

Fernstudium  
**Industrial Engineering**  
Betrieblicher Arbeits- und Umweltschutz

---

Kurseinheit 65

**Emissionsminderung**

Luft und Luftreinhaltung  
Industrieabwasser

Prof. Dr. rer. nat. Gerolf Marbach  
Prof. Dr. rer. nat. Rainer Gräf

**Fernstudieninstitut**

# 1 Einleitung

## 1.1 Reine Luft und Luftreinhaltung

### 1.1.1 Reine Luft

Luft ist ein Gasgemisch aus verschiedenen Komponenten. Neben den Hauptbestandteilen Stickstoff und Sauerstoff enthält sie Edelgase und eine Vielzahl weiterer Spurenstoffe (siehe Tabelle 1.1). Die Spurenstoffe entstehen entweder auf natürlichem Weg, z. B. durch die Einwirkung der Sonne (Ozon), durch Zersetzungs- und Fäulnisprozesse (CO, CH<sub>4</sub>, ...) oder durch Witterungseinflüsse (Stickoxide), oder die Spurenstoffe entstehen durch menschliche Aktivitäten (anthropogen), z. B. bei der Energieerzeugung, bei Industrieprozessen und beim Betrieb von Fahrzeugen. Alle Stoffe, welche die natürliche Zusammensetzung der Luft verändern, werden als Luftverunreinigungen bezeichnet, seien sie nun natürlichen oder anthropogenen Ursprungs. Luftverunreinigungen können dabei in Form von Gasen (z. B. Schwefeldioxid), Flüssigkeiten (z. B. Nebeltröpfchen) oder Feststoffen (Staub) vorliegen. Die Lufthülle der Erde bezeichnet man auch als „atmosphärisches Aerosol“, ihre chemische Zusammensetzung ist bis in eine Höhe von 100 km nahezu konstant.

Gasgemisch

Luftverunreinigungen

„atmosphärisches  
Aerosol“

Tabelle 1.1: Die natürliche Zusammensetzung von trockener Luft

Bestandteil		Volumenanteil in %	Volumenanteil in ppm
Stickstoff	N <sub>2</sub>	78,10	
Sauerstoff	O <sub>2</sub>	20,93	
Argon	Ar	0,9325	
Kohlendioxid	CO <sub>2</sub>	0,0357	357
Wasserstoff	H <sub>2</sub>	0,01	100
Neon	Ne	0,0018	18
Helium	He	0,0005	5
Methan	CH <sub>4</sub>	0,000175	1,75
Krypton	Kr	0,00011	1,1
Distickstoffoxid	N <sub>2</sub> O	0,00003	0,3
Kohlenmonoxid (*)	CO	0,000015	0,15
Xenon	Xe	0,000009	0,09
Ozon	O <sub>3</sub>		0,03-0,05
Schwefeldioxid	SO <sub>2</sub>		0,002-0,0001
Stickoxide ohne N <sub>2</sub> O	NO <sub>x</sub> (NO und NO <sub>2</sub> )		0,005-0,00001
FCKW R11	FCKW		0,00028
FCKW R12	FCKW		0,00048
FCKW R22	FCKW		0,00012
HO <sub>2</sub> -Radikale			0,000004
OH-Radikale			0,0000004

(\*) über der Nordhalbkugel

## 1.1.2 Luftreinhaltung

Leben auf der Erde ist dank eines gleichbleibenden Sauerstoffgehalts von 20,93 % möglich. Sauerstoff wird von aeroben Organismen, also auch vom Menschen, zur Umwandlung der Nahrung in Energie benötigt. Dabei wird Kohlendioxid freigesetzt. Anthropogene Luftverunreinigungen sind seit dem Gebrauch des Feuers und verstärkt seit der Industrialisierung im achtzehnten Jahrhundert zu verzeichnen. Alle in die Umwelt gelangenden Luftverunreinigungen (auch Geräusche, Strahlen, Wärme oder Erschütterungen) werden als Emissionen bezeichnet. Emissionen wirken entweder direkt in der Umgebung der Emissionsquelle oder in mehr oder weniger großer Entfernung auf die Umwelt ein. Man spricht dann von Immissionen. Eine Vielzahl von emittierten Stoffen weist eine schädigende Wirkung auf. Man bezeichnet sie deshalb als Luftschadstoffe. Dies wurde frühzeitig erkannt. Schon im elften Jahrhundert wurden in London Emissionsbeschränkungen für Schmiede erlassen. Inzwischen gibt es weltweit gesetzliche Regelungen im Bereich der Luftreinhaltung. Erwähnt seien an dieser Stelle nur der Clean Air Act in den USA (1970) und der Health and Safety Act in Großbritannien (1974). Die Luftreinhaltung ist in Deutschland in der Hauptsache im Bundes-Immissionsschutzgesetz, den daraus hervorgehenden Verordnungen und den zugehörigen Verwaltungsvorschriften geregelt.

