ozonschicht entdeckt. Das Ozonloch tritt bisher hauptsächlich über der Antarktis in den Monaten September bis November (Beginn des südlichen Frühlings) auf. Der Ozonschwund beträgt teilweise mehr als 50 % (Tendenz steigend) bis zu völligem Verlust. In den Monaten Januar bis März (Ende des nördlichen Winters) nimmt aber auch über der Arktis die Ozonkonzentration zunehmend ab. Die Schutzfunktion des Ozons zur Absorption energiereicher UV-Strahlung wird damit immer weiter reduziert. Als Folge hiervon beobachtet man eine Intensivierung der UV-Strahlung und ein verstärktes Auftreten von Hautkrebs (besonders in Brasilien und Australien).

Tabelle 8-6: Wirkung des UV-Lichtes auf die menschliche Haut

| Wellenlänge  | Wirkung  |
|--------------|--|
| 400...313 nm | Pigmentierung der Haut (UV-A-Strahlung)                                      |
| 297 nm       | schwere Verbrennungen, Bildung von Karzinomen (UV-B-Strahlung)               |
| 265 nm       | stärkste Absorption der DNA (Zerstörung von Zellen)                          |
| 254 nm       | entzündliche Rötung der Haut, wenn nicht genügend angepasst (UV-C-Strahlung) |

Die UV-B-Strahlung ist für den Sonnenbrand verantwortlich und stellt ein körpereigenes Alarmsystem dar. Sonnencreme absorbiert vorrangig die UV-B-Strahlung, lässt die gefährliche UV-A-Strahlung nahezu ungehindert in den Körper eindringen.