

Teil 1

1.0 Atmosphärische Luft

Unsere Erde wird gleichmäßig von einer Luftschicht umhüllt. Diese Luftschicht ist ein Gemisch verschiedener Gase, deren Zusammensetzung im Bereich der Erdoberfläche ziemlich konstant ist.

An der Grenze der Atmosphäre von ca. 900 km und darüber hinaus treten nur noch vereinzelte Gasmoleküle auf, so daß der Luftdruck praktisch dem absoluten Vakuum und die Temperatur dem absoluten Nullpunkt gleichgesetzt werden kann.

Die Ionosphäre beginnt in etwa 80 km Höhe und ist ein Bereich aus elektromagnetisch aufgeladenen Molekularschichten, von denen ausgesendete Radiowellen zum Empfänger reflektiert werden.

Selbst in der darunterliegenden Stratosphäre gibt es keine Wittererscheinung und die mittlere Temperatur in diesem Bereich beträgt nur etwa -60 °C.

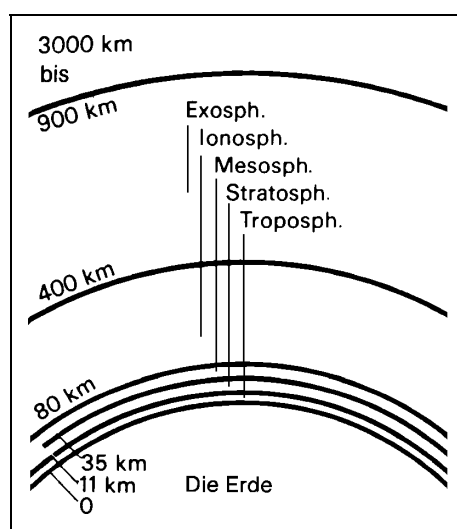


Bild 1.0.1

Die unterste Schale der Lufthülle, die Troposphäre, erreicht mit ihrem obersten Rand eine Höhe von 10 km. Die Temperatur am Rande der Troposphäre beträgt etwa $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die durchschnittliche Temperaturdifferenz beträgt dabei bis zur Erdoberfläche je km $6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ im Mittel.

Ohne atmosphärische Luft wären die täglichen Temperaturunterschiede so groß, daß Leben nicht möglich wäre. Atmosphärische Luft ermöglicht den Ausgleich zwischen Tageshitze und Nachtkälte.

1.1 Gasgemisch Luft

Die Geochemie definiert den irdischen Lebensraum als eine Einheit, bestehend aus der Luft- und Wasserhülle sowie den oberen Teil der festen Erdkruste. Innerhalb dieses Bereiches findet ein geschlossener Kreislauf der Elemente statt, die diese Lufthülle bilden. Thematisch von Interesse eingegrenzt ist die Lufthülle mit den in der Luft enthaltenen Elementen Stickstoff, Sauerstoff, Kohlendioxid, Wasserstoff und den Edelgasen Argon, Helium, Krypton und Xenon.

Stickstoff gehört zu den häufigeren Elementen. Die weitaus größten Mengen finden sich in der Lufthülle, diese enthält ca. 78,1 Volumen-%. Kleinere Mengen von Stickstoff kommen in den Gasen mancher Quellen und in Gesteinseinschlüssen vor.

Sauerstoff ist das häufigste Element unseres Lebensraumes und sein Gewichtsanteil in der oberen Erdkruste wird dabei auf 49,5 % geschätzt. Rund 90 % des verfügbaren Raumes der Erstarrungsgesteine sind mit Sauerstoff besetzt. Da der Sauerstoff auf die äußeren oberflächennahen Bereiche unserer Erde beschränkt ist, reduziert sich sein Gewichtsanteil am ganzen Erdball auf 29 %. Die Atmosphäre enthält durchschnittlich $1 * 10^{15}$ Tonnen Sauerstoff bzw. 23,1 Gewicht-%.

Kohlendioxid ist in der irdischen Lufthülle enthalten mit einem Gewicht von etwa $2,3 * 10^{12}$ Tonnen. Aus den Ozeanen gehen jährlich ca. $1 * 10^{11}$ Tonnen in die Luft und ebensoviel aus der Luft ins Wasser zurück. Durch Assimilation der grünen Pflanzen werden jährlich der Luft $6 * 10^{10}$ Tonnen Kohlendioxid entzogen, doch wird nahezu die gleiche Menge durch Atmung von Menschen, Tieren und Mikroorganismen und Verwesung wieder frei. Seit etwa Anfang des 19. Jh. erhöhte sich der Kohlendioxidgehalt im wesentlichen verursacht durch den steigenden

1.0 Luft

Verbrauch fossiler Brennstoffe und Rodung der Wälder. Unter Annahme eines anhaltenden Bevölkerungswachstums von 2 % jährlich und Berücksichtigung eines Konsumzuwachses von 1 % pro Jahr errechnet sich eine Verdoppelung des Kohlendioxidgehalts in der Atmosphäre in den kommenden 50 Jahren.

Wasserstoff hat einen geschätzten Anteil an der oberen Erdkruste einschließlich Wasser- und Lufthülle von etwa 0,88 Gewicht-%. Die Erde ist in einer Höhe von 2.000 - 20.000 km von einer dünnen Wasserstoffhülle umgeben. Im Vergleich dazu besteht die Sonne aus ca. 84 Gewicht-% Wasserstoff, der Brennstoff für die Erzeugung der Sonnenenergie ist.

Argon ist das bei weitem häufigste Edelgas. Die Luft enthält durchschnittlich 0,93 Volumen-% und der Mensch atmet täglich 20 l Argon ein und aus. Auch in Quellwasser ist gelöstes Argon zu finden, besonders dann, wenn die Quellen aus größerer Tiefe stammen, wie z.B. aus Geysire.

Helium kommt am häufigsten in Erdgasen in Konzentrationen bis zu 7,5 Volumen-% vor. Die größten Vorkommen befinden sich in den USA und der ehemaligen UdSSR. Der Anteil in der oberen Erdkruste einschließlich der Weltmeere und Atmosphäre wird auf $4,2 \cdot 10^{-7}$ % geschätzt und ist damit seltener als Gold, Silber und Platin.

Neon gehört ebenfalls zu den seltenen Elementen mit einem geschätzten Anteil von $5 \cdot 10^{-7}$ %. Im Weltraum allerdings ist Neon nach Wasserstoff und Helium das dritthäufigste Element.

Krypton ist in der Luft zu 0,000108 % enthalten. Der Anteil an der oberen Erdkruste einschließlich Luft- und Wasserhülle wird auf nur $1,9 \cdot 10^{-8}$ % geschätzt und gehört ebenfalls zu den seltensten Elementen.

Xenon wird anteilig an der oberen Erdkruste einschließlich Luft- und Wasserhülle auf etwa $2,4 \cdot 10^{-9}$ % geschätzt und der volumenmäßige Anteil an der Luft ist mit 0,0000086 % = 86 ppb¹ nur äußerst gering.

Stickstoff, Sauerstoff, Kohlendioxid, Wasserstoff und dazu die Edelgase Argon, Helium, Krypton und Xenon bilden als Gasgemisch in dem unteren Bereich der Atmosphäre unsere Luft.

¹ppb = parts per billion

Luft ist für uns allgegenwärtig, umhüllt alles Leben auf Schritt und Tritt vom Anfang bis zum Ende. Holen wir tief Luft für neue, spektakuläre oder lebenswichtige Ziele. Es steckt viel drin in diesem Medium Luft.