Emissionen

Immissionen

Luftschadstoffe

Bundes-Immissionsschutzgesetz  
(BImSchG)

Das Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG) aus dem Jahre 1974 wird laufend den aktuellen Erfordernissen angepasst. Schädliche Umwelteinwirkungen sollen dabei durch die Begrenzung der Immissionen und die Begrenzung der Emissionen vermieden werden. Dies wird realisiert durch anlagenbezogene, produktbezogene, betriebsbezogene und gebietsbezogene Regelungen. Eine Konkretisierung der Anforderungen erfolgt in den verschiedenen Verordnungen zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchV) und in den Verwaltungsvorschriften (VwV) zum Bundes-Immissionsschutzgesetz.

Verordnungen  
(BImSchV)

Verwaltungsvorschriften  
(BImSchVwV)

genehmigungsbedürftig  
4. BImSchV

Das BImSchG unterscheidet zwischen genehmigungsbedürftigen und nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen. In der 4. BImSchV wird definiert, welche Anlagen einer Genehmigung bedürfen. So dürfen z. B. Gießereien, Zementwerke, Kraftwerke, Müllverbrennungsanlagen, Papierfabriken, Chemieanlagen usw. nicht ohne Genehmigung errichtet und betrieben werden. Genehmigung und Überwachung derartiger Anlagen durch die zuständige Behörde erfolgt auf der Grundlage der 1. BImSchVwV (TA Luft). Betreiber genehmigungsbedürftiger Anlagen sind zudem verpflichtet, regelmäßig eine Emissionserklärung abzugeben (11. BImSchV). Genehmigungsbefürftige Anlagen, in welchen größere Mengen gefährlicher Stoffe entstehen können oder vorhanden sind (z. B. Chemieanlagen, Mineralöllager), unterliegen weiterhin der Störfall-Verordnung (12. BImSchV); Feuerungsanlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von 50 MW und mehr unterliegen der Großfeuerungsanlagen-Verordnung (13. BImSchV), und Abfallverbrennungsanlagen unterliegen der Abfallverbrennungs-Verordnung (17. BImSchV). Betreiber bestimmter genehmigungsbedürftiger Anlagen haben außerdem einen Immissionsschutz- und eventuell einen Störfallbeauftragten zu stellen (5. BImSchV).

TA Luft

Aber auch im Bereich der nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen existieren gesetzliche Regelungen. So unterliegen Hausheizungen der Kleinfeuerungsanlagen-Verordnung (1. BImSchV), für chemische Reinigungen gilt die 2. BImSchV, Schreinereien unterliegen der 7. BImSchV, und für Tankstellen gilt die 20. und 21. BImSchV.

nicht genehmigungsbedürftig

Anlagenbezogene Regelungen erfassen in der Regel genau lokalisierbare (punktförmige) Emissionsquellen. Durch Qualitätsnormen für Brennstoffe, wie sie in der 3., 10. und 19. BImSchV formuliert sind, werden u.a. bewegte Emissionsquellen oder flächenhafte Emissionsquellen erfasst. Eine Verbesserung der Brennstoffqualität ist ein wichtiger Ansatz zur Reduktion der Emissionen aus den Quellgruppen Verkehr und Haushaltungen. Die Begrenzung des Bleigehalts in verbleitem Kraftstoff aufgrund des Benzinbleigesetzes ist, neben dem zunehmenden Einsatz bleifreien Kraftstoffs, die Hauptursache für den Rückgang der Bleibelastung der Luft von 233 ng/m<sup>3</sup> (1971, BRD) auf 14 ng/m<sup>3</sup> (1991, alte Bundesländer).

