

Höhe von der Stratosphäre und nach oben durch die Mesopause (in 80 bis 85 km Höhe) von der Thermosphäre abgegrenzt.

Aufgrund der hier sehr ausgedünnten Luft und der Tatsache, dass kaum noch Ozon vorhanden ist und sich die Absorption der energiereichen UV-Strahlung in der Stratosphäre abspielt, sinkt die Temperatur wieder von ca. 0 °C auf durchschnittlich – 90 °C in 85 km Höhe ab. Als vierte Schicht schließt sich die Thermosphäre an. In ihr nimmt die Temperatur nach oben hin ständig zu und erreicht in ca. 500 km über dem Erdboden Temperaturen zwischen 1.000 °C (nachts) und 2.000 °C (mittags).

Die hohe Temperatur, die „scheinbar“ in der Thermosphäre herrscht, bezieht sich auf die Geschwindigkeit der noch spärlich vorhandenen Gasmoleküle, denn die Temperatur selbst ist ein Maß für die kinetische Energie der Atome und Moleküle eines Körpers. Ein Thermometer würde Minus-Temperaturen anzeigen, da die Gasdichte in dieser Höhe viel zu gering ist, um einen messbaren Wärmetransport zu verursachen.

Als fünfte Schicht schließt sich die Exosphäre an die Thermosphäre an. Sie markiert den fließenden Übergang zum interplanetaren Raum, ist jedoch nach Definition von NASA und Federation Aeronautique International bereits ein Teil dessen. Sie ist ein Teil der Heterosphäre, Abb. 4, das heißt jenem Bereich der Atmosphäre ab ca. 100 km Höhe, in dem sich Gase entsprechend ihrer Atommassen entmischen und schichten. Die Exosphäre ist die einzige Atmosphärenschicht, aus der Gasmoleküle aufgrund der ihnen eigenen Geschwindigkeit das Gravitationsfeld der Erde verlassen können. Grundsätzlich kann die Atmosphäre mit einem Luftmeer verglichen werden, das die ganze Erdoberfläche überschwemmt und auf dessen Grund wir leben.

Die in Abb. 4 eingezeichnete planetarische Grenzschicht, häufig auch Bodenreibungsschicht genannt, ist der Teil der Troposphäre, dessen Luftmassen, neben der horizontal wirkenden Coriolis-Kraft<sup>1</sup>, (4), gravierend durch die Beschaffenheit der Erdoberfläche und durch thermische turbulente Austauschprozesse geprägt sind. Sie ist der bedeutendste Teil der Biosphäre.

Die Mächtigkeit dieser Grenzschicht hängt von der Beschaffenheit des Untergrundes und der Witterung ab und unterliegt einem Tagesgang. Am Tage hat sie eine Mächtigkeit von ca. 1.000 m. In der Nacht ist die Dicke meist unter 500 m. Während einer windarmen Wetterlage endet die Grenzschicht über Freiland nachts schon bei 30 m, während sie sich über der Stadt auch nachts weit höher als 100 m über Grund erstreckt. Die vertikalen thermischen Austauschprozesse durch Turbulenz sind entscheidend für die Luftqualität. Die Lufthygiene hängt also stark von der Menge der emittierten Schadstoffe und dem Austausch zwischen bodennahen und höheren Luftschichten ab.

(5)

Nach der Darstellung des Profils der Atmosphäre nun zu der chemischen Zusammensetzung.

## 1.3 Natürliche Hauptbestandteile der trockenen Luft (6)

<u>Chemisches Element</u>	<u>Volumenanteil</u>	<u>Masseanteil</u>
Stickstoff (N <sub>2</sub> )	78,084 %	75,51 %
Sauerstoff (O <sub>2</sub> )	20,946 %	23,01 %
Kohlendioxid <sup>2</sup> (CO <sub>2</sub> )	0,034 %	0,04 %
Argon (Ar)	0,934 %	1,289 %
Neon (Ne)	18,18 ppm*	12 ppm
Helium (He)	5,24 ppm	7 ppm
Krypton (Kr)	1,14 ppm	3 ppm
Xenon (Xe)	0,087 ppm	0,4 ppm
Wasserstoff (H)	0,5 ppm	0,04 ppm

\*ppm = 10<sup>-6</sup>  
(parts per Million, Teile pro Million Teile Luft)

**Summe**                      **99,97**

## 1.4 Wichtige Spurengase der Luft

Spurengas	chemisches Symbol	Konzentration	<i>fiktiver Temperatureffekt!!!</i>
Wasserdampf	H <sub>2</sub> O	2–3 %	+20,6 K
Kohlendioxid	CO <sub>2</sub>	347 ppm	+7,2 K
Ozon (bodennah)	O <sub>3</sub>	0,03 ppm	+2,4 K
Distickstoffoxid	N <sub>2</sub> O	0,3 ppm	+1,4 K
Methan	CH <sub>4</sub>	1,65 ppm	+0,8 K
<b>Zusammenfassend</b>			<b>+33 K</b>

Die Atmosphäre hat viele lebenswichtige Funktionen, indem sie u. a. ...