1.2 Luftgeschichte

Schon der vorgeschichtliche Mensch bediente sich der Luft als Hilfsmittel zum Antrieb für Windmühlen oder Segelboote. Die Römer nutzten Warmluftsysteme zum Heizen ihrer Villen und Paläste.

Archimedes entdeckte 210 Jahre v.Chr., daß ein Körper um so leichter wird, je mehr Flüssigkeit oder Gas bzw. Luft dieser Körper verdrängt.

Jahrhunderte vergingen ohne nennenswerte bekannte Fortschritte zu den Gasen in der Naturwissenschaft. Noch bis zum 17. Jh. hielt man die Luft für einen einheitlichen Stoff.

Kohlendioxid wurde von J.B. van Helmont (1577-1644) als Verbrennungs- und Gährungsprodukt entdeckt. Kohlendioxid kommt in vulkanischen Gasen und vielen Mineralien vor und gelangt durch Verbrennung von Karbonaten² oder auch Atmung von Menschen und Tieren in die Luft.

Evangelista Torricelli (1608-1647) erst erkannte, daß das Gewicht der Luft gegen die Erdoberfläche drückt. Torricelli gelang im Jahre 1644 zum ersten Male die Messung des Luftdruckes. Torricelli füllte eine dünne 1 m lange Röhre mit Quecksilber und stellte diese Röhre, mit der Öffnung nach unten, senkrecht in eine mit Quecksilber gefüllte, offene Schale. Die Quecksilbersäule in der Röhre reduzierte sich von 1000 mm auf 760 mm.

²Salz der Kohlensäure

1.0 Luft

Otto von Guericke (1602-1686) pumpte aus zwei Halbkugeln die Luft heraus. Selbst 24 Pferde vermochten nicht die luftleeren Halbkugeln zu trennen.

Guericke konstruierte auch das erste Manometer. Eine Kupferkugel wurde leergepumpt. Die Gewichts­differenz der luftgefüllten und luftleeren Kupferkugel entsprach dem Gewicht der Luft.

Edme Mariotte (1620-1684) führte unabhängig von Robert Boyle die gleichen Experimente mit eingeschlossenem Gasvolumen aus und fand die gleichen Zusammenhänge. Die Nachwelt hat daraus das Boyle-Mariottesche Gesetz abgeleitet:

Das Gasvolumen ist dem Druck umgekehrt proportional

Blaise Pascal (1623-1662) führte den Beweis für die Richtigkeit der Torricelli-Erklärung. Am 19. September 1648 wurde beim Aufstieg zum 1465 m hohen Puy de Dome ein Barometer mitgeführt. Der dabei gemessene Niveauunterschied von 85 mmWS³ lieferte den endgültigen Beweis für das Vorhandensein der Luft.

Robert Boyle (1627-1691) verwendete ein gebogenes Glasrohr, das an einem Ende verschlossen war. Das in diesem Glasrohr eingeschlossene Luftvolumen wurde dem Druck einer Quecksilbersäule mit veränderlicher Höhe ausgesetzt. Auf diese Weise wurde der Zusammenhang zwischen Volumen und Druck einer begrenzten Luftmenge festgestellt. Die einfache Gesetzmäßigkeit besteht darin, daß das Produkt aus dem Volumen einer eingeschlossenen Gasmenge mit dem Druck multipliziert immer gleich bleibt.

Gabriel D. Fahrenheit (1686-1736) fertigte das erste Quecksilberthermometer, das in der englisch sprechenden Welt bis heute mit dem Gefrierpunkt bei 32 °F und dem Siedepunkt bei 212 °F gültig ist.

Anders Celsius (1701-1744) schlug in den "Akten der Königlichen Schwedischen Akademie" die Einführung der 100°-Temperaturskala vor.

Henry Cavendish (1731-1810) entdeckte den Wasserstoff bei der Auflösung von Metallen in Säure und erkannte auch, daß aus der Verbrennung von Wasserstoff Wasser hervorgeht. Lavoisier fand im Jahr 1783 heraus, daß aus heißem Eisen und Wasserdampf Eisenoxid und Was

³mmWS = Millimeter Wassersäule

serstoff entstehen. Er benannte das Element Hydrogene⁴, woraus der deutsche Name Wasserstoff abgeleitet wurde.

Stickstoff wurde wegen seiner Reaktionsträgheit ziemlich spät als Element erkannt. K.W. Scheele zeigte in seiner "Abhandlung von der Luft und dem Feuer", daß die Luft einen Bestandteil enthält, die Atmung und Verbrennung nicht zuläßt. Er nannte diesen Bestandteil "verdorbene Luft".

Antoine Lavoisier (1743-1794) bestimmte dieses Element, das keine Verbrennung und kein Leben erhalten kann und nannte es Azot. J.A.C. Chaptal führte für dieses Element die Bezeichnung Nitrogenium ein. Die großtechnische Verwendung des Luftstickstoffes erfolgte erst im 20. Jh.

K.W. Scheele (1742-1786) gewann erstmals Sauerstoff durch Erhitzen von Silbercarbonat und Quecksilberoxid und nannte es Feuergas im Gegensatz zum Stickgas. Lavoisier soll ihm den Namen Oxygenium gegeben haben, nachdem er die richtige Deutung der Verbrennungsvorgänge erkannte. Sauerstoff wird von Pflanzen durch Assimilierung⁵ von Kohlendioxyd abgegeben. Durch Luftverschmutzung wird die Sonneneinstrahlung, als Voraussetzung der Assimilation, erheblich geschwächt. Durch Entwaldung der Erdoberfläche wurde die Sauerstoffproduktion bereits auf zwei Drittel der früheren Werte gesenkt.

John Dalton (1776-1844) stellte die Theorie auf, daß jedes Element sich aus einzelnen Atomen zusammensetzt und daß sich immer ein oder mehrere Atome des einen Elements mit einem oder mehreren Atomen eines anderen verbindet.

Joseph Gay-Lussac (1778-1850) übertrug Daltons Theorie der Atome auf die Chemie der Gase und formulierte das allgemeine Gasgesetz als Kombination der Gesetze von Boyle-Mariotte und Celsius. Die Zusammenhänge zwischen Druck, Temperatur und Volumen einer eingeschlossenen Gasmenge waren definiert.

$$\frac{p^*V}{T} = const$$

Formel 1.2.1

⁴griech.: hydro = Wasser

⁵Synthese organischer Verbindung aus Kohlendioxid und Wasser mit Lichtenergie

1.0 Luft

Lord Kelvin (1824-1907) gelang es, die objektive Temperatur vom subjektiven Wärmeempfinden zu abstrahieren und schaffte damit die technisch richtige Skaleneinteilung, die beim absoluten Nullpunkt beginnt.

Die Existenz von Argon bzw. anderen Edelgasen vermutete Cavendish, als stets ein reaktionsträger Rest verblieb, wenn er die Bestandteile der Luft in chemische Bindungen überführte. Argon wurde 1894 von den Engländern Ramsay und Rayleigh als Bestandteil der atmosphärischen Luft entdeckt, nachdem ihnen der Dichteunterschied zwischen dem für reinen Stickstoff gehaltenen, nach der Entfernung des Sauerstoffs aus der Luft verbliebenen Restgas und dem durch Zersetzung von chemisch reinem Stickstoff aufgefallen war.

Das Edelgas Helium wurde 1868 von P. Jansen in der Sonnenatmosphäre entdeckt, 1882 fand es Palmieri bei der Spektralanalyse von Vesuv-Lava. Ramsay vermochte dann 1895 das Helium in größeren Mengen rein aus dem Mineral Cleveit herzustellen. Später wurde Helium auch in der Luft von Kayser nachgewiesen.