Qualitätsnormen

Die PCB-Verbotsverordnung und die FCKW-Halon-Verbotsverordnung haben zum Ziel, die Belastung der Umwelt durch diese halogenorganischen Verbindungen zu minimieren.

Verbot

## 1.2 Begriffe und Maßeinheiten

### 1.2.1 Begriffe

Luftverunreinigungen: alle Stoffe, welche die natürliche Zusammensetzung der Luft verändern

Luftschadstoffe: schädliche Luftverunreinigungen

Emissionen: an die Umwelt abgegebene Luftverunreinigungen, auch Geräusche, Strahlung, Wärme und Erschütterungen

Emissionsquellen: Anlagen, Fahrzeuge, Gebäude, aus welchen Luftverunreinigungen emittiert werden. Man unterscheidet zwischen Punktquellen (Schornstein), Flächenquellen (Leckagen an Rohrleitungsnetzen, z. B. in Raffinerien, Hausschornsteine in einem Wohngebiet) und Linienquellen (stark befahrene Straßen).

Punktquellen /  
Flächenquellen /  
Linienquellen

Immissionen: die Einwirkung von Luftverunreinigungen, Geräuschen, Strahlung, Wärme oder Erschütterungen - also der Emissionen - auf die Umwelt

Verdünnung	<p><b>Transmission:</b> Ausbreitung der Luftverunreinigungen von der Emissionsquelle zum Immissionsort. Die Luftverunreinigungen werden dabei verdünnt, teilweise erfahren sie auch chemische Umwandlungen. Je höher die Emissionsquelle liegt, desto besser ist die Verdünnung und desto weiträumiger werden die Luftverunreinigungen verfrachtet.</p>
	<p><b>Deposition:</b> Ablagerung von Luftverunreinigungen auf der unbelebten und belebten Umwelt. Es wird unterschieden zwischen trockener Ablagerung (Deposition ohne Niederschlag) und nasser Ablagerung (Deposition mit Niederschlag).</p>
	<p><b>Emissionsfaktor:</b> Verhältnis der Masse eines bei der Produktion/Verarbeitung emittierten Stoffes zu der Masse des Produkts (Einheit: kg/t) oder bei Brennstoffen das Verhältnis der Masse eines bei der Verbrennung emittierten Stoffes zur Wärmeleistung (Einheit: kg/TJ) oder zur Fahrleistung (Einheit: g/km)</p>
Winter-Smog Sommer-Smog	<p><b>Smog:</b> englische Wortschöpfung aus smoke (= Rauch) und fog (= Nebel). Eine hohe Konzentration von Luftverunreinigungen über Ballungsgebieten wird als Smog bezeichnet. Smog entsteht, wenn die Emissionen aufgrund austauscharmer Wetterlagen nicht mehr in höhere Luftschichten entweichen können. Man unterscheidet je nach Jahreszeit und Art der Emissionen zwischen Winter-Smog („London Smog“ oder saurer Smog) und Sommer-Smog („Los Angeles Smog“ oder photochemischer Smog). Winter-Smog ist eine Kombination aus Schwefeldioxid, Ruß und Nebel. Die Luftbelastung verstärkt sich dabei über Nacht. Sommer-Smog entsteht durch chemische Umwandlungsreaktionen von Kohlenwasserstoffen und Stickoxiden unter dem Einfluss der Sonnenstrahlung. Dabei bilden sich u. a. Ozon und andere Photo-Oxidantien (vgl. Abschnitt 2.4.2).</p>

### 1.2.2 Maßeinheiten

Massenkonzentration  
Volumenkonzentration

Messwerte, Richtwerte und Grenzwerte werden entweder als Massenkonzentrationen oder als Volumenkonzentrationen angegeben. Die Massenkonzentration  $c_m$  gibt das Verhältnis der Masse des Stoffes zum Gesamtvolumen an. Mögliche Einheiten sind  $\text{mg}/\text{m}^3$  oder  $\text{g}/\text{m}^3$ . Der Quotient aus dem Volumen des Stoffes und dem Gesamtvolumen ist die Volumenkonzentration  $c_v$ . Sie wird angegeben in  $1/\text{m}^3$ ,  $\text{ml}/\text{m}^3$  oder  $\mu\text{l}/\text{m}^3$ .

Alternativ werden Volumenkonzentrationen auch mittels der Einheiten ppm (parts per million) und ppb (parts per billion) angegeben. Dabei ist 1 ppm identisch mit  $1 \text{ ml/m}^3$  ( $1 \text{ ml}/10^6 \text{ ml}$ ), und 1 ppb ist identisch mit  $1 \text{ } \mu\text{l/m}^3$  ( $10^{-3} \text{ ml}/10^6 \text{ ml}$ ).

ppm / ppb

Dabei wird in der Regel als Volumen immer das Normvolumen bei 273,15 K (= 0 °C) und 1013 mbar eingesetzt.

Die Massenkonzentration ist das Produkt aus Volumenkonzentration und Gasdichte:

$$\text{Massenkonzentration } c_m = \text{Dichte } \rho \cdot \text{Volumenkonzentration } c_v$$

Sofern die Gasdichte nicht bekannt ist, lässt sie sich wie folgt errechnen:

$$\text{Dichte } \rho = \text{molare Masse des Gases} / \text{Molvolumen } V_M$$

$V_M$  ist abhängig vom Druck und der Temperatur,

$$V_M = 22,41 \text{ l/mol (T = 273,15 K (= 0 °C), p = 1013 mbar) bzw.}$$

$$V_M = 24,06 \text{ l/mol (T = 293,15 K, p = 1013 mbar).}$$

Zur mengenmäßigen Erfassung von großen Abgas- oder Luftströmen wird entweder der Massenstrom  $\dot{m}$  oder der Volumenstrom  $\dot{V}$  angegeben. Der Massenstrom  $\dot{m}$  ist der Quotient aus der Masse des Stoffes und der Zeit (Einheiten: z. B. kg/h oder t/a), der Volumenstrom  $\dot{V}$  ist der Quotient aus dem Volumen des Stoffes und der Zeit t (Einheiten: z. B. l/h oder  $\text{m}^3/\text{a}$ ).

Massenstrom  $\dot{m}$ Volumenstrom  $\dot{V}$ 

Beispiel: Die Konzentration an HCl im Abgasstrom einer Industrieanlage liegt permanent bei  $c_v = 550 \text{ ppm}$ . Der Abgasvolumenstrom beträgt  $250 \text{ m}^3/\text{h}$ . Es soll der Massenstrom von HCl ermittelt werden.

Lösung:

$$1. \quad \dot{m} (\text{HCl}) = \dot{V} \cdot c_m$$

$$2. \quad c_m = \rho \cdot c_v$$

$$3. \quad \rho = \text{Molare Masse } M (\text{HCl}) / \text{Molvolumen } V_M$$

$$\text{zu 3.} \quad : \rho = 36,46 \text{ g} \cdot \text{mol} / 22,41 \text{ l} \cdot \text{mol} = 1,627 \text{ g/l} = 1,627 \text{ kg/m}^3$$

$$3. \text{ in } 2. \quad : c_m = 1,627 \text{ g/l} \cdot 550 \text{ ml/m}^3 = 1,627 \cdot 550 \text{ mg/m}^3 \\ = 894,85 \text{ mg/m}^3$$

$$2. \text{ in } 1. \quad : \dot{m} = 250 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 894,85 \text{ mg/m}^3 = 223,71 \text{ g/h}$$

### 1.3 Übungsaufgaben

1. Ist die Zusammensetzung der Luft in Meereshöhe überall gleich?
2. Wo ist festgelegt, welche Anlagen genehmigungsbedürftig sind?  
Nennen Sie Beispiele für genehmigungs- und nicht genehmigungsbedürftige Anlagen.
3. Wie hoch ist die Massenkonzentration von Ozon bei einem Ozon-Anteil von 0,75 ppm?