1. die Lebewesen vor schädlicher bzw. tödlicher Strahlung aus dem Weltraum schützt (Filter für UV- und Röntgenstrahlung der Sonne),
2. lebensnotwendiges Sonnenlicht zu Oberflächen der Kontinente und Ozeane durch lässt (Energiequelle),
3. vor schneller Auskühlung und Überhitzung schützt (z. B. Wärmeausgleich zwischen Tag und Nacht),
4. Energie (fühlbare Wärme der Luft und latente Wärme des Wasserdampfs) aus Bereichen in Äquatornähe zu mittleren und höheren Breiten transportiert,
5. Wasserdampf-Feuchtigkeit durch die dynamischen Prozesse der allgemeinen Zirkulation transportiert und verteilt, wodurch die Niederschlagsverteilung bestimmt wird,
6. den Hauptspeicher für Stickstoff bildet,
7. ein Reservoir für Kohlenstoffdioxid und Sauerstoff darstellt,
8. einbezogen ist in verschiedene lebensnotwendige Stoffkreisläufe,
9. natürliche und anthropogene Emissionen verteilt, die in der Atmosphäre durch Oxidation, Reaktionen mit Radikalen und Photolyse umgesetzt und abgebaut werden,
10. vor kleineren Meteoriten schützt, die wegen der großen Reibung beim Eintritt in die Atmosphäre verglühen und so die Erdoberfläche nicht erreichen.

## 1.5 Die Atmosphäre, ein chaotisches System

Die Einzelheiten der folgenden Darlegungen sind mehr für Leser gedacht, die ein besonderes Interesse an Mathematik und Physik haben. Ansonsten genügt für das weitere Verständnis unserer Betrachtungen das Ergebnis der Ausführungen.

Anders als der Begriff *Chaos* in der Umgangssprache charakterisiert die Chaostheorie nicht den Zustand eines Systems, wie z. B. den Grad seiner Unordnung, sondern sein zeitliches Verhalten, das heißt seine Dynamik. Chaotisches Verhalten eines Systems liegt vor, wenn selbst geringste Änderungen der Anfangsbedingungen nach einer gewissen Zeit zu einem völlig anderen Verhalten führen. (7) Man spricht in diesem Zusammenhang von sensibler Abhängigkeit von den Anfangswerten. Die Antwort auf die Frage, ob das weitere Verhalten des Systems vorhersagbar, also determiniert<sup>3</sup> oder indeterminiert ist, hängt also vom Inhalt der Voraussetzungen ab, unter denen man an die Betrachtung herantritt. Es kann daher sein, dass ein Prozess als determiniert oder als nicht determiniert erscheint, je nachdem wie man die Voraussetzungen festlegt. Klassische mechanische Systeme, wie z. B. die Bewegung der Planeten, sind durch die Festlegung der Voraussetzungen deterministisch, also prognostizierbar. Die wichtigste Aufgabe und zugleich Prüfstein jeder Naturwissenschaft.

Da bei chaotischen Systemen beliebig kleine Differenzen in den Anfangsbedingungen mit der Zeit exponentiell anwachsen, übersteigen die Anforderungen an die Präzision der Kenntnis der Anfangsbedingungen für eine Prognose des Systemverhaltens rasch die Möglichkeiten praktischer Messgenauigkeit um astronomische Faktoren. Das Wetter ist das bekannteste Beispiel für ein chaotisches Systemverhalten. Da es dafür kein die ganze Zukunft umfassendes Gesetz gibt, ist eine langfristige Vorhersage unmöglich. Dieses Phänomen ist in der Öffentlichkeit unter dem Schlagwort *Schmetterlingseffekt* bekannt geworden. Eine winzige Störung an einem Ort kann eine große Störung an einem anderen Ort bewirken. Überspitzt formuliert kann der Flügelschlag eines Schmetterlings in Brasilien Regen verursachen, der in London fällt. Wie Hawking in seinem Buch „Das Universum in der Nussschale“ schreibt, „ist das Ärgerliche daran, dass sich diese Ereignisfolge nicht wiederholen lässt“ (8). Die Ereignisse lassen sich nicht aufbewahren und können, da sie stets aufeinander folgen, nicht verglichen werden. Wenn der Schmetterling das nächste Mal mit seinen Flügeln schlägt, wird sich eine Reihe von Faktoren verändert haben, die das Wetter ebenfalls beeinflussen. Jeder Einfluss, egal wie geringfügig er ist, reicht aus, das System aus der Balance zu bringen. Die Voraussetzungen für ein chaotisches Verhalten eines Systems sind also die Nichtlinearität seiner Dynamik und eine sensible Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen. Beide Bedingungen treffen auf das Wetter zu, weshalb es

langfristig nicht mehr deterministisch ist und somit in seinem Verhalten auch nicht mehr prognostizierbar.