1897 wurde Neon aufgrund seines scharlachroten Spektrallichtes von Ramsay entdeckt und Neon⁶ genannt. Die natürlichen Neon-Isotope wurden bereits 1912 im Massenspektroskop von Thomson aufgefunden.

Krypton wurde von Ramsay im Jahre 1898 erstmals aus der Luft unter Benutzung des Lindeschen Luftverflüssigungsverfahrens hergestellt.

Wiederum Ramsay entdeckte und gewann Xenon im Jahre 1898 bei der genaueren Untersuchung des aus der Luft gewonnenen Rohargons und gab diesem Element den Namen Xenon⁷.

⁶griech.: neos = neu

⁷griech.: xenos = Gast, Fremder

1.3 Luftbestandteile

Atmosphärische Luft setzt sich zusammen aus den unterschiedlichsten Gasen. Die Zusammensetzung ändert sich an der Erdoberfläche örtlich und zeitlich nur sehr wenig, während in großen Höhen die leichten Gase überwiegen.

Nicht nur die unterschiedlichsten Gase bestimmen die Zusammensetzung der Luft sondern auch die in der Luft enthaltenen differenzierten Bestandteile in flüssiger oder fester Form. Chemisch gesehen ist Luft ein Gemisch verschiedener permanenter Gase unter denen Stickstoff, Sauerstoff, Argon und Kohlendioxid überwiegen.

Bestandteile der Luft

Gase	Volumen-%	Gewichts-%
Stickstoff	78,3	75,47
Sauerstoff	20,99	23,2
Kohlendioxid	0,03	0,046
Wasserstoff	0,01	0,001
Argon	0,933	1,286

Helium	0,0005	0,00007
Neon	0,0018	0,0012
Krypton	0,0001	0,0003
Xenon	0,00001	0,00004

Tabelle 1.3.1

Außer den permanenten Gasen ist in der Luft noch zusätzlich Wasserdampf in wechselnden Mengen vorhanden.

1.3.1 Stickstoff N₂

Stickstoff⁸ ist ein indifferentes Gas, farblos, unbrennbar, ungiftig, geruchlos und wirkt erstickend. Im elementaren Zustand bildet Stickstoff sehr stabile, zweiatomige Moleküle. Stickstoff ist sehr reaktionsträge und wird als Verdünnungsmittel für Sauerstoff eingesetzt. Erstickung in stickstoffreichen Gasgemischen ist eine Folge von Sauerstoffmangel, nicht etwa eine Giftwirkung des Stickstoffes. Stickstoff ist ein unentbehrlicher Nährstoff, er bildet immerhin etwa 3 % des Körpergewichtes des Menschen.

Die technische Gewinnung von Stickstoff erfolgt durch Luftzerlegung, d.h. durch Fraktionierung von flüssiger Luft und gelangt in Stahlflaschen⁹ unter einem Druck von ca. 200 bar in den Handel.

Elementarer Stickstoff besitzt aufgrund seiner Reaktionsträgheit technische Bedeutung als Inert- oder Schutzgas, als Treibmittel für Sprays, zum Verdünnen leichtentzündlicher Gase. 85 % der Stickstoffproduktion wird in der Düngemittelindustrie eingesetzt.

1.3.2 Sauerstoff O₂

⁸Nitrogenium

⁹Anstrich: grün, Rechtsgewinde

Sauerstoff¹⁰ ist ein farbloses, brandförderndes, geruchloses Gas und in molekularer Form außerordentlich reaktionsfähig, verbindet sich mit fast allen Elementen und ist daher biologisch bedeutsam. Sauerstoff ist ein wichtiger Nährstoff. Für die überwältigende Mehrzahl der Organismen ist Sauerstoff lebensnotwendig. Nur wenige Bakterienarten¹¹ gedeihen ganz ohne Sauerstoff.

Der erwachsene Mensch verbraucht täglich etwa 900 g Sauerstoff aus der Luft. Zusätzlich müssen 225 g in chemisch gebundener Form mit der Nahrung aufgenommen werden. Der Mensch kann sauerstoffarme Gemische mit 8 - 9 % Sauerstoff gerade noch in seiner Lunge verwerten, die Einatmung von Gasgemischen mit nur 7 % Sauerstoff verursacht nach einiger Zeit Bewußtlosigkeit und ein noch geringerer Anteil führt mit Sicherheit zur Erstickung.

In der Industrie wird Sauerstoff vorwiegend aus flüssiger Luft durch fraktionierte Destillation und Kondensation gewonnen und kommt in Stahlflaschen¹² mit 200 bar in den Handel.

Sauerstoff wird in Verbrennungs- und Oxidationsprozessen vielfach anstelle von Luft eingesetzt, in der Metallurgie und Metallbearbeitung verwendet sowie zum autogenen Schweißen und Schneiden. In der chemischen Industrie dient Sauerstoff zur Herstellung von Schwefel und Schwefelsäure.

1.3.3 Kohlendioxid CO₂

Kohlendioxid ist farblos, unbrennbar, mit schwach säuerlichem Geruch, wirkt erstickend und ist schwerer als Luft. Bei der Entspannung bis unter die Sublimationstemperatur¹³ entsteht durch Abkühlung Trockeneis. Kohlendioxid ist nicht im eigentlichen Sinne giftig (MAK 9000 mg/m³). Der Mensch atmet bei einem Kohlendioxidgehalt von 3 % je Minute 6,5 l ein. Im Körper kreisen stets verhältnismäßig große Mengen Kohlendioxid, von denen täglich über 700 g (mehr als 350 l) ausgeatmet

¹⁰Oxygenium

¹¹Anaerobier, siehe Abs. 1.6.2

¹²Anstrich: blau, Rechtsgewinde

¹³Übergang vom festen in den gasförmigen Zustand

1.0 Luft

werden, doch kann Kohlendioxid in größeren Mengen durch Verdrängung des Sauerstoffs erstickend wirken.

Bei vielen industriellen Prozessen bilden sich große Mengen von Kohlensäure, ebenso in den Abgasen der Brennstoffe, beim Kalkbrennen, in Gärkellern der Brauereien und aus Verbrennungsgas von Generatoren.

Kohlendioxid findet Verwendung in der Getränke- und Kälteindustrie, in Feuerlöschgeräten, als Inertgas bei chemischen Prozessen, zur Herstellung von Düngemitteln sowie zur Soda-Produktion.

1.3.4 Wasserstoff H₂

Wasserstoff¹⁴ ist farblos, brennbar, ungiftig, geruchlos und sehr viel leichter als Luft. Wasserstoff bildet zusammen mit Chlor oder Sauerstoff sehr brennbare, explosive Gemische¹⁵. Wasserstoff verbrennt mit kaum sichtbarer schwach bläulicher Flamme zu Wasserdampf¹⁶. Bei hohen Ausströmgeschwindigkeiten ist eine Gefahr der Selbstentzündung vorhanden.

Wasserstoff ist biologisch außerordentlich wichtig. Weitaus die meiste Muskelenergie, die von Organismen entwickelt wird, stammt aus einer stufenweisen Oxidation des an C-Ketten gebundenen Wasserstoffs, der im menschlichen Organismus einen Anteil von 10 % des Körpergewichtes ausmacht.

Wasserstoff wird durch katalytische Dampfspaltung von Erdgas gewonnen und als Nebenprodukt von petrochemischen Prozessen in Raffinerien und Kokereien. Wasserstoff kommt in Stahlflaschen¹⁷ in den Handel bei einem Druck von 200 bar.

