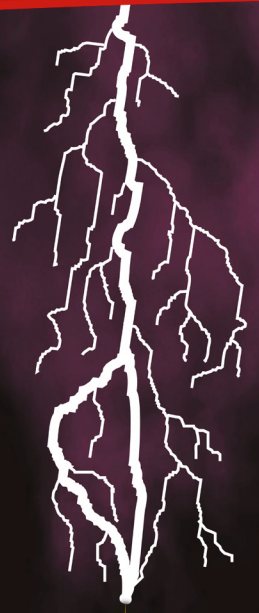


Hans Häckel

Meteorologie

9. Auflage



Eine Arbeitsgemeinschaft der Verlage

Böhlau Verlag • Wien • Köln • Weimar
Verlag Barbara Budrich • Opladen • Toronto
facultas • Wien
Wilhelm Fink • Paderborn
Narr Francke Attempto Verlag / expert verlag • Tübingen
Haupt Verlag • Bern
Verlag Julius Klinkhardt • Bad Heilbrunn
Mohr Siebeck • Tübingen
Ernst Reinhardt Verlag • München
Ferdinand Schöningh • Paderborn
transcript Verlag • Bielefeld
Eugen Ulmer Verlag • Stuttgart
UVK Verlag • München
Vandenhoeck & Ruprecht • Göttingen
Waxmann • Münster • New York
wbv Publikation • Bielefeld
Wochenschau Verlag • Frankfurt am Main

Hans Häckel

Meteorologie

9., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage

235 Abbildungen

33 Tabellen

Verlag Eugen Ulmer Stuttgart

Prof. Dr. Hans Häckel, 1942 in München geboren, studierte von 1962 bis 1968 Meteorologie an der Universität München. Nach dem Diplom und dem Großen Staatsexamen war er zunächst beim Deutschen Wetterdienst (DWD) in Offenbach in der Wettervorhersage tätig.

1971 übernahm er eine Wissenschaftlerstelle an der Agrarmeteorologischen Forschungsstelle des DWD in Weihenstephan und studierte Landwirtschaft und Gartenbau an der TUM. Nach der Promotion zum Doktor der Landwirtschaft im Jahr 1974 hielt Prof. Häckel von 1975 bis 2007 Vorlesungen an der Hochschule Weihenstephan, später an der TUM über Meteorologie, Agrarmeteorologie und Klimatologie. Von 1976 bis 2003 war er Leiter der Agrarmeteorologischen Forschungsstelle (Niederlassung) Weihenstephan des DWD.

Wissenschaftlich betätigte er sich in den Bereichen Frostschutz, agrarmeteorologische Messtechnik, Feldberegnung, Modellierung agrarmeteorologischer Vorgänge, Agrarklimatologie, Phänologie und agrarmeteorologische Beratung. Neben einer Vielzahl von wissenschaftlichen Publikationen hat er noch eine Reihe von Fachbüchern verfasst.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© 1985 / 2021 Eugen Ulmer KG

Wollgrasweg 41, 70599 Stuttgart (Hohenheim)

E-Mail: info@ulmer.de

Internet: www.ulmer.de

Lektorat: Sabine Mann, Dr. Andrea Schürg

Herstellung: Jürgen Sprengel

Umschlagbild: © Helmuth Flubacher, Hans Häckel (Entwicklung eines Blitzes; nach einer Vorlage von Walch, J. und Frater, H (2004); bearbeitet und coloriert (vgl. Abb. 2.40, S.114)

Umschlaggestaltung: Atelier Reichert, Stuttgart

Satz: Bernd Burkart; www.form-und-produktion.de

Druck und Bindung: Pustet; Regensburg

Printed in Germany

UTB-Band-Nr. 1338

ISBN 978-3-8252-5504-6 (Print)

ISBN 978-3-8385-5504-1 (E-Book)

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 9. Auflage	11
Formelzeichen und Einheiten	13

1 Atmosphäre

1.1 Allgemeines über Atmosphären	15	1.4.1 Definitionen und Gesetzmäßigkeiten	30
1.2 Geschichte der Erdatmosphäre	16	1.4.2 Luftdruck als Navigationshilfe für die Luftfahrt	35
1.3 Zusammensetzung der Erdatmosphäre und wirtschaftlich-ökologische Bedeutung der Atmosphärogase	19	1.4.3 Reduktion des Luftdrucks auf Meeresniveau	36
1.3.1 Stickstoff	20	1.5 Temperatur der Atmosphäre ...	36
1.3.2 Sauerstoff	20	1.6 Stabilität und Labilität der Atmosphäre	40
1.3.3 Argon	21	1.6.1 Stabile und labile Zustände	40
1.3.4 Wichtige atmosphärische Spurengase	21	1.6.2 Atmosphärenschichtung und Umweltschutz	42
1.4 Luftdruck	30	1.6.3 Ausbreitungsrechnung	45
		1.7 Vertikale Struktur und Temperatur der Atmosphäre ...	46

2 Wasser

2.1 Definitionen und wichtige physikalische Gesetze über das Wasser in der Atmosphäre	50	2.1.5 Rechenformeln und Vergleich der Relativen Feuchte mit anderen Feuchtemaßen	64
2.1.1 Feuchtemaße	50	2.1.6 Molekularphysikalische Deutung ungewöhnlicher Eigenschaften des Wassers	66
2.1.2 Sättigungsdampfdruck	56	2.2 Phasenübergänge des Wassers und ihre Bedeutung in der Meteorologie	70
2.1.3 Spezifische Wärme und Volumenwärme	60		
2.1.4 Schmelz- und Verdunstungsenergie	61		

2.2.1	Kondensations- und Gefrierprozesse in der Atmosphäre	70		
2.2.2	Verdunstung	76		
2.3	Erscheinungsformen des atmosphärischen Wassers	82	2.4	Niederschlagsverteilung, klimatische Wasserbilanz und Wasserkreislauf
2.3.1	Dunst	82	2.4.1	Örtliche und zeitliche Niederschlagsverteilung
2.3.2	Nebel	83	2.4.2	Klimatische Wasserbilanz
2.3.3	Wolken	88	2.4.3	Wasserkreislauf in der Bundesrepublik Deutschland.
2.3.4	Niederschläge	100	2.4.4	Wasserhaushalt des Erdbodens im Jahresverlauf
2.3.5	Beschläge	119		129

3 Strahlung

3.1	Definitionen und wichtige Gesetzmäßigkeiten über die Strahlung	132	3.2.3	Strahlungsumsatz von Atmosphäre, Boden, Vegetation und Gewässern .
3.1.1	Lambertsches Gesetz	135		160
3.1.2	Bouguer-Lambert-Beersches Gesetz	135	3.3	Von der Erdoberfläche und der Atmosphäre ausgehende Strahlung
3.1.3	Plancksches Gesetz	136	3.3.1	Definitionen und wichtige Gesetzmäßigkeiten
3.1.4	Wiensches Verschiebungsgesetz ...	138	3.3.2	Wirkungen der langwelligen Strahlung
3.1.5	Stefan-Boltzmannsches Gesetz ...	139	3.3.3	Glashauseffekt
3.1.6	Strahlungsverhalten der Gase	143		173
3.1.7	Zusammenfassende Betrachtungen und molekularkinetische Deutung des Planckschen Gesetzes	143	3.4	Strahlungsbilanz der Erdoberfläche
3.2	Von der Sonne ausgehende Strahlung	145		175
3.2.1	Strahlungsgenuss der Erde	146	3.5	Optische Erscheinungen in der Atmosphäre
3.2.2	Absorption, Streuung und Reflexion.	150	3.5.1	Regenbogen
			3.5.2	Haloerscheinungen
			3.5.3	Weitere optische Erscheinungen...

4 Energiehaushalt der Erdoberfläche

4.1	Speicherung von Wärme im Boden und in Gewässern	184	4.1.3	Bewachsener Boden
4.1.1	Grundsätzliches zum Wärmetransport im Boden	184	4.1.4	Wärmespeicherung in Gewässern..
4.1.2	Bodenwärmestrom	188		193
4.2	Austausch fühlbarer Wärme und latenter Energie	195		

4.2.1	Vorbemerkung	195
4.2.2	Fühlbare Wärme	195
4.2.3	Latente Energie	198
4.3	Energiehaushalt als Ganzes	199

4.4	Zusammenhang zwischen Energiehaushalt der Erdoberfläche und Temperatur der bodennahen Luft	201
------------	---	------------

5 Wind

5.1	Grafische Darstellung des Windes	207
5.2	Entstehung des Windes	209
5.2.1	Land- und Seewind	209
5.2.2	Andere kleinräumige Windsysteme	211
5.2.3	Großräumige Windsysteme	213
5.3	Besondere Winderscheinungen	219

5.3.1	Tornados	219
5.3.2	Hurrikane, Taifune, Zyklonen	221
5.4	Böigkeit des Windes	223
5.5	Windschäden und Windschutz	225
5.5.1	Schäden durch Druck-, Sog- und Böeneinwirkung	225
5.5.2	Windschutz	227

6 Dynamik der Atmosphäre

6.1	Hoch- und Tiefdruckgebiete ...	229
6.1.1	Thermische Hoch- und Tiefdruckgebiete	229
6.1.2	Dynamische Hoch- und Tiefdruckgebiete	229
6.1.3	Luftmassen	243
6.2	Allgemeine Zirkulation der Atmosphäre	245
6.2.1	Hochdruckgürtel und Tiefdruckrinnen	245
6.2.2	Passatzirkulation	246
6.2.3	Polare Zirkulation	247
6.2.4	Zusammenfassung der allgemeinen Zirkulation	247
6.2.5	Mit der allgemeinen Zirkulation verbundener Energietransport	249

6.2.6	Jahresgang der allgemeinen Zirkulation	251
6.2.7	Monsune	251
6.3	Beispiele besonderer Wetterlagen	253
6.3.1	Die berühmte Dürre- und Hitzeperiode im Sommer 1976 ...	253
6.3.2	Der extreme Kälteeinbruch vom Dezember 1978	254
6.3.3	Beispiel einer Spätfrost-Wetterlage im Mai	255
6.3.4	Beispiel einer Frühfrost-Wetterlage im September	255
6.3.5	Beispiel einer Föhnlage	256

7 Klima

7.1 Was ist Klima?	259	7.6.2 Temperaturverhältnisse im gegliederten Gelände.	274
7.2 Der moderne Klimabegriff	259	7.6.3 Wind im gegliederten Gelände	279
7.3 Klimascales	260	7.6.4 Niederschlag im gegliederten Gelände.	285
7.4 Weltklima	263	7.6.5 Stadtklima	286
7.5 Makroklima	265	7.6.6 Klima im Pflanzenbestand	290
7.6 Mesoklima und Mikroklima	267	7.7 Klima an Einzelpflanzen und Fensterscheiben als Beispiele für das Spotklima – Grenzschichttheorie	293
7.6.1 Strahlungsverhältnisse im gegliederten Gelände.	267	7.7.1 Strahlung	293
		7.7.2 Temperatur	294

8 Messung meteorologischer Größen

8.1 Temperatur	305	8.3 Luftfeuchtigkeit	319
8.1.1 Flüssigkeitsthermometer	306	8.3.1 Haarhygrometer	319
8.1.2 Bimetallthermometer	307	8.3.2 Psychrometer	320
8.1.3 Widerstandsthermometer	307	8.3.3 Elektronische Feuchtemessung	321
8.1.4 Messfehler bei der Temperaturmessung	308	8.4 Verdunstung	322
8.1.5 Thermoelemente	310	8.5 Bodenwassergehalt	322
8.1.6 Strahlungsthermometer	311	8.6 Wind	323
8.1.7 Messungen der Temperatur im Erdboden	312	8.6.1 Windrichtung	323
8.2 Niederschläge und Beschläge ..	312	8.6.2 Windgeschwindigkeit	325
8.2.1 Niederschlagsmesser	313	8.7 Strahlung	329
8.2.2 Registrierende Niederschlagsmesser	315	8.7.1 Sonnenscheindauer	330
8.2.3 Niederschlagsmelder	316	8.7.2 Kurzwellige Strahlung	331
8.2.4 pH-Wert-Messer	317	8.7.3 Strahlungsbilanz	333
8.2.5 Nebeltraufe	317	8.7.4 Fotosynthetisch aktive Strahlung und Licht	333
8.2.6 Stamm- und Stängelabfluss	318	8.8 Luftdruck	333
8.2.7 Benetzungsdauer	318	8.8.1 Quecksilberbarometer	334
8.2.8 Schneehöhe und Schneedichte	318	8.8.2 Aneroid- oder Dosenbarometer	335

8.9 Flugmeteorologisch wichtige Größen	336	8.11 Nicht bodengebundene Messgeräte	339
8.9.1 Sichtweite	336	8.11.1 Radiosonden	339
8.9.2 Wolkenuntergrenze	336	8.11.2 Fernerkundung	340
8.9.3 Bestimmung der Wolkenmenge ...	337	8.11.3 Wettersatelliten	340
8.10 Wetterradar	337		

9 Veränderungen des Klimas

9.1 Vorbemerkungen	344	9.5 Ursachen der Klimaschwankungen	357
9.2 Das Klima früherer Zeiten	344	9.5.1 Interne Einflüsse auf das Klima ...	357
9.3 Informationsquellen über das Klima früherer Zeiten	345	9.5.2 Externe Einflüsse auf das Klima ...	358
9.3.1 Wettermessgeräte	345	9.6 Das Klima der Zukunft	361
9.3.2 Schriftliche Informationen über das Wetter	346	9.6.1 Klimaänderungen nach der Milanković-Theorie	361
9.3.3 Indirekte Analyseverfahren	348	9.6.2 Anthropogene Einflüsse	362
9.4 Ergebnisse der Klimaanalysen .	351	9.6.3 Klimamodelle	363
9.4.1 Die letzten 100 Jahre	351	9.6.4 Ergebnisse von Rechnungen mit Klimamodellen	365
9.4.2 Die letzten 1000 Jahre	352	9.6.5 Möglichkeiten zur Verhinderung und Beseitigung von Klimaschäden	366
9.4.3 Die letzten 10 000 Jahre	354		
9.4.4 Die letzten 100 000 Jahre	355		
9.4.5 Die letzten 1 000 000 Jahre	357		

Literaturverzeichnis	368	URL-Liste	391
Sachregister	381		

Bildquellen

Die Grafiken fertigten Helmuth Flubacher und Bernd Burkart nach Vorlagen des Autors und aus der Literatur. Die Quellen der Fotos und Zeichnungen sind in den jeweiligen Abbildungsunterschriften nachgewiesen. Ist keine Quelle angegeben, stammt die Abbildung vom Autor.

Von der Mühsal des Schreibens:

Im 8. Jahrhundert schildert der Schreiber des Westgotischen Wörterbuches die Mühsal seiner Tätigkeit und gibt dem Leser Anweisungen:

*„O glücklichster Leser, wasche Deine Hände
und fasse so das Buch an,
drehe die Blätter sanft,
halte die Finger weit ab von den Buchstaben.*

*Der, der nicht schreiben kann,
glaubt nicht, daß dies eine Arbeit sei.
O, wie schwer ist das Schreiben:
Es trübt die Augen, quetscht die Nieren
und bringt zugleich allen Gliedern Qual;
drei Finger schreiben, der ganze Körper leidet.“*

(Quelle: Schreibersprüche aus der Ausstellung: „Schreibkunst, Mittelalterliche Buchmalerei aus dem Kloster Seeon.“ Kloster Seeon, 1996)

Vorwort zur 9. Auflage

Die Meteorologie befasst sich mit den physikalischen Vorgängen in der Atmosphäre. Dabei hat sie naturgemäß wichtige Schnittstellen zu allen Geowissenschaften. Klimatologen, Geographen, Geophysiker, Ozeanographen, Geologen, Hydrologen und Glaziologen – sie alle benötigen für ihre Arbeit ein solides meteorologisches Grundwissen. Auch Botaniker, Zoologen und Ökologen können auf fundierte Kenntnisse über die Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Biosphäre nicht verzichten. Wie wichtig die Meteorologie für Forstwirtschaft, Landwirtschaft und Gartenbau ist, möge die folgende Zahl verdeutlichen: Über 80 % der Varianz der landwirtschaftlichen Ernteerträge lassen sich mit dem Wetter erklären. Auch Garten-, Landschafts- und Städteplaner müssen wissen, welche klimatische Situation sie im Gelände erwartet, und schließlich hat jeder Architekt und jeder Umweltingenieur das meteorologische Geschehen in seinen Planungen zu berücksichtigen. Für sie alle ist dieses Buch geschrieben. Darüber hinaus möchte es Physiker ansprechen, die Meteorologie als Nebenfach betreiben. Weiterhin wendet es sich an Lehrkräfte mit dem Thema Wetterkunde im Lehrplan und nicht zuletzt an jeden, der sich über seinen Beruf oder ein Hobby für diese vielseitige und lebendige Wissenschaft interessiert.

Für angehende Meteorologie-Studierende ist das Buch allenfalls im Bachelor-Studium geeignet. Von ihnen wird ein erheblich tieferes Eindringen in ihr Fachgebiet verlangt.

Das Buch ist in neun Kapitel gegliedert. Das erste befasst sich mit der Geschichte der Atmosphäre und mit ihren Inhaltsstoffen, mit dem Luftdruck, den Stabilitäts- und Ausbreitungsbedingungen und den daraus resultierenden Umweltfragen. Das zweite behandelt die Gesetzmäßigkeiten und Erscheinungsformen des Wassers, das dritte die Sonnen- und Wärmestrahlung. Im vierten Kapitel werden die bis dahin erarbeiteten Gesetzmäßigkeiten zum Energiehaushalt der Erdoberfläche zusammengeführt. Der Wind, der im fünften Kapitel behandelt wird, leitet über zur Dynamik der Atmosphäre mit ihren Hoch- und Tiefdruckgebiete-

ten, die im sechsten Kapitel thematisiert wird. Aus ihr ergeben sich im siebten Kapitel die großen Klimazonen der Erde, in die die klimatischen Besonderheiten im Gelände, in der Stadt, in unserer unmittelbaren Umgebung und an Einzelobjekten eingebettet sind. Wie man meteorologische Parameter messen kann, beschreibt das achte Kapitel und das neunte schließlich befasst sich mit natürlichen und anthropogen verursachten Klimaänderungen.

Natürlich können im Rahmen des vorliegenden Buches nicht alle Detailfragen erschöpfend behandelt werden. Hier wird vielmehr ein breiter Überblick über die Meteorologie gegeben, der die Leserschaft befähigt, sich selbstständig weiter zu vertiefen und in Spezialgebiete einzuarbeiten. Dazu dient auch die ausführliche Zusammenstellung wichtiger weiterführender Literatur im Anhang.

Wie auch schon in den früheren Auflagen wurde wieder großer Wert darauf gelegt, die Hintergründe der meteorologischen Gesetzmäßigkeiten zu beleuchten und die großen Zusammenhänge herauszuarbeiten. Hat man diese erst einmal begriffen, dann ergeben sich Details oft als selbstverständliche Konsequenzen.

Die Meteorologie ist in den letzten Jahrzehnten eine stark mathematisch-theoretisch geprägte Wissenschaft geworden. Das schreckt leider viele ab, sich mit ihr zu beschäftigen. Daher wurden in diesem Buch möglichst wenige Formeln verwendet und die unumgänglich notwendigen mit Beispielen aus der täglichen Erfahrung heraus plausibel gemacht. Alle besprochenen Gesetzmäßigkeiten werden mit möglichst vielen und allgemein bekannten Vorgängen belegt. Umgekehrt sollen die uns oft völlig unbewusst begegnenden atmosphärischen Phänomene als Folge bekannter, möglichst einfacher und leicht begreifbarer Zusammenhänge gedeutet werden.

Besonders wichtige Textteile werden aus didaktischen Gründen durch einen ockerfarbenen Balken eingeleitet, blau gedruckt und farbig hinterlegt. **Ergänzende Randbemerkungen** sind ebenfalls blau gedruckt und hinterlegt, aber mit einem Pfeil und einem thematischen Stichwort überschrieben.

In die vorliegende 9. Auflage wurden wieder einige Neuerungen aufgenommen. Sie sollen helfen, die Meteorologie noch verständlicher darzustellen, denn das oberste Prinzip dieses Buches lautet auch weiterhin: Aktueller Inhalt bei optimaler Verständlichkeit!

Neu ist in dieser Auflage insbesondere, dass über QR-Codes externe Quellen aufgerufen werden können. Diese beinhalten einerseits weiterführende Informationen zum laufenden Text, vor allem aber eine Reihe von Power-Point-Präsentationen. Darin werden kompliziertere Vorgänge, z. B. die Geschichte der Erdatmosphäre, das Verhalten von Luftschichten beim Absinken, die Entwicklung von Tiefdruckgebieten oder die Entstehung von Leewirbeln und die Wirkungsweise der „Ablenkenden Kraft der Erdrotation“ vorgestellt – stets in schrittweiser Entwicklung und ausführlich kommentiert. Auch die interessante Formen- und Farbenvielfalt einiger meteorologischer Phänomene wird in Bildern gezeigt und erklärt. Schließlich zeigt eine Präsentation, wie sich der (phänologische) Frühling innerhalb von knapp 100 Tagen über Europa ausbreitet.

Nutzen Sie auch von Zeit zu Zeit den untenstehenden QR-Code und entdecken Sie viele weitere spannende Informationen rund um das Thema Meteorologie.



Die Bücher der Verlagskooperation utb sind preislich so kalkuliert, dass sie auch in Zeiten höherer finanzieller Belastung für die Studierenden erschwinglich bleiben. Das hat zur Folge, dass bei der Zahl der Fotos etwas Zurückhaltung geboten ist. Meine beiden reich bebilderten Ergänzungstitel zum vorliegenden Buch aus dem Hause Ulmer sind aber weiterhin auf dem Markt: „Naturführer Wetter und Klimaphänomene“ und „Naturführer Wolken und andere Phänomene am Himmel“.

Ich bedanke mich bei allen, die durch Fragen, Anregungen oder konstruktive Kritik mitgeholfen haben, das Buch weiter zu verbessern. Mein Dank gilt darüber hinaus dem „Meteorologie-Team“ in Lektorat und Herstellung: Frau Sabine Mann und den Herren Jürgen Sprengel, Bernd Burkart und Jürgen Reichert für die hervorragende Hilfe bei allen meinen Sonderwünschen und die stets bestens funktionierende Zusammenarbeit. Einen ganz besonderen Dank schließlich verdient Agnes, meine liebe Frau, die mich bei den Arbeiten zur Neuauflage mit allen Kräften unterstützt und in bewundernswerter Geduld begleitet hat.

Ihnen, verehrte Leserinnen und Leser der „Meteorologie“ wünsche ich viele „Aha-Erlebnisse“ und besten Erfolg bei der Arbeit mit dem Buch.

Weihenstephan, im Januar 2021
Hans Häckel

Die in diesem Buch enthaltenen Empfehlungen und Angaben sind vom Autor mit größter Sorgfalt zusammengestellt und geprüft worden. Eine Garantie für die Richtigkeit der Angaben kann aber nicht gegeben werden. Dies gilt insbesondere für die über QR-Codes abrufbaren Informationen aus dem Internet. Autor und Verlag übernehmen keinerlei Haftung für Schäden und Unfälle.

Anmerkung zur Schreibweise der weiblichen und männlichen Form: Ausschließlich aufgrund der deutlich besseren Lesbarkeit wird in diesem Werk auf die jeweilige Doppelnennung oder Anpassung der Schreibweise bestimmter Bezeichnungen verzichtet. So stehen die Namen der Vertreter verschiedener Fachbereiche selbstverständlich für alle Frauen und Männer, die diese Berufe ausüben oder vertreten.

Formelzeichen und Einheiten

Symbol	Bedeutung	Typische Einheit
a	absolute Feuchte	g Wasserdampf/m ³ feuchter Luft
A	langwellige Ausstrahlung (der Erdoberfläche)	W/m ²
Ä	Äquivalentzuschlag	K
AG	atmosphärische Gegenstrahlung	W/m ²
B	Bodenwärmestrom	W/m ²
Bv	Bodenwassergehalt	%vol
c	spezifische Wärme	Ws/(g · K)
c _p	spezifische Wärme der Luft bei konstantem Druck	Ws/(g · K)
C	Corioliskraft	N (Newton; 1 N = 1 kg · m · s ⁻²)
C	Konstante	–
d	Durchmesser	m, cm
D	direkte Sonnenstrahlung	W/m ²
e	Dampfdruck	mbar, hPa ^(*)
E	Energie	J, Ws, Joule
E	Sättigungsdampfdruck	mbar, hPa ^(*)
f	Fläche	m ² , cm ²
g	Gewicht	N, Newton
G	Globalstrahlung	W/m ²
G	Gradientkraft	N, Newton
h	Höhe bzw. Vertikalkoordinate	m, cm
h _k	Kondensationsniveau	m, cm
h ₀	Rauigkeitslänge	m, cm
h _v	Verdrängungshöhe	m, cm
H	Himmelsstrahlung	W/m ²
I	Interzeption	mm = Millimeter Niederschlagshöhe
J, J ₀	Strahlungsstrom	W/m ²
K	Kraft	N, Newton
l	Länge	m, cm
L	Strom fühlbarer Wärme	W/m ²
m	Masse	g, kg
m	Mischungsverhältnis	g Wasserdampf/kg trockener Luft
N	Niederschlag	mm = Millimeter Niederschlagshöhe
Nd	Niederschlag, der durch einen Bestand hindurch auf den Boden fällt	mm = Millimeter Niederschlagshöhe
NS	Stängel, Stammabfluss	mm = Millimeter Niederschlagshöhe
O	Oberfläche	cm ² , m ²
p	Druck, Luftdruck	mbar, hPa ^(*)
Q	Strahlungsbilanz	W/m ²
Q	Wärmemenge	Ws, Joule
r	Albedo	%

Symbol	Bedeutung	Typische Einheit
r	Radius	cm, m
R	Reflexstrahlung	W/m ²
RF	relative Feuchte	%
s	spezifische Feuchte	g Wasserdampf/kg feuchter Luft
S	Sättigungsfeuchte	g Wasserdampf/kg feuchter Luft
t	Extinktionskoeffizient	1/m
T	absolute Temperatur	K
u	Austauschkoeffizient	g/(m · s)
v	Geschwindigkeit	m/s
V	Volumen	cm ³ , m ³
V	Strom latenter Energie	W/m ²
w	Weg	m, cm
W	Verdunstungsrate	g Wasserdampf/(m ² · s)
W	Verdunstungsrate	Millimeter Niederschlagshöhe/Tag (= mm/d)
x, y	Horizontalkoordinaten	m, cm
z	Vertikalkoordinate (Tiefe im Boden zählt nach unten negativ)	m, cm
α_L	Wärmeübergangszahl	W/(m ² · K)
δ	Deklination	° (Grad)
τ	Taupunkttemperatur	°C
δ	Dicke der Grenzschicht	mm
Δ	Differenzenzeichen	
ε	Emissionsvermögen	
ζ	Faktor der Penmanschen Verdunstungsformel	
η	Konstante des Wienschen Verschiebungsgesetzes	2899 $\mu\text{m} \cdot \text{K}$
ϑ	Temperatur	°C
ϑ_f	Feuchttemperatur	°C
Θ	potenzielle Temperatur	°C
λ	Wellenlänge (Strahlung)	μm
Λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(m · K)
ν	Frequenz, Faktor der Penmanschen Verdunstungsformel	
ρ	Dichte	g/m ³
σ	Konstante des Stefan-Boltzmannschen Gesetzes	$5,6698 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})$
φ	geografische Breite	° (Grad)
ψ	spezifische Verdunstungsenergie	Ws/g
ω	Winkelgeschwindigkeit	1/s
EXP(x)	e ^x (e = 2,718 = Eulersche Zahl)	
·	Multiplikationszeichen	
(*)	1 mbar (Millibar) = 1 hPa (Hektopascal)	

Leider lässt es sich nicht immer vermeiden, ein und dasselbe Formelzeichen für mehrere physikalischen Größen zu verwenden. In solchen Fällen wurde jedoch streng darauf geachtet, dass keine Verwechslungen möglich sind.

1 Atmosphäre

Die Meteorologie gehört zu den Wissenschaften, die sich mit der Atmosphäre der Erde beschäftigen. Es ist daher angebracht, sich zunächst einige grundsätzliche Gedanken über eine solche Gas-hülle zu machen und wenigstens in Umrissen ihren Entstehungsweg und ihre Geschichte zu skizzieren.

1.1 Allgemeines über Atmosphären

Betrachtet man die Himmelskörper in unserem Sonnensystem, so fällt auf, dass Atmosphären keineswegs eine Selbstverständlichkeit sind. So hat beispielsweise gleich unser nächster Nachbar im Raum, der Mond, keine Atmosphäre.

Es drängt sich daher die Frage auf, woher es kommt, dass die Erde von Luft umgeben ist, der Mond dagegen nicht. Die Antwort darauf gibt uns die Physik in der kinetischen Gastheorie. Danach bewegen sich die Teilchen eines Gases im Mittel umso schneller, je höher ihre Temperatur ist. Weiter sagt diese Theorie, dass bei gleicher Temperatur die schweren Teilchen langsamer und die leichten Teilchen schneller fliegen.

► Aus Nachbarwissenschaften

Nach der molekularkinetischen Theorie ist die Temperatur ein Ausdruck für die Intensität der Molekularbewegung. Die mittlere Molekulargeschwindigkeit beträgt bei:

	0 °C	100 °C
H ₂ :	1840	2153 m/s
O ₂ :	460	539 m/s
CO ₂ :	393	450 m/s

Da die Bewegungsrichtung der Moleküle in einem Gas den Regeln der Statistik folgt, muss jede Richtung vorkommen. Auf eine Atmosphäre bezogen bedeutet das, dass sich zu jedem Zeitpunkt ein Teil der Moleküle von der Oberfläche des Himmelskörpers weg nach oben bewegt. Haben sie dabei eine Geschwindigkeit, die ausreicht, seine Anziehungskraft zu überwinden, so können

sie ihm entfliehen und in den Weltraum hinaus verschwinden. Im realen Fall ist ein solcher Vorgang natürlich viel komplizierter als hier dargestellt, jedoch ist das Ergebnis das gleiche. Ob um einen Himmelskörper eine dauerhafte Atmosphäre existieren kann, hängt also zunächst davon ab, ob er in der Lage ist, mit seiner Schwerkraft die Gasmoleküle genügend fest an sich zu ziehen oder nicht.

Die erste Voraussetzung für eine Atmosphäre ist also zwangsläufig eine ausreichende **Größe** des Himmelskörpers. Ist er zu klein und damit seine Anziehungskraft zu schwach, dann diffundieren die Gase weg, und es kann sich keine Atmosphäre halten.

Die zweite Voraussetzung ist, dass die **Temperatur** an der Oberfläche des Himmelskörpers nicht zu hoch ist. Wenn es dort sehr heiß ist, haben die Gasteilchen eher die Chance, eine Geschwindigkeit zu erreichen, die ihnen das Entfliehen ermöglicht, als wenn es kühl ist. Der Temperaturgrenzwert ist natürlich bei jedem Himmelskörper anders. Bei einem großen mit stärkerer Gravitation liegt er höher als bei einem kleinen.

Drittens muss das unterschiedliche **Verhalten der verschiedenen Gase** berücksichtigt werden. Da die Moleküle mit den kleinen Molekulargewichten schneller sind als die mit den großen, gelingt es ihnen eher, den Fesseln der Gravitation zu entkommen, als den anderen. Wasserstoff und Helium werden also leichter wegdiffundieren als Stickstoff, Sauerstoff und Kohlendioxid.

Vergleicht man die Himmelskörper unseres Planetensystems unter diesen drei Gesichtspunkten, so kommt man zu folgendem Gesamtbild: Der Mond ist wesentlich kleiner als die Erde. Seine Schwerkraft beträgt nur 17% der Erdschwere. Gleichzeitig erhitzt er sich auf der sonnenbeschienenen Seite bis über 130 °C. Zum Vergleich: Auf der Erdoberfläche werden 40 °C nur unter extremen Bedingungen überschritten. Der Mond hat deshalb keine Möglichkeit, eine Atmosphäre festzuhalten.

Die Betrachtungen über Atmosphären von Himmelskörpern in unserem Sonnensystem wurden bewusst sehr stark vereinfacht. Tatsächlich handelt es sich dabei um komplizierte und längst nicht vollständig geklärte physikalische Probleme.

1.2 Geschichte der Erdatmosphäre

Es wäre ein großer Irrtum zu glauben, die Erdatmosphäre sei irgendwann einmal entstanden und dann bis heute unverändert erhalten geblieben.

Sie hat vielmehr eine bewegte Geschichte hinter sich, in der sich ihre chemische Zusammensetzung mehrfach von Grund auf geändert hat. Abbildung 1.1 zeigt schematisiert die chemischen Veränderungen im Verlauf der Atmosphärgeschichte.

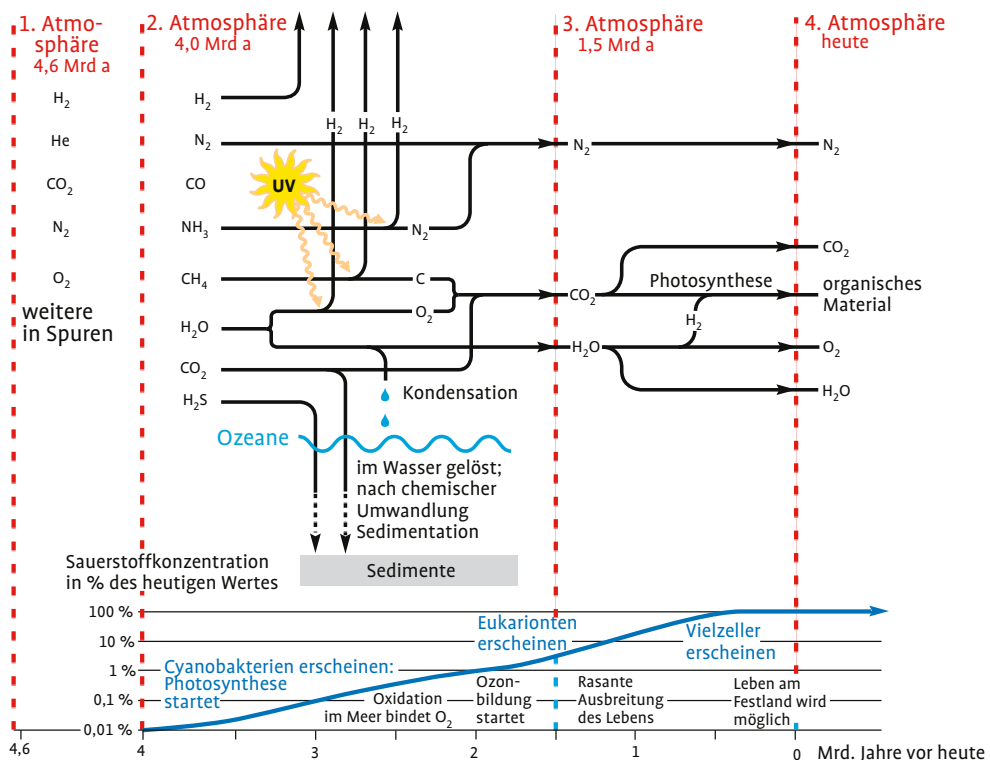
► Präsentation

Wer sich die Geschichte der Erdatmosphäre gerne in Form einer Power-Point-Präsentation anschauen möchte, findet dazu Gelegenheit über den QR-Code.



Die Bildung der ersten Atmosphäre ist eng verknüpft mit der Entstehung des Erdkörpers und des Sonnensystems. Vor etwa 4,6Mrd. Jahren rotierte im Weltall eine riesige, kugelförmige, sich aber allmählich verflachende Wolke aus kos-

Abb. 1.1
Geschichte der Erdatmosphäre.



mischen Gasen, Staubpartikeln und größeren Materiebrocken. In diesem wogenden und wabernen Gebilde kam es zu unzähligen Zusammenstößen zwischen Materieteilchen verschiedenster Größe. Und bei vielen dieser Zusammenstöße bewirkte die Schwerkraft der Teilchen nicht nur ein Zusammenprallen, sondern auch ein Zusammenballen zu immer größeren Klumpen. Je größer ein Brocken wurde, desto größer wurde auch seine Schwerkraft, sodass er immer mehr Materie aus seiner Umgebung an sich reißen konnte. Keppler (1988) vergleicht diesen Vorgang sehr anschaulich mit dem Verlauf eines Monopoly-Spiels. Auf diese Weise wuchsen die Sonne, die Planeten, die zahlreichen Planetoiden und die Kometen heran. Innerhalb von etwa 10 Mio. Jahren hatten sie es geschafft, das Sonnensystem sozusagen leerzufegen.

In diese Zeit fällt wahrscheinlich auch die Entstehung einer ersten **Erdatmosphäre**, die häufig als **Uratmosphäre** bezeichnet wird. Sie muss sich gebildet haben, als der Erdkörper groß genug geworden war, eine Gashülle an sich zu binden. Sie dürfte sich aus den gleichen Gasen mit den gleichen Konzentrationen zusammengesetzt haben, wie wir sie noch heute im interstellaren Raum vorfinden: 92 % Wasserstoff (H_2), 7 % Helium (He), 0,03 % Kohlendioxid (CO_2), 0,008 % Stickstoff (N_2), 0,006 % Sauerstoff (O_2), dazu weitere in Spuren (Quellen → Schönwiese, 2020). Diese Atmosphäre ist der Erde jedoch im Lauf von einigen 100 Mio. Jahren wieder restlos verloren gegangen. Zwei Vorgänge waren dafür verantwortlich. Erstens erhitze sich die Erde unter dem ständigen Bombardement mit Weltraum-Materie allmählich so stark, dass sie glutflüssig wurde. Die Erhitzung alleine hätte also schon genügt, die Atmosphäre wegdiffundieren zu lassen. Es kam aber noch ein Ereignis von gigantischem Ausmaß dazu: Als die Temperatur im Zentralgestirn des Sonnensystems 10 Mio. Grad erreicht hatte, zündete dort der bekannte **Kernfusionsvorgang**, der den bislang dunklen Materiehaufen in einen hell leuchtenden Stern verwandelte. Das war vor etwa 4,5 Mrd. Jahren. Mit der Kernfusion muss ein unvorstellbarer **Sonnenwind** eingesetzt haben. Man versteht darunter einen von der Sonne ausgehenden Strom elektrisch geladener Elementarteilchen. Er dürfte etwa 1000-mal so stark gewesen sein wie heute. Ihm hätte keine noch so

stabile Atmosphäre standhalten können. So wurden die Atmosphären gas von der Erde weggerissen und in die äußeren Bereiche des Sonnensystems verblasen.

Als sich die Materie des Sonnensystems mehr und mehr auf die verbliebenen Himmelskörper verteilt hatte, wurden die Einschläge allmählich weniger. Damit ließ auch die Aufheizung nach und die Erde fing an, sich infolge der Wärmeabstrahlung (→ Kap. 3.3, S. 167) langsam abzukühlen. Während dieses Abschnittes der Erdgeschichte muss ein unvergleichlicher Vulkanismus geherrscht haben, der zusammen mit der Ausgasung der Gesteine und Lavamassen vor etwa 4 Mrd. Jahren eine neue Atmosphäre entstehen ließ.

Neben den im Text bereits erläuterten Vorgängen gibt es noch zwei weitere, die dazu beigetragen haben, dass die Uratmosphäre wieder restlos verschwunden ist: Mit dem Massenwachstum der Erde nahm auch ihre Gravitation stetig zu. Das führte zu einer Kontraktion des Erdkörpers. Solche Vorgänge setzen eine gewaltige Wärmefreiheit frei, die wesentlich zur Erhitzung unseres Planeten beigetragen hat. Ein weiterer Beitrag zur Temperatursteigerung geht auf die Wärmefreisetzung aus dem Zerfall radioaktiver Substanzen zurück.

Aus welchen Gasen mag sich die zweite Atmosphäre zusammengesetzt haben? Erste Anhaltspunkte liefern uns die heute noch tätigen Vulkane. Danach dürfte die zweite Erdatmosphäre zu etwa 80 % aus Wasserdampf, zu rund 10 % aus Kohlendioxid (CO_2) und zu 5 bis 7 % aus Schwefelwasserstoff (H_2S) bestanden haben. In Konzentrationen um 0,5 % waren außerdem Stickstoff (N_2), Wasserstoff (H_2) und Kohlenmonoxid (CO), in Spuren Methan (CH_4) und Ammoniak (NH_3) enthalten.

Von den meisten dieser Gase enthält die Atmosphäre heute nur noch winzige Spuren. Was ist aus ihnen geworden? Wohin sind sie verschwunden? Der leichte **Wasserstoff** konnte der irdischen Gravitation entkommen und in das Weltall hinausdiffundieren. Mit fortschreitender Abkühlung begann Wasserdampf zu kondensieren und bildete ab etwa 2,3 Mrd. Jahren vor heute die Weltmeere, in denen sich gewaltige Mengen Kohlendioxid und Schwefelwasserstoff lösten.

Bei Reaktionen mit anderen Inhaltsstoffen des Meerwassers sind aus ihnen Feststoffe geworden, die sich als Sediment auf dem Meeresboden abgelagert haben. Auf diese Weise erreichte das Wasser nie volle Sättigung, sodass ein ständiger Transport von der Atmosphäre über die Ozeane zu den Sedimenten aufrechterhalten blieb, der der Atmosphäre riesige Gasmengen entziehen konnte.

Wasser könnte auch noch auf anderem Wege auf die Erde gekommen sein: Wasser ist Bestandteil der Materie, aus dem sich das Sonnensystem gebildet hat. Es war sicherlich schon vor der Entstehung der Erde im Sonnensystem vorhanden. Man diskutiert deshalb auch, dass das Wasser in der Frühzeit durch Einschläge von Kometen, die man treffend als tiefgefrorene, gigantische Schneebälle beschreibt, auf die Erde gekommen ist. Die Kometen umkreisen zu Millionen als „**Oortsche Wolke**“ unser Sonnensystem. Es gibt Forscher, die glauben, dass viele Kleinkometen auch heute noch ununterbrochen auf die Erde treffen und in der hohen Atmosphäre verdampfen. (www.chemieunterricht.de/dc2/wasser/wstoffl.htm)

Durch die intensive ultraviolette Sonnenstrahlung wurden darüber hinaus ständig Ammoniak, Methan und Wasserdampf aufgebrochen. Der dabei freigesetzte Wasserstoff konnte kontinuierlich wegdiffundieren, die verbliebenen reaktionsfreudigen Kohlenstoff- und Sauerstoffmoleküle haben sich rasch verbunden, nur der chemisch träge Stickstoff überdauerte die Zeiten unverändert.

Auf diese Weise entstand im Lauf von 2,5 Mrd. Jahren eine **dritte Atmosphäre**. Sie enthielt im Wesentlichen Stickstoff, Kohlendioxid und Wasserdampf.

Damit ist aber die Entwicklungsgeschichte der Erdatmosphäre noch längst nicht zu Ende, denn bisher ist uns ja noch kein **Sauerstoff** begegnet. Wie und wann kam er in die Atmosphäre? Man könnte etwa an die Aufspaltung von Kohlendioxid und Wasserdampf durch energiereiche UV-Strahlung denken (Fotodissoziation). Diese Vorgänge wären aber nicht in der Lage gewesen, auch nur einen Bruchteil des in der Atmosphäre vorhandenen Sauerstoffs freizusetzen. Wir wissen heute, dass praktisch der gesamte Sauerstoff aus der Fotosynthese stammt, also von lebenden Organismen produziert wurde.

Es gibt Anhaltspunkte dafür, dass es bereits vor etwa 4 Mrd. Jahren Lebewesen gab, die die Fotosynthese beherrschten, die sogenannten **Cyanobakterien** (die oft fälschlich als „**Blualgen**“ bezeichnet werden). Dennoch dauerte es 2 Mrd. Jahre, bis sich das O_2 -Gas in der Atmosphäre auf etwa 1 % der heutigen Konzentration angereichert hatte. Bis dahin wurde nämlich fast der gesamte freigesetzte Sauerstoff durch Reaktion mit dem im Meerwasser vorhandenen Eisen und Schwefel sofort wieder gebunden.

Mit dem Überschreiten der 1%-Schwelle setzte ein für die weitere Entwicklung des Lebens sehr wichtiger Vorgang ein: die **Ozonbildung** (→ unten und Kap. 1.3.4, S. 26). Etwa zur gleichen Zeit, also vor rund 2 Mrd. Jahren, brachte auch die Evolution mit der Entwicklung der **Eukaryonten** einen gewaltigen Entwicklungsschub zustande. Eukaryonten sind pflanzliche Lebewesen mit einem hoch organisierten Zellaufbau und – was für uns besonders wichtig ist – der Fähigkeit, durch Veratmen von Fotosyntheseprodukten (Respiration) auf sehr effiziente Weise Lebensenergie freizusetzen. Die weniger hoch entwickelten Lebewesen konnten Energie lediglich aus der Vergärung gewinnen – ein Vorgang, der aber nur etwa 7 % der Atmungsenergie liefert. Damit war die Voraussetzung für eine rasante Ausbreitung des Lebens geschaffen, die ihrerseits zu einer vermehrten Sauerstoffproduktion führte. Gleichzeitig ging das oxidierbare Material in den Ozeanen zur Neige. Beides zusammen bewirkte, dass sich der Sauerstoffgehalt der Atmosphäre innerhalb von etwa 1 Mrd. Jahre verzehnfachte.

Vor 700 Mio. Jahren tauchten die ersten Vielzeller auf. Darüber hinaus hatte sich inzwischen eine Ozonschicht aufgebaut, die so viel ultraviolette Strahlung fernhielt, dass die Pflanzen vor etwa 420 Mio. Jahren das schützende Wasser verlassen und das Festland erobern konnten. Die damit verbundene explosionsartige Ausbreitung des Lebens ermöglichte innerhalb von 650 Mio. Jahren eine nochmalige Verzehnfachung der Sauerstoffkonzentration auf den heutigen Wert.

Aus der Reaktionsgleichung der Fotosynthese Strahlungs-Quant + $6 CO_2 + 6 H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6 O_2$ folgt, dass mit jedem Kohlenstoffatom, das organisch gebunden wird, gleichzeitig zwei Sauerstoffatome freigesetzt werden.

► Aus Nachbarwissenschaften

Der CO_2 -Gehalt der Erdatmosphäre wurde nicht nur über die Fotosynthese, sondern auch über die Ozeane gesenkt. In ihrem Wasser konnte sich sehr viel CO_2 lösen, das nach chemischen Umsetzungen (z. B. über die Kalkschalen von Meerestieren) in den Sedimenten deponiert wurde. Auf diese Weise fand ein ständiger CO_2 -Transport aus der Atmosphäre in die ozeanischen Sedimente statt. Auf der Venus ist es zu warm für eine Kondensation des Wasserdampfes und damit die Entstehung von Ozeanen. Deshalb haben sich dort bis heute so gewaltige CO_2 -Konzentrationen halten können.

Würde man das in den irdischen Sedimenten begrabene CO_2 wieder als Gas in die Atmosphäre zurückführen, würde sich dort eine ähnliche Konzentration einstellen wie auf der Venus.

Der Sauerstoffgehalt der heutigen – vierten – Atmosphäre wurde vor etwa 350 Millionen Jahren erreicht.

Nun kann man die Menge des aus abgestorbenen Organismen stammenden Kohlenstoffes in den Sedimenten der Erdkruste mit dem Sauerstoffgehalt der Atmosphäre vergleichen. Dabei wird man feststellen, dass der in Atmosphäre plus Ozeanen vorhandene Sauerstoff nur etwa 4 % des theoretischen Kohlenstoff-Äquivalentes ausmacht. 96 % sind demnach für die oben genannten Oxidationsvorgänge aufgewendet worden. Tatsächlich haben also die Pflanzen fast 25-mal so viel Sauerstoff produziert, wie wir heute vorfinden. Diese Zahlen sollen verdeutlichen, zu welch ungeheuren Leistungen die Vegetation fähig ist.

► Aus Nachbarwissenschaften

Auf unseren Nachbarplaneten Venus und Mars gibt es kein mit dem irdischen vergleichbares Leben. Infolgedessen hat dort auch keine entsprechende Fotosynthese stattgefunden. Die Massenproduktion von Sauerstoff, die wesentliche Voraussetzung für den Schritt von der dritten zur vierten Atmosphäre gewesen wäre, ist somit ausgeblieben.

Man kann deshalb stark vereinfacht sagen: Die Atmosphären dieser beiden Planeten sind in ihrer Entwicklung im Status der dritten Atmosphäre stehen geblieben. Sie enthalten noch heute im Wesentlichen CO_2 und N_2 .

Venus:

Kohlendioxid: 98 %
Stickstoff: 2 %

Mars:

Kohlendioxid: 96 %
Stickstoff: 3 %
Argon: 1 %

(Schönwiese, 2020)

1.3 Zusammensetzung der Erdatmosphäre und wirtschaftlich-ökologische Bedeutung der Atmosphärgase

Stickstoff	78,08%vol = 75,46 Gew. %
Sauerstoff	20,95%vol = 23,19 Gew. %
Argon	0,94%vol = 1,30 Gew. %

Dazu kommen in geringeren Konzentrationen:

Kohlendioxid (CO_2) im Jahr 2016	400 ppm
Neon (Ne)	18,2 ppm
Helium (He)	5,24 ppm
Methan (CH_4)	1,7 ppm
Krypton (Kr)	1,1 ppm
Wasserstoff (H_2)	0,56 ppm
Distickstoffoxid (N_2O)	0,32 ppm
Ozon (O_3), stratosph.	0,31 ppm
Kohlenmonoxid (CO)	50–200 ppb
Xenon (Xe)	90 ppb
Ozon (O_3), troposph.	30 ppb
FCKWs	4,84 ppb
Stickoxide (NO_x)	0,05–5 ppb
Radon (Rn)	$6 \cdot 10^{-7}$ ppb

sowie in Spuren:

Fluor, Jod, Schwefeldioxid, Ammoniak und Wasserstoffperoxid.

Der **Wasserdampfgehalt** ist sehr variabel; er kann bis zu 4 % vol betragen; als Mittelwert gilt 2,6 % vol. (bezüglich „ppm“ und „ppb“ → Seite 21; „stratosph.“ = „stratosphärischer Ozongehalt“; „troposph.“ = „troposphärischer Ozongehalt“).

1.3.1 Stickstoff

Der Stickstoff ist essenzieller Bestandteil der Aminosäuren, aus denen sich die Eiweißstoffe in den Zellen der Lebewesen aufbauen. Er spielt daher als Düngemittel in der gesamten Landwirtschaft eine außerordentlich wichtige Rolle.

Stickstoff ist ein chemisch sehr träges Gas. Er reagiert unter den uns umgebenden Bedingungen praktisch mit keinem anderen Element. Lediglich in der Hitze von Blitzentladungen (→ S. 114) geht er Verbindungen ein, die vom Regen ausgewaschen und in den Boden eingetragen werden. Im gewitterreichen Alpenvorland sollen auf diese Weise pro Jahr 15–20 kg Stickstoff je ha gebunden und den Pflanzen als Dünger zur Verfügung gestellt werden. Über den Festländern der Erde werden jährlich 100 Mio. t Stickstoff durch Blitze in Stickoxiden fixiert, ausgewaschen und dem Boden zugeführt (Simons, 1997).

Die meisten Pflanzen benötigen Düngestickstoff in Form von wasserlöslichen Salzen. Verschiedene Bodenbakterien, insbesondere die zur Gattung *Rhizobium* gehörenden Knöllchenbakterien, besitzen jedoch die bemerkenswerte Fähigkeit, für den Aufbau ihrer Eiweißsubstanzen den Stickstoff aus der Luft nutzen zu können. Da diese Bakterien mit Pflanzen aus der Ordnung der Leguminosen (Hülsenfrüchtler) in Symbiose leben, kommt der bakteriell gebundene Luftstickstoff auch den Wirtspflanzen zugute und gelangt schließlich als Dünger in den Boden. Durch den Anbau solcher Wirtspflanzen, zu denen z.B. die Erbse, die Bohne und die Lupine gehören, lässt sich die Stickstoffversorgung landwirtschaftlicher Nutzpflanzen deutlich verbessern. Die von ihnen jährlich gewonnenen Stickstoffmengen können bis zu 300 kg/ha (Nultsch, 1996), unter optimalen Bedingungen bis zu 400 kg/ha betragen. Das ist doppelt so viel wie für eine Weizen Qualitätsdüngung (maximal etwa 200 kg/ha und Jahr) erforderlich ist (Reiner, 1981).

Mit dem von den F. Haber und C. Bosch 1913 vorgestellten Verfahren, aus Luftstickstoff und Wasserstoff Ammoniak zu synthetisieren, ist die Atmosphäre zu einer außerordentlich wichtigen Rohstoffquelle geworden. Über 100 Mio. Tonnen Ammoniak werden damit jährlich hergestellt und zu Düngemitteln und anderen wichtigen Chemieprodukten weiterverarbeitet.

► Aus dem Alltag

Beim Haber-Bosch-Verfahren wird aus Luftstickstoff zusammen mit Wasserstoff bei einem Druck von etwa 300 bar und Temperaturen bis zu 600 °C über Katalysatoren Ammoniak synthetisiert.

Ammoniak ist ein wichtiges Ausgangsmaterial für viele chemische Produkte, z. B. Düngemittel. Über 90 % der weltweit produzierten Stickstoffdünger werden aus Ammoniak hergestellt. Ohne dieses Verfahren könnte die wachsende Weltbevölkerung nicht mehr ernährt werden. Heute hat ca. 40 % des im menschlichen Körper enthaltenen Stickstoffs schon mindestens einmal die Haber-Bosch-Synthese durchlaufen.

► Bekannte Persönlichkeiten

Haber, Fritz; Chemiker; * 9.12.1868 in Breslau; † 29.1.1934 in Basel; Direktor des Kaiser Wilhelm-Institutes für Physikalische Chemie; 1918 Nobelpreis für Chemie

Bosch, Carl; Ingenieur, Chemiker und Großindustrieller; * 27.8.1874 in Köln; † 26.4.1940 in Heidelberg; Vorstandsvorsitzender von BASF und IG Farben; 1931 Nobelpreis für Chemie.

1.3.2 Sauerstoff

Der aggressive Sauerstoff initiiert die unterschiedlichsten Oxidationsprozesse: Verbrennungsvorgänge genauso wie stille Oxidationen. Zu den Verbrennungsvorgängen zählen natürliche Feuer wie Wald und Steppenbrände, aber auch alle künstlichen, Energie spendenden Verbrennungsvorgänge, von der Raumheizung über die Elektrizitätserzeugung bis zum Automotor und Flugzeugtriebwerk. Stille Oxidationen sind z. B. das Rosten von Eisen, die Zersetzung organischen Materials oder Oxidationsprozesse, aus denen Pflanzen, Tiere und Menschen ihre Lebensenergie schöpfen, die sogenannte Veratmung.

► Aus dem Alltag

Das Gleichgewicht zwischen Sauerstoffverbrauch und Sauerstoffproduktion wird durch die ständig zunehmende Verbrennung fossiler Energieträger einseitig belastet. Dennoch besteht keine Gefahr eines folgenschweren O₂-Schwundes. Würde man alle ausbeutbaren fossilen Brennstoffe auf einmal verbrennen, würde sich die Sauerstoffkonzentration nur um etwa 1,5 % vermindern.

1.3.3 Argon

Das Argon ist seiner Natur nach ein Edelgas und als solches chemisch inaktiv. Es hat deshalb keine weitere Bedeutung.

1.3.4 Wichtige atmosphärische Spurengase

Die Bezeichnung Spurengase macht schon deutlich, dass die Luft nur winzige Mengen dieser Gase enthält. Würde man ihre Konzentration in %vol angeben, so würde man sehr unhandliche Zahlen bekommen. Man benützt daher die Einheit „ppm“ = parts per million. 1 ppm bedeutet: Auf je 1 Mio. Luftteilchen trifft 1 Teilchen Spurengas.

Aus dieser Definition ergeben sich die folgenden Zusammenhänge:

$$1 \text{ ppm} = 0,0001 \% \text{vol}; 1 \% \text{vol} = 10\,000 \text{ ppm}$$

Für noch geringere Konzentrationen verwendet man die Einheit „ppb“ = parts per billion. Bei einer Konzentration von 1 ppb trifft erst auf 1 Mrd. (10⁹) Luftteilchen 1 Teilchen Spurengas. (Um keine Verunsicherungen aufkommen zu lassen: Im Englischen bezeichnet man die Zahl 10⁹ – anders als im Deutschen – als „billion“).

Es gelten folgende Umrechnungsformeln:

1 ppm	=	0,0001 %vol
100 ppm	=	0,01 %vol
1 %vol	=	10 000 ppm
1 ppm	=	1000 ppb
1 ppb	=	0,001 ppm
100 ppb	=	0,1 ppm

Trotz scheinbar vernachlässigbarer Mengen haben die atmosphärischen Spurengase in der modernen Meteorologie große Bedeutung erlangt. Zu ihnen zählen nämlich insbesondere diejenigen, die den sogenannten **atmosphärischen Glashauseffekt** hervorrufen und dadurch einen erheblichen Einfluss auf unser Klima ausüben. Wie es zum Glashauseffekt kommt, wird im → Kapitel 3.3.3 besprochen; auf welche Weise er unser Klima beeinträchtigt, wird ab → Seite 173 diskutiert.

Kohlendioxid (CO₂)

Das atmosphärische Kohlendioxid ist die Quelle, aus der die grünen Pflanzen den für den Aufbau ihrer Körpersubstanz benötigten Kohlenstoff beziehen. Da alle tierischen Lebewesen einschließlich der Menschen letzten Endes von den Pflanzen leben, ist dieses Spurengas als Grundstoff jeglichen organischen Materials auf der Erde zu sehen.

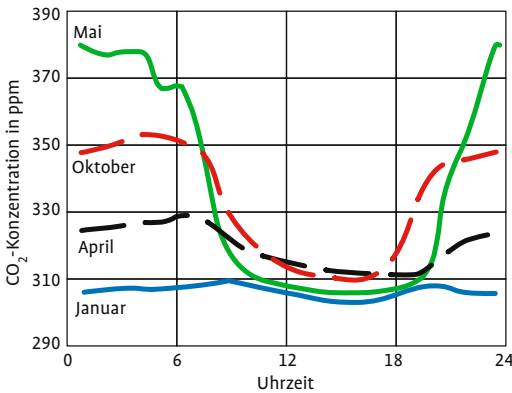
Der Assimilations- oder Fotosyntheseprozess, der diesen Stoffaufbau ermöglicht, benötigt Sonnenstrahlung als Energiequelle und kann deshalb nur tagsüber ablaufen. Gleichzeitig setzen die Pflanzen jedoch – genauso wie auch die tierischen Lebewesen – ständig durch Veratmung Kohlendioxid frei. Man nennt diesen Vorgang **Respiration**. Einzelheiten dazu findet man z.B. bei Larcher (2001). Betrachten wir beide Vorgänge zusammen, so ergibt sich das folgende Gesamtbild: Am Tag entnehmen die Pflanzen durch Assimilation aus der Luft mehr Kohlendioxid, als sie durch Respiration zurückgeben. In der Nacht, wenn keine Assimilation stattfindet, wird die Luft wieder mit Kohlendioxid angereichert. Als Folge davon findet man insbesondere in ländlichen Gegenden in Bodennähe einen ausgeprägten **Tagesgang** (Tagesgang ist der meteorologische Fachausdruck für Tagesverlauf) der CO₂-Konzentration mit einem Maximum in der Nacht und einem Minimum am Tag. Besonders groß ist die Tag-Nacht-Schwankung während der Hauptvegetationszeit von Mai bis September (→ Abb. 1.2).

Der Jahresgang der CO_2 -Konzentration erklärt sich aus der jahreszeitlich wechselnden, also der außer-tropischen Vegetation der jeweiligen Erdhalbkugel. Auf der Nordhalbkugel zeigt er ein Maximum in den Monaten März bis April nach der Winterruhe und ein Minimum zum Ende der Vegetationszeit im Oktober oder November. Während der Wachstumsperiode wird der Atmosphäre kontinuierlich CO_2 entzogen und ab Herbst durch Veratmung wieder zugeführt. Mit Beginn der Heizperiode kommt es darüber hinaus zu einer verstärkten anthropogenen Kohlendioxid-

oxidfreisetzung. Auf der Südhalbkugel fällt das Maximum aus analogen Gründen in die Monate Oktober oder November und das Minimum in den April oder Mai. Da die Nordhalbkugel sehr viel mehr vegetationsbedeckte Festlandsfläche besitzt als die Südhalbkugel ist leicht einzusehen, dass die Amplitude der Jahresschwankung auf der nördlichen Hemisphäre deutlich größer ausfällt als auf der südlichen. Abbildung 1.3 zeigt den Jahresgang der CO_2 -Konzentration in den verschiedenen geografischen Breiten der Erde in stark schematisierter Form.

Abb. 1.2

Tagesgang der Kohlendioxid-Konzentrationen in einer ländlichen Gegend (nach Oke, 1992).

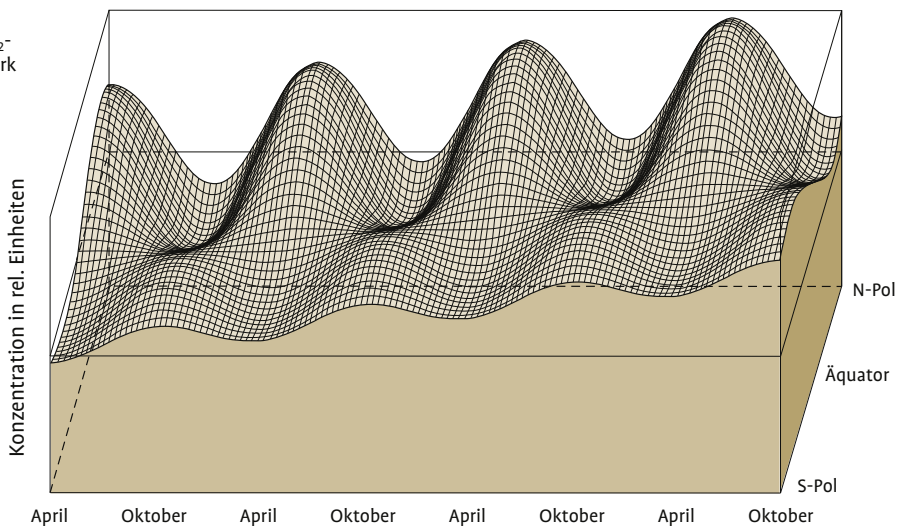


Trotz offensichtlicher Zeichen einer sich anbahnenden Klimaänderung werden weltweit von Jahr zu Jahr mehr Kohle, Erdöl und Erdgas verbrannt, was zu einer ständig wachsenden CO_2 -Belastung der Atmosphäre führt. Heute (2019) werden auf diese Weise jährlich etwa 36 Gigatonnen freigesetzt (1 Gigatonne = 1 Gt = 1000 Millionen Tonnen), täglich also um die 100 Millionen Tonnen.

Seit Beginn der Industrialisierung zur Mitte des 18. Jahrhunderts ist der CO_2 -Gehalt der Luft von damals 280 ppm mit anhaltender Beschleunigung auf den heutigen Wert von etwa 410 ppm gewachsen – im Jahr 2000 hatte die Konzentration noch um die 370 ppm betragen. Während sich die Steigerungsrate anfänglich um 0,2 ppm pro Jahr

Abb. 1.3

Jahresgang der CO_2 -Konzentration (stark schematisiert).



bewegte, liegt sie heute bereits bei etwa 2,5 ppm pro Jahr. (Diese Zunahme ist auch in Abbildung 1.3 stark schematisiert angedeutet).

► Aus dem Alltag

Zwischen 1990 und 2017 ist die weltweite jährliche CO₂-Emission von 23 Gt (1 Gigatonne = 1000 Mio. Tonnen) um 52 % auf 36 Gt gestiegen. Im gleichen Zeitraum ist sie in Deutschland von gut 1 Gt um 24 % auf knapp 0,8 Gt zurückgegangen. Die deutschen Hauptverursacher sind:

Energiewirtschaft	38 %
Verarbeitendes Gewerbe	16 %
Verkehr	19 %
Haushalt	17 %
Industrieprozesse	4 %
Restliche	6 %

Weitere Informationen: UBA über QR-Abruf.



Damit erfährt der globale **Kohlenstoff-Kreislauf** noch eine anthropogen bedingte Erweiterung (**Bitte beachten:** Wir sprechen jetzt nur vom **Kohlenstoff-Anteil** der verschiedenen Kreislauf-Komponenten; CO₂ besteht zu 1/4 aus Kohlenstoff).

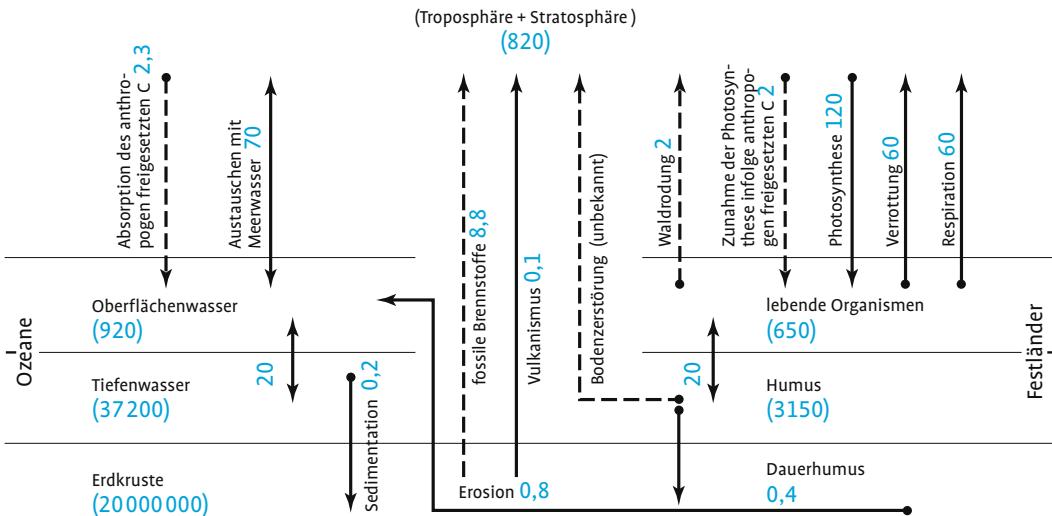
Er ist in Abbildung 1.4 in vereinfachter Form dargestellt. Die in den einzelnen Speichern (Atmosphäre, Ozeane, Festländer, ...) enthaltenen Mengen sind blau gedruckt, in Klammern gesetzt und in Gt Kohlenstoff angegeben. Die Pfeile beschreiben die Kohlenstofftransporte. Die durchgezogenen stellen natürliche Ströme dar, die gestrichelten bezeichnen die auf menschliche Aktivitäten zurückgehenden. Die transportierten Mengen sind blau gedruckt und in Gt Kohlenstoff pro Jahr ausgewiesen.

Die ergiebigste anthropogene Quelle stellt das Verbrennen von Kohle, Erdöl und Erdgas – kurz gesagt fossiler Brennstoffe – dar. Sie liefert jährlich 8,8 Gt Kohlenstoff. Die Waldrodungen schlagen mit 2 Gt Kohlenstoff zu Buche. Das ergibt zusammen eine jährliche Menge von 10,8 Gt Kohlenstoff.

Eine wichtige Kohlendioxidsenke ist das Wasser der Weltmeere. Es entzieht der Atmosphäre jedes Jahr 2,3 Gt anthropogen emittierten Kohlenstoff. Die Vegetation reagiert auf das gesteigerte Kohlendioxid-Angebot mit verstärktem Wachstum und bindet dadurch jährlich zusätzliche 2 Gt Kohlenstoff.

Abb. 1.4

Globaler Kohlenstoffkreislauf (Zahlenangaben nach Schönwiese, 2020, und anderen).



Das zusätzliche Kohlendioxid stammt aber nicht nur aus der Verbrennung fossiler Energieträger. Gewaltige Mengen – mehr als 2 Gt – werden bei der Rodung von Wäldern und der Zerstörung des Bodens freigesetzt, wobei von letzterem keine genügend belastbaren Zahlen vorliegen.

Bei der natürlichen Vegetation ist das Gleichgewicht zwischen der Kohlenstoff-bindenden Photosynthese (120 Gt) auf der einen Seite sowie der Kohlenstoff-produzierenden Verrottung (60 Gt) und Veratmung (die sogenannte Respiration, z. B. bei Dunkelheit) auf der anderen Seite (60 Gt) weltweit ausgeglichen.

Zu beängstigenden Konzentrationen kommt es in industriellen Ballungsgebieten, wo Werte weit über 450 ppm gemessen werden. In einem extremen Fall (Londoner Smog) hat man schon 3000 ppm, also fast die 10fache Normalmenge gefunden (Möller, 1973) (→ Kap. 2.3.2, S. 86).

► Aus dem Alltag

CO₂-Ausstoß von Verkehrsmitteln pro Person in kg/100 km:

• Pedelec:	0,4
• Fernlinienbus:	2,3
• IC; ICE:	3,6
• Elektro-PKW mit 2 Personen besetzt:	6,2
• ÖPNV:	6,4
• Diesel-PKW Mittelklasse; mit 2 Personen besetzt:	8,1
• Flugzeug:	21,1



Quelle: WDR-Verbrauchsrechner (über QR-abrufbar).

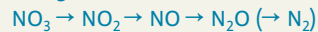
Distickstoffoxid (N₂O)

Distickstoffoxid, auch unter dem Namen **Lachgas** bekannt, ist in der Atmosphäre mit 0,32 ppm vertreten. Nach Crutzen (1983) stammen etwa 7 Mio. t pro Jahr aus natürlichen Quellen. Zu ihnen zählen die Wald-, Busch- und Steppenbrände, die 2 Mio. t pro Jahr liefern, das Ausgasen aus Ozeanen, das ebenfalls 2 Mio. t pro Jahr und die Bodenatmung, die 3 Mio. t pro Jahr freisetzt. Weitere 8 Mio. t pro Jahr werden aus anthropogenen Quellen freigesetzt: teils durch das Verbrennen fossiler Energieträger, teils durch die in der landwirtschaftlichen Produktion verwendeten Düngemittel.

Neuerdings (Schönwiese, 2020) werden jedoch erheblich höhere anthropogene Beiträge genannt. Einschlägige Forschungsergebnisse deuten außerdem darauf hin, dass bis zu 90 % des anthropogen produzierten N₂O aus der Landnutzung stammen könnten.

Der Zusammenhang zwischen Düngemitelein-satz und N₂O-Bildung stellt sich folgendermaßen dar: Wenn im Boden viel Wasser und wenig Luft vorhanden ist – man spricht dann von anaeroben Verhältnissen – breiten sich Bakterienarten aus, die den für ihre Lebensvorgänge notwendigen Sauerstoff aus dem stufenweisen Abbau von Nitratradikalen beziehen.

Dabei läuft folgende Reaktionskette ab:



Bei jedem Reaktionsschritt wird Sauerstoff abgegeben.

Man nennt diesen Vorgang **mikrobielle Denitrifikation**. Die in die Reaktionsfolge eintretenden Nitrate stammen entweder aus Kunstdünger oder sind unter aeroben Verhältnissen von entsprechenden Bodenbakterien aus leicht zersetzbarem organischem Dünger, z. B. Gülle, aufgebaut worden. Beschleunigend wirken: hoher Bodenwassergehalt – insbesondere Staunässe – oder Bodenverdichtungen jeweils bei gleichzeitig hohen Bodentemperaturen. Vorgänge dieser Art laufen selbstverständlich auch außerhalb landwirtschaftlicher Nutzflächen ab, wenn auch langsamer. Das dabei entstehende N₂O wurde oben in die Bodenatmung mit einbezogen.

Der Gehalt der Luft an Distickstoffoxid hat in den letzten Jahren kontinuierlich zugenommen. Aus Messungen an den US-amerikanischen Baseline-Stationen weiß man, dass seine Konzentration jedes Jahr um 0,75 ppb steigt. Abgebaut wird Lachgas fast ausschließlich in der Stratosphäre unter Bildung Ozon zerstörender NO_x-Radikale. Wegen seines auf rund 4 % bezifferten Beitrags zum atmosphärischen Glashauseffekt zählt es zu den **klimarelevanten Substanzen**.

Methan (CH₄)

Die Atmosphäre enthält im Durchschnitt etwa 1,81 ppm Methan. Neben natürlichen Quellen tragen auch menschliche Aktivitäten zur Produktion dieses stark **klimarelevanten Gases** bei. Sein

Beitrag zum Glashauseffekt wird auf 16 % geschätzt. Khalil und Rasmussen (1982) beziffern die beim Reisanbau freigesetzte Methanmenge auf jährlich 95 Mio. t. Im Verdauungstrakt der etwa 1,3 Mrd. auf der Erde lebenden Rinder und anderer Wiederkäuer entstehen durch bakterielle Zersetzung von Zellulose schätzungsweise 130 Mio. t pro Jahr. Bei der Verbrennung von Biomasse werden weitere 25 Mio. t und durch andere anthropogene Aktivitäten (Umgang mit Erdgas, Kohlebergbau und Mülldeponien) schließlich noch einmal 130 Mio. t in die Atmosphäre abgegeben. Das macht zusammen rund zwei Drittel der Jahresproduktion aus. Der Rest stammt aus natürlichen Quellen. Hierunter fällt auch die in der jüngsten Zeit diskutierte Methanproduktion durch Termiten, die auf ähnliche Vorgänge zurückgeht wie die in den Rinderpansen.

Man kann davon ausgehen, dass die Methankonzentration derzeit jährlich um 4 ppb steigt. Sollten als Folge von Klimaänderungen die sogenannten **Permafrostböden**, das sind ganzjährig gefrorene Böden in den hohen geografischen Breiten, auftauen, dann werden heute noch unabsehbare CH_4 -Mengen zusätzlich freigesetzt. (Neuere Zahlen bei Schönwiese, 2020)

Bolin et al. (1986) konnten einen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem Methangehalt der Luft und der Weltbevölkerung nachweisen. Danach steigt die Konzentration um 0,22 ppm pro Mrd. Menschen. Abgebaut wird Methan in erster Linie durch Reaktion mit OH-Radikalen, durch Vorgänge in der hohen Atmosphäre und durch Bodenbakterien.

► Aus dem Alltag

Bei Verbrennungsvorgängen, beim Umgang mit Erdgas, bei der landwirtschaftlichen Produktion (Nassreisanbau) und bei der Viehhaltung wird doppelt so viel Methan freigesetzt wie aus natürlichen Quellen.

Halogenierte Kohlenwasserstoffe

Diese Stoffgruppe ist auch unter Namen wie Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe, Chlorfluormethane oder FCKWs bekannt. Sie bestehen aus Kohlenwasserstoffen, bei denen ein oder mehrere Wasserstoffatome durch Chlor- oder Fluoratomer ersetzt sind. Die am häufigsten verwendeten sind

CFCl_3 und CF_2Cl_2 , bekannt unter den Handelsnamen F11 und F12.

Im Gegensatz zu den bisher genannten atmosphärischen Spurenstoffen stammen sämtliche FCKWs aus menschlicher Produktion. Bevor im „Montrealer Protokoll“ von 1987 vereinbart wurde, ihre Herstellung zu stoppen, wurden sie hauptsächlich als **Kühlmittel** in Kühlschränken und Klimaanlage, als **Reinigungsmittel** insbesondere für elektronische Bauteile oder als **Treibmittel** zur Schaumstoffproduktion und in Spraydosen eingesetzt. Ihren verbreiteten Einsatz verdankten diese Stoffe vier außerordentlich wichtigen Eigenschaften: **Erstens** lassen sie sich leicht verflüssigen (Kühlmittel), **zweitens** sind sie chemisch äußerst reaktionsträge, gehen also keine Verbindungen ein, **drittens** sind sie nicht giftig und schließlich **viertens** nicht brennbar.

Aber gerade die chemische Stabilität ist es, die den Klimaforschern und Luftchemikern seit vielen Jahren Sorgen bereitet. Da die halogenierten Kohlenwasserstoffe nämlich in der unteren Atmosphäre (Troposphäre) keine Reaktionspartner finden, gelangen sie bis in Höhen über 20 km hinauf, wo sie auf die dort vorhandene Ozonschicht treffen. Die in dieser Höhe herrschenden physikalischen und chemischen Bedingungen ermöglichen den FCKWs Reaktionen, die schließlich zum Abbau dieser Schicht führen. Darüber hinaus leisten sie einen Beitrag zum atmosphärischen Glashauseffekt, der vor dem Produktionsstopp auf bis zu 11 % beziffert wurde.

Ozon (O_3)

Ozon ist ein dreiatomiger Sauerstoff. Er entsteht in Höhen zwischen etwa 10 und 50 km unter der Wirkung der ultravioletten Sonnenstrahlung aus gewöhnlichem Sauerstoff. Seine maximale Konzentration von 8 bis $10 \mu\text{g/g}$ Luft – das sind knapp 10 ppm – erreicht es je nach geografischer Breite in 15 bis 30 km Höhe. Seine mittlere Höhenverteilung ist in Abbildung 1.15 (→ S. 47) dargestellt.

► Merke

In der Fachliteratur findet man Vertikalverteilungen der Ozonmenge häufig als Ozon-Partialdruck angeben. Als Einheit wird üblicherweise Nanobar (nