

## 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.