In Deutschland werden jährlich rd. 19,1 Mrd. m³ Wasserstoff verbraucht. Davon 33,5 % als chemischer Rohstoff für Ammoniak sowie Methanol und in der Metallurgie, 47,5 % wurden als Heizgas für indu

¹⁴Hydrogenium

¹⁵Knallgas

¹⁶2H₂ + O₂ → 2H₂O

¹⁷Anstrich: rot, Linksgewinde

strielle Prozesse und 19,0 % in der Mineralölindustrie und für synthetische Brennstoffe verwendet. Weltweit dagegen liegt der Wasserstoffverbrauch bei rd. 500 Mrd. m³/Jahr.

1.4 Edelgase

Edelgase gehen keine Verbindungen ein bzw. nur äußerst selten, im Gegensatz zu anderen Gasen.

1.4.1 Argon Ar

Argon¹⁸ ist ein gasförmiges, einatomiges, nullwertiges, chemisches Element aus der Gruppe der Edelgase. Bisher sind keine echten Edelgasverbindungen von Argon bekannt. Argon ist schwerer als Luft und

¹⁸griech: argos = untätig

wirkt erstickend. Das Gas ist farblos, geruchlos und ungiftig. Bei geschlossenen Räumen wird die Atemluft verdrängt. Warnsymptome sind nicht erkennbar.

Argon findet Verwendung wegen seiner geringen Wärmeleitfähigkeit und chemischen Trägheit in Mischung mit 10 - 20 % Stickstoff zur Füllung von Glühlampen, im Gemisch mit anderen Edelgasen zur Füllung von Entladungsröhren, um bestimmte Farbeffekte zu erzielen. Argon wird u. a. auch als Schutzgas beim Elektroschweißen von Stahl eingesetzt.

1.4.2 Helium He

Helium¹⁹ ist ein einatomiges Gas, leichter als Luft, farblos, unbrennbar, geruchlos und ungiftig. Helium ist nullwertig und es sind keine chemischen Verbindungen von ihm bekannt.

Helium wird aus heliumhaltigen Erdgasen gewonnen. Dies erfolgt durch Abkühlen des Gases unter partieller Kondensation der schweren Fraktionen und Grob- und Feinreinigung des Gases. Die Gewinnung aus der Luft durch Luftzerlegung wird nur in erdgasarmen Gebieten betrieben. Das stark komprimierte, etwa 99 %ige Helium kommt gasförmig in Stahlflaschen und verflüssigt in Tankcontainern in den Umlauf.

Helium wird in der Pulvermetallurgie als Schutzgas zur Vermeidung von Oxid- und Nitridbildung und auch bei der Fertigung von Halbleitern bzw. elektronischen Bauelementen eingesetzt. In der Kältetechnik lassen sich mit Hilfe von flüssigem Helium Temperaturen erreichen, die nur noch wenige tausendstel Grad vom absoluten Nullpunkt entfernt sind.

1.4.3 Neon Ne

¹⁹griech: helios = Sonne

Neon²⁰ ist leichter als Luft. Das Gas ist farblos, geruchlos und ungiftig. Neon wirkt erstickend. Bei der Glimmentladung zeigt das äußerst reaktionsträge, nullwertige Edelgas eine typisch scharlachrote Färbung.

Neon findet als Füllgas für Leuchtröhren, Blitz- und Stroboskoplampen Anwendung. Flüssiges Neon hat ein etwa 40-fach höheres Kühlvermögen je Volumeneinheit als flüssiges Helium und etwa das 3-fache von flüssigem Wasserstoff.

1.4.4 Krypton Kr

Krypton²¹ ist schwerer als Luft. Das Gas ist farblos, geruchlos und ungiftig. Krypton wirkt erstickend. Die Gewinnung erfolgt als Nebenprodukt der Sauerstoffherstellung durch fraktionierte Ad- und Desorption an Aktivkohle.

Krypton findet seine technische Hauptanwendung in der Glühlampenindustrie. Aus 1 Mio. l Luft erhält man etwa 1 l Krypton, das zur Füllung von 15 Lampen reicht. Ferner ist Krypton ein Füllgas für Geigerzähler.

1.4.5 Xenon Xe

Xenon²² ist ein gasförmiges, einatomiges Element und schwerer als Luft. Das Edelgas ist farblos und ungiftig. Xenon wirkt erstickend und als Gemisch mit Sauerstoff narkotisierend. Früher galt Xenon als nullwertiges, inertes Edelgas, doch kennt man heute auch echte Edelgasverbindungen, in denen es in unterschiedlichen Oxidationsstufen auftritt.

Zusammen mit Krypton wird Xenon aus Luft gewonnen, wobei mehr als 10 Mio. m³ Luft zerlegt werden müssen, damit 1 m³ Xenon erhalten wird.

²⁰griech: neos = neu

²¹griech: kryptos = verborgen

²²griech: xenos = Gast, Fremder

1.0 Luft

Den zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten von Xenon steht sein hoher Preis entgegen. Beispielsweise wäre ein Gemisch aus Xenon und 20 % Sauerstoff als Narkotikum bei Operationen verwendbar. Glühlampen mit einer Krypton/Xenon-Füllung können gegenüber den Lampen mit Argonfüllung höher beheizt werden, was eine bessere Ausbeutung an weißem Licht ermöglicht.

1.5 Stoffwerte

Luft setzt sich als ein Gemisch aus den verschiedensten Gasen zusammen. In der Tabelle 1.5.1 sind die Gase mit den wichtigsten Stoffwerten im Vergleich zur Luft aufgeführt.

Stoffwerte verschiedener Gase

Gas	Mol _v	ρ	$\frac{\rho}{\rho_{\text{Luft}}}$	v	R	x
-----	------------------	--------	-----------------------------------	---	---	---

	kg	kg		m ³	m _{kp}	c _p
	kmol	m ³		kg	kg*K	c _v
Luft	28,96	1,293	1,0	0,773	29,27	1,4
Stickstoff	28,02	1,25	0,967	0,8	30,26	1,425
Sauerstoff	32,0	1,429	1,105	0,7	26,5	1,4
Kohlendioxid	44,01	1,977	1,529	0,506	19,27	1,3
Wasserstoff	2,02	0,09	0,07	11,127	420,58	1,415
Argon	39,94	1,784	1,378	0,561	21,23	1,665
Helium	4,0	0,179	0,138	5,602	211,81	1,665
Neon	20,18	0,9	0,696	1,111	41,99	
Krypton	83,8	3,74	2,9	0,344	10,09	
Xenon	131,3	5,9	4,56	0,169	6,42	

Tabelle 1.5.1

1.6 Luftbeimengungen

Atmosphärische Luft ist, abhängig von Gegend, Klima und Jahreszeit mehr oder weniger mit Beimengungen belastet. Die wichtigsten gasförmigen Beimengungen sind:

- Ozon O₃, bildet sich aus Luftsauerstoff unter Einwirkung elektrischer Entladung bzw. bei Verdunstung. Ozon hat einen eigenen

1.0 Luft

tümlichen Geruch und ist in hoher Konzentration giftig. Anteile in der Luft etwa 0,02 - 0,1 mg/m³.

- Kohlenoxid CO, sehr giftiges geruchloses Gas, zersetzt die roten Blutkörperchen, entsteht bei unvollkommener Verbrennung und ist enthalten in Auspuffgasen sowie Tabakrauch. Stadt- und Industriegebiete sind belastet mit CO-Anteilen im Durchschnitt von etwa 40 - 500 mg/m³.
- Schwefeldioxid SO₂, entsteht bei Verbrennung von Kohle und Heizöl und wirkt sich in größeren Konzentrationen auf alles Leben negativ aus. Anteile in der Luft ca. 0,1 - 5 mg/m³.

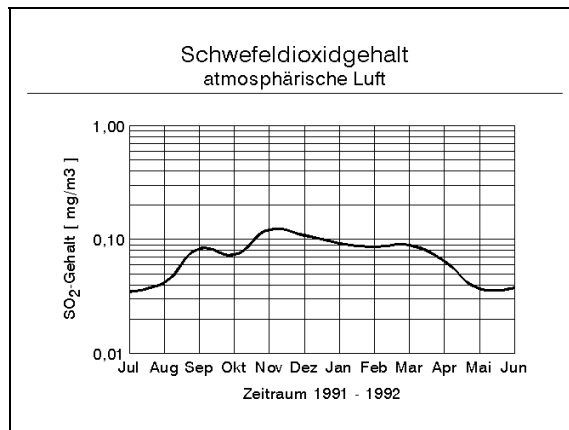


Diagramm 1.6.1

- Ammoniak NH₃, stechend riechendes Gas aus Kohlen- und Fäulnisgasen. Ammoniak ist in freier Luft enthalten mit einem Anteil von etwa 0,02 - 0,05 mg/m³.

In Wohnbereichen sind außer Heiz- und Schwelgase nur wenig Beimengungen in der Luft, im Gegensatz zu Industriebereichen, in denen erhebliche Konzentrationen gasförmiger Verunreinigungen in der Luft enthalten sind.

1.6.1 Feststoffe

Staub in der Luft ist verteilter Feststoff beliebiger Art, Form, Struktur und Dichte, der nach Teilchengröße unterteilt wird. Staub folgt bei der Bewegung in der Luft nicht den Fallgesetzen sondern setzt sich langsam in der ruhenden Luft ab.

- Ruß ist geflockter Kohlenstaub, der bei unvollkommener Verbrennung entsteht und wirkt korrosiv, Größe 2 - 6 Mikron
- Aerosole sind feste oder flüssige Stoffe in feinsten Verteilung im Gas, Größe 0,01 - 0,1 Mikron
- Dunst kann als Anhäufung feinsten Teilchen in der Luft bis zur Sichtbehinderung führen
- Nebel entsteht durch fein verteilte Wassertropfen in der Luft, Größe 1 - 50 Mikron

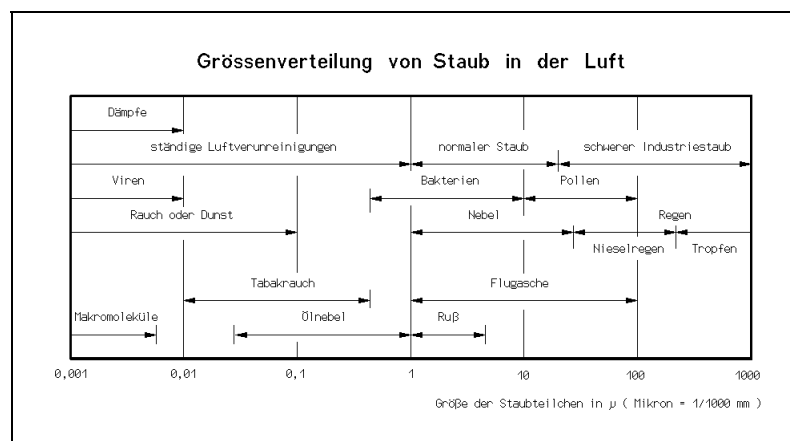


Diagramm 1.6.1.1

Dies sind nur die wichtigsten Arten der Feststoffpartikel in der Luft, die von größerer Bedeutung sind.

Staub setzt sich aus organischen Bestandteilen wie Samen, Pollen, Textilfaser oder auch Mehl zusammen sowie aus anorganischen Bestandteilen wie Sand, Ruß, Asche, Kalk und Steinstäube.

Staub entsteht auf natürliche Weise durch Verwitterung und Zerfall, Fäulnis und Brände oder durch menschliche Tätigkeiten, wie sie täglich praktiziert werden. Insbesondere auch im Straßen- und Eisenbahnverkehr oder bei Arbeitsprozessen in Zementwerken bzw. in der chemischen Industrie sowie im Bergbau, um nur einige Beispiele anzuführen.

1.0 Luft

Die Konzentration der in der Luft enthaltenen Staubanteile ist stark abhängig von den Wetterbedingungen wie Wind und Regen sowie den Tages- und Jahreszeiten und natürlich auch von den unterschiedlichsten Regionen.

Mittlerer Staubgehalt der Luft

Gebiet	mittl. Konzentration mg/m ³	häufigste Korngröße µm	größtes Korn µm
Landgegend			
bei Regen	0,05	0,8	4
bei Trockenheit	0,15	2	25
Großstadtgebiet			
Wohnbereich	0,40	7	60
Industriebereich	0,75	20	100
Industriegebiete	3	60	1000
Werkstätten	1 - 10	-	-
Gußputzerei	50 - 100	-	-
Zementfabrik	100 - 200	-	-
Abgase Feuerungen	1000 - 15000	-	-

Tabelle 1.6.1.1

Die obere zumutbare Grenze für Staubniederschlag ist festgelegt

- im Kurgebiet 2 - 10 g/m² und Monat
- im allgemeinen 10 - 15 g/m² und Monat
- im Industriegebiet 20 - 30 g/m² und Monat

Bei Prüfungen der Staubverteilung in senkrechter Richtung wurde für Ballungszonen herausgefunden, daß eine erste Staubschicht etwa 3 - 4 m über der Erdoberfläche als Verkehrsstaub und eine zweite Schicht darüber liegt, in der dann allerdings hauptsächlich Heizungsstaub enthalten ist. Der normal in der Luft enthaltene Staub bedeutet außer einer gewissen Beeinträchtigung der Atmung keine gesundheitli

che Schädigung, da die Schleimhäute in den Atemwegen wie ein Filter wirken.

Korngrößen von Staub im Industriebereich

Größenbereich	mittlere Größe	Anzahl je m ³	Anteil Gew. / Vol.
µm	µm	in 1000	%
10 - 30	20	50	28
5 - 10	7,5	1750	52
3 - 5	4	2500	11
1 - 3	2	10700	6
0,5 - 1	0,75	67000	2
0 - 0,5	0,25	910000	1

Tabelle 1.6.1.2

Staub aus Produktionsbereichen dagegen ist für lebende Organismen unter Umständen nachteilig oder gefährlich²³ und erfordert eine gezielte, wirksame Reduzierung der Staubbelastung zum Schutz des ungestörten Lebens. Gefährlicher Staub beeinträchtigt die Atmung, löst allergische Reaktionen aus, verringert die Sonnenstrahlung und schädigt in Verbindung mit Feuchtigkeit im Laufe der Zeit nicht nur erhaltenswerte Bauwerke aus Sandstein sondern auch andere Bausubstanzen.

1.6.2 Keime, Viren, Bakterien

Zu den Festkörperpartikeln zählen auch die Bakterien sowie die in Bakterienkulturen anzutreffenden Bakteriophagen²⁴ und schließlich die Viren. Alle diese Keime können entweder für sich als Schwebstoffe in der Druckluft vorhanden sein oder aber an festen bzw. flüssigen Partikeln haften. In der Regel haften Keime an Staubteilchen.

²³Staublunge

²⁴bakterienvernichtende Viren

1.0 Luft

Eine Zunahme der Staubteile bringt eine Anreicherung der Keime mit sich. Im Mittel wurde eine Anreicherung der Keime festgestellt bis zu $10.000/m^3$ im Bereich von Verkehrsstraßen.

Keime sind Kleinlebewesen pflanzlicher oder tierischer Herkunft wie Mikroben, Bakterien und Mikroorganismen in Kugel-, Zylinder-, Spiral- und Fadenform, die sich durch Teilung außerordentlich schnell vermehren. Manche dieser Keime sind gefährliche Krankheitserreger, andere wiederum bewirken Fäulnis oder Gärung.

Krankheitserregend ist nur ein sehr geringer Teil der Keime. Die meisten Keime gehen beim Eintrocknen sehr schnell zugrunde und eine Krankheitsübertragung durch die Luft ist daher verhältnismäßig selten. Eine Krankheitsübertragung erfolgt fast nur durch Tröpfchen, die beim Husten oder Niesen in der Luft fein verteilt werden.

Bakteriophagen und Viren, beide etwa von gleicher Größe, haben nur einen Durchmesser von etwa $0,003 - 0,3 \mu m$, sind also bis zu 100 mal kleiner als Bakterien. Zu den kleinsten Viren zählt das Maul- und Klauenenseuchenvirus, zu den größten das Pockenvirus.

Während die Bakteriophagen als Parasiten in Bakterienkulturen anzutreffen sind und dort die Bakterien sozusagen auffressen, stellen die Viren in der Regel Krankheitserreger mehr oder weniger bösartigen Charakters dar. Viren erzeugen im menschlichen Körper Krankheiten wie Grippe oder Masern.

Bakterien dagegen sind die Ursache vieler Infektionskrankheiten wie Diphtherie, Tuberkulose oder Cholera. Bakterien im weiteren Sinne haben etwa eine Größe von etwa $0,2 - 30 \mu m$.

Zu den Bakterien gehören die Aktinomyzeten²⁵, dann die im engeren Sinne durch ihre Zweiteilung bekannten Bakterien, ferner die sporenbildenden Bazillen, die kugelförmigen Kokken sowie die schraubenförmigen Spirillen und Spirochäten und schließlich die kommaförmigen Vibrionen, die sich durch Geißeln fortbewegen und zu denen auch die Choleraerreger zählen.

Bakterien sind allgegenwärtig, müssen aber von bestimmten Produkten unbedingt ferngehalten werden. Außerdem dürfen Krankheitserreger etwa bei der Herstellung von Impfstoffen nicht in die Atemluft geraten.

²⁵Strahlenpilze

Alle diese Keime sind gegen Kälte und Trockenheit sehr unempfindlich. Nur Wärme, schon im Bereich des Siedepunktes, können sie nicht vertragen. Bakterien vermehren sich, wenn zugleich genügend Nahrung vorhanden ist, besonders schnell bei Feuchtigkeit. Die Anaerobier²⁶ jedoch nur dann, wenn kein Sauerstoff zugegen ist. Viren vermehren sich in der Regel nur im Wirtskörper.

1.6.3 Kondensationskerne

Kleine, in der Luft enthaltene Teilchen mit einem Durchmesser von ca. 0,1 nm²⁷ - 1 µm, an denen sich Wasserdampf bei Übersättigung anlagert, werden als Kondensationskerne bezeichnet.

Kondensationskerne gehorchen infolge ihrer geringen Größe nicht mehr dem Stokes'schen Fallgesetz. Man faßt sie auf als in Luft gelöste Körper und bezeichnet das Ganze als ein kolloidales²⁸ System. Die Entstehung der Kondensationskerne beruht nicht auf einer mechanischen Zerkleinerung sondern wird durch chemische oder physikalische Vorgänge bewirkt.

Rauch und Nebel sind solche kolloidale Systeme, wobei Rauch die Verteilung fester Teilchen und Nebel die Verteilung flüssiger Teilchen in der Luft ist.

Kondensationskerne, die entweder positiv oder negativ geladen sind, werden als Ionen bezeichnet. Die Zahl der Kerne ist stark veränderlich von 0 - $4 \cdot 10^2$ Kerne je m³.

²⁶ ohne Sauerstoff lebensfähige Bakterien

²⁷ Nanometer

²⁸ teilbares

1.7 Luftfeuchte

Feuchtigkeit in der Luft ist für alles Leben notwendig. Die Wasseroberflächen der Bäche, Flüsse, Seen und Meere verdunsten und mischen sich im gasförmigen Zustand mit der Luft.

Durch Verdunsten kann Feuchtigkeit daher auch als fein verteilte Tröpfchen unterschiedlicher Größe in der Luft schweben. Diese Tröpfchen bilden dann einen stärkeren oder schwächeren Nebel.

Derartige Schwebetröpfchen entstehen einmal beim Kondensieren des Flüssigkeitsdampfes und zum anderen, wenn sie vom Luftstrom aus einem vorhandenen Flüssigkeitsverband herausgerissen werden oder sich aus einer strömenden Flüssigkeit lösen.

Treten Flüssigkeiten in Form von Schwebetröpfchen auf, so werden diese als Flüssigaerosol definiert.

Je nach Tröpfchengröße wird eine Unterteilung durchgeführt in:

- | | | |
|-----------------------------------|-----|----------------------------|
| - Sprühnebel mit Tröpfchen | von | 100 μm und mehr |
| - feinem Sprühregen mit Tröpfchen | von | 10 μm und mehr |
| - Nebel mit Tröpfchen | von | 1 - 10 μm |
| - Dunst mit Tröpfchen | von | 0,1 - 1 μm |

Tröpfchen unter 1 μm Größe zählen zu den Schwebestoffen. Sie können harmloser, aber auch gefährlicher Natur sein wie Säurenebel oder Benzindunst oder einfach nur lästig wirken, wie für wenige Nichtraucher der Tabakrauch, der aus mikroskopisch feinen Tröpfchen besteht.

Atmosphärische Luft enthält immer eine mehr oder weniger große Menge Feuchtigkeit in unsichtbarer, ungesättigter Dampfform, die einen bestimmten Dampfdruck ausübt.

Die Dampfmenge, die 1 m^3 Luft aufnehmen kann, ist begrenzt und nur von der Temperatur der Luft abhängig. Als gasförmiger Anteil vermischt sich dieser Wasserdampf mit der Luft. Bei hoher Lufttemperatur kann eine relativ große Dampfmenge bis zur Sättigung aufgenommen werden.

Jede Luftmenge von 1 kg enthält eine bestimmte Menge Wasser in Gramm. Dieser Wert x in g/kg ist die absolute Luftfeuchte oder auch Feuchtegrad und resultiert aus dem Verhältnis der aufgenommenen Wassermenge zur Masse der trockenen Luft.

Die Festlegung, welche Menge gasförmiger Wasserdampf in einem Kilogramm Luft enthalten ist und welche Menge davon bei der Abkühlung in Kondenswasser umgewandelt wird, wird bestimmt mit Hilfe der Formel 1.7.1. Für Luft und Dampf gilt mit:

$$R_L = 29,27 \text{ mkp/kg grad}$$

$$R_D = 47,1 \text{ mkp/kg grad}$$

$$x = 0,622 * \frac{p_D}{(p_D + p_L) - p_D}$$

Formel 1.7.1

Dabei ist p_D der bei einer definierten Temperatur herrschende Sättigungsdruck bezogen auf den barometrischen Druck $p_D + p_L$.

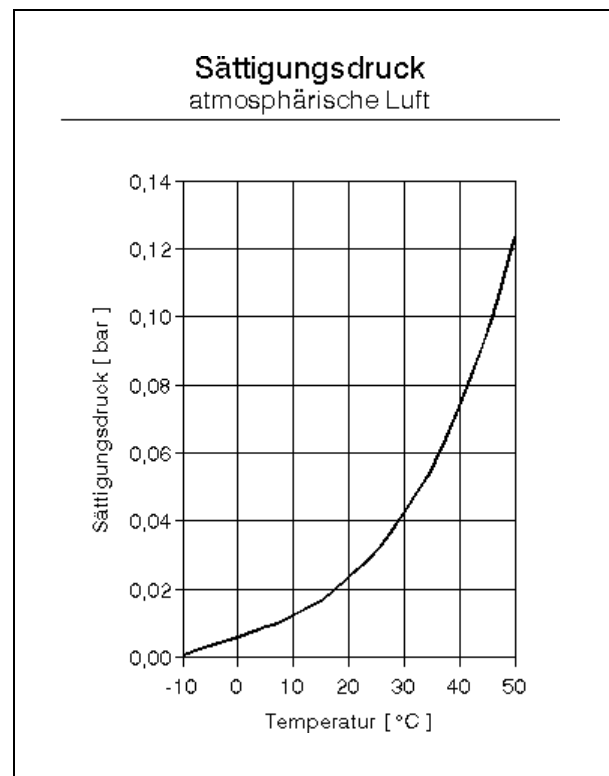


Diagramm 1.7.1

1.0 Luft

Luft mit der maximalen Konzentration der Wasserdampfmenge ist gesättigt. Enthält die Luft weniger Dampf, ist sie ungesättigt und kann weiterhin bis zur Sättigungsgrenze Wasserdampf aufnehmen.

Wenn in der Luft mehr Wasserdampf enthalten ist als dies dem Sättigungsgrad entspricht, fällt der überschüssige Dampf in Form von Wassernebel aus.

Die Temperatur, bei der eine Luftmenge mit Wasserdampf gesättigt ist, wird als Sättigungstemperatur bzw. Taupunkttemperatur bezeichnet.

Die Sättigungsmenge ist dann die Wassermenge, die bei gegebener Temperatur von der Luft maximal aufgenommen werden kann.

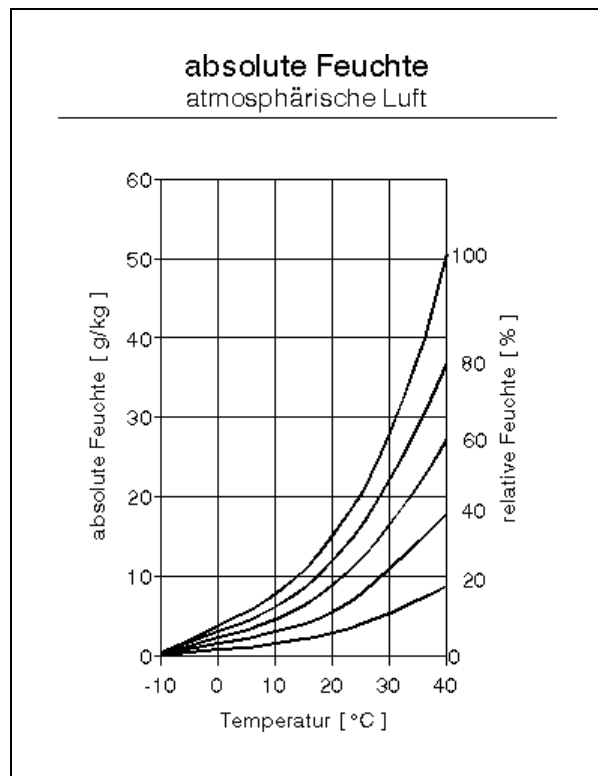


Diagramm 1.7.2

Die relative Feuchte ist das Verhältnis des Wasserdampfdruckes zum Sättigungsdruck und wird in Prozent ausgedrückt. Sind beide Drücke gleich groß, ist die Luft mit Feuchtigkeit gesättigt. Ist der Teildruck des Dampfes größer, verflüssigt sich der Dampf und bildet kleine Tröpfchen, die auskondensieren. Wird dagegen der Teildruck des Dampfes kleiner, ist die Luft mit Feuchtigkeit untersättigt.

Die maximale Wasserdampfmenge in Gramm, die von der Luft aufgenommen werden kann, ist nur von der Temperatur und vom Volumen abhängig, nicht aber vom Druck. Bei steigender Temperatur dehnt sich das Volumen aus, der Raum zwischen den Molekülen wird größer und die Luft kann mehr Wasserdampf aufnehmen.

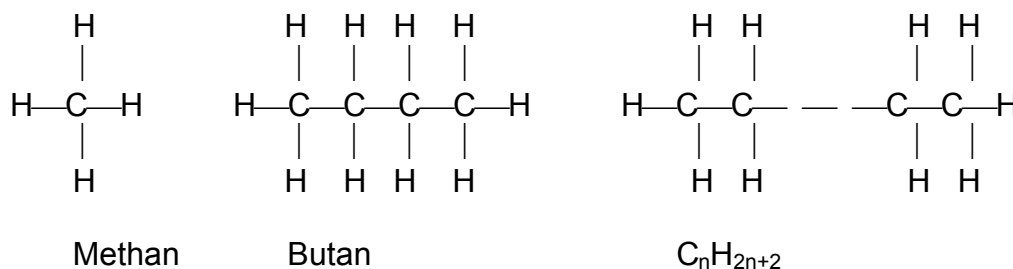
Absolute Feuchte gesättigter Luft in g/m³

°C	g/m ³	°C	g/m ³
1	5,15	26	24,38
2	5,52	27	25,78
3	5,92	28	27,22
4	6,35	29	28,77
5	6,80	30	30,36
6	7,28	31	32,02
7	7,77	32	33,78
8	8,29	33	35,64
9	8,84	34	37,57
10	9,40	35	39,60
11	9,99	36	41,72
12	10,65	37	43,91
13	11,35	38	46,20
14	12,07	39	48,62
15	12,82	40	51,14
16	13,63	41	53,76
17	14,48	42	56,49
18	15,37	43	59,35
19	16,32	44	62,34
20	17,29	45	65,44
21	18,31	46	68,63
22	19,38	47	71,92
23	20,53	48	75,40
24	21,74	49	79,08
25	23,04	50	82,98

Tabelle 1.7.1

1.8 Kohlenwasserstoffe

Kohlenstoff ist in allen organischen Verbindungen enthalten mit der Eigenschaft, daß die Kohlenstoffatome untereinander beliebig lange Ketten bilden. Sehr viele Verbindungen der organischen Chemie bestehen aus den Elementen Kohlenstoff und Wasserstoff und werden Kohlenwasserstoffe genannt. Ein Atom Kohlenstoff z.B. bindet vier Atome Wasserstoff zu CH_4 und ist damit gesättigt.



Die Verkettung der C-Atome in Verbindung mit H-Atome kann beliebig entsprechend der allgemeinen Formel der Alkane fortgesetzt werden. Die ersten Glieder dieser Reihe sind gasförmig, die mittleren im Bereich von C_5 - C_{16} , dagegen flüssig, die höheren fest.

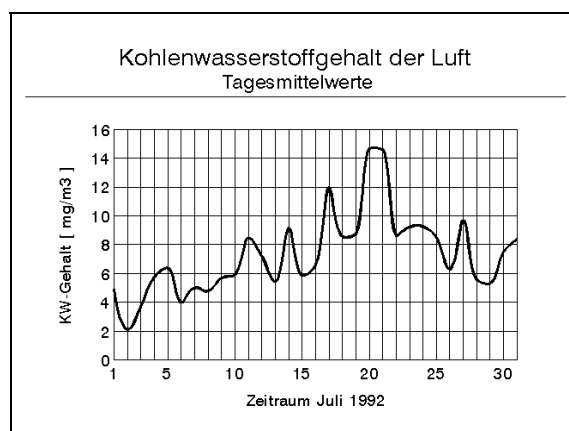


Diagramm 1.8.1

Gesättigte Kohlenwasserstoffe werden in erster Linie aus Erdöl gewonnen. Die Aufarbeitung des Rohöls erfolgt in Raffinerien. Hier wird das Rohöl durch Destillation in verschiedenen hoch siedende Fraktionen zerlegt und getrennt aufgefangen vom Leichtbenzin über Kerosin bis zum Schmieröl.

Diese Stoffe werden bei der Nutzung freigesetzt und an die Umgebung abgegeben. Im Diagramm 1.8.1 ist der Gesamtkohlenwasserstoffgehalt der atmosphärischen Luft am Beispiel einer deutschen Kleinstadt dargestellt.

Nicht nur der Personenkraftverkehr belastet die Luft mit Kohlenwasserstoffen. In der metallverarbeitenden Industrie z.B. werden Verbindungen auf Basis der Kohlenwasserstoffe als Schmier- und Kühlmittel eingesetzt.

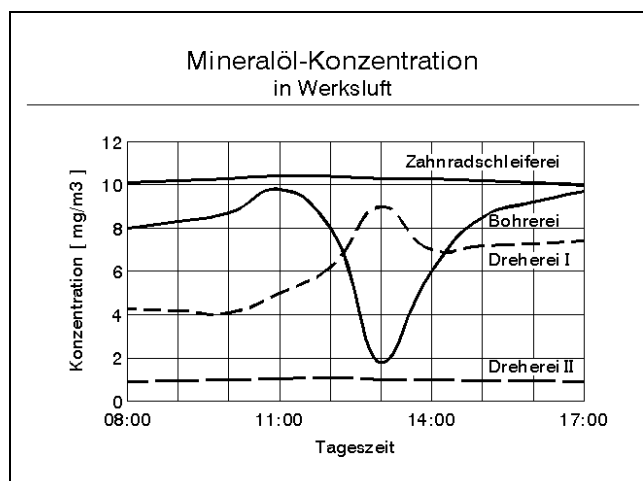


Diagramm 1.8.2

Die hohen Temperaturen bei der Zerspanung bewirken das Verdampfen der Kühlflüssigkeit und lösen die Kohlenwasserstoffe aus dem Verbund. Ölnebelkonzentrationen der unterschiedlichsten Produktionsbereichen, mit doch recht unterschiedlichem und teilweise hohem Niveau sind zeitlich über einen Tagesablauf im Diagramm 1.8.2 aufgezeigt.

Die für den Ölgehalt unserer Atemluft relevante Schwebstaubbelastung liegt derzeit in Deutschland bei Mittelwerten von deutlich unter

100 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ Luft. Die 267 Meßstationen der Umweltbehörden in den Bundesländern ermittelten z.B. Ende April bis Anfang Mai 1994 bundesdurchschnittliche Schwebstaubbelastungen der Luft von nur 38 - 51 $\mu\text{m}/\text{m}^3$. Diese Werte sind durchschnittliche Mittelwerte und können als Basis für die Beurteilung einzelner Druckluftstationen zu Fehlinterpretationen führen.

1.9 Luftdruck

Molekularkräfte, die feste und flüssige Stoffe mehr oder weniger zusammenhalten, sind bei Gasen derart gering, daß sich die Gasteilchen praktisch frei bewegen. Gase breiten sich in jedem verfügbaren Raum aus und mischen sich mit den bereits im Raum enthaltenen Gasen. Das Gasvolumen besteht größtenteils aus freiem Volumen und dem Nettovolumen der Gasmoleküle, das weitaus geringer ist als ihr freies Volumen. Infolgedessen lassen sich alle Gase, und natürlich auch Luft, komprimieren.

Bei atmosphärischem Druck und der Temperatur 0 °C enthält 1 m³ Luft ungefähr $27 \cdot 10^{18}$ Moleküle²⁹, die permanent zusammenstoßen, wobei die Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit jeweils geändert wird. In einem geschlossenen Gefäß mit $27 \cdot 10^{18}$ Molekülen ist jeder Quadratmillimeter der Gefäßinnenwandung ca. $3 \cdot 10^{21}$ Molekularstößen³⁰ ausgesetzt. Die Summe dieser $3 \cdot 10^{21}$ Stöße auf die Wandungen wird als Luftdruck bezeichnet. Die Bewegungsenergie eines Gasteilchens ist dabei allein abhängig von der Wärme. Bei -273 °C ist jedes Gasmolekül absolut bewegungslos.

Der Luftdruck wird mit dem Barometer gemessen und ist das jeweilige Gewicht der Luftsäule über dem Erdboden, bezogen auf die Höhe des Meeresspiegels. Der durch das Gewicht der Luft verursachte Druck auf der Erdoberfläche beträgt im Mittel 1,033 kp/cm².

Bei gleichmäßiger Dichte der Luft würde sich hieraus eine Höhe der Atmosphäre von

²⁹Trillion

³⁰Quadrillion

1.0 Luft

$$h = \frac{1,033 * 10.000}{1,293} = 7.991 \text{ m}$$

ergeben, wobei 1,293 die Dichte der Luft in kg/m^3 bei 0°C ist. In Wirklichkeit nimmt jedoch der Druck mit der Höhe ab.

In der Meteorologie wird der Begriff Torr als Druckangabe verwendet. 1 Torr entspricht dabei 1 mm Quecksilbersäule. Torricelli³¹ zu Ehren wurde diese Bezeichnung eingeführt.

1.10 Luftbedarf des Menschen

Voraussetzung für menschliches Leben ist die Luft zum Atmen, exakter der Luftsauerstoff, der für die körperlichen Verbrennungsprozesse notwendig ist.

Der Luftbedarf eines erwachsenen Menschen ist von unterschiedlichen Einflüssen abhängig und kann nur beispielhaft bewertet werden.

Als Basis für den Luftbedarf des Menschen gelten seine mittleren biophysikalischen Daten im Zustand der Ruhe mit folgenden Werten:

Biophysikalische Daten des Menschen

Gewicht	60	kg
Grundumsatz	70	kcal/h
Zahl der Atemzüge	16	min
Atemluftmenge	0,5	m^3/h

Tabelle 1.10.1

Der daraus abgeleitete Luftbedarf des Menschen bei unterschiedlicher Tätigkeit ist in nachstehender Tabelle zusammengefaßt.

Luftbedarf des Menschen

Tätigkeit	Umsatz kcal/h	Luftbedarf m^3/h
-----------	------------------	-------------------------------------

³¹ital. Professor

ruhend	70	0,4 - 0,5
Büroarbeit	100	2 - 5
leichte Arbeit	150	10 - 15
körperl. Arbeit	350	10 - 36
Schwerarbeit	500	40 - 60
Schwerstarbeit	600	72 - 90

Tabelle 1.10.2

Die eingeatmete Luft eines erwachsenen Menschen ohne körperliche Tätigkeit beträgt etwa $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$, wobei die ausgeatmete Luft³² im Mittel 17 % O_2 ; 4 % CO_2 und 79 % N enthält.

³²vergl. Tab. 1.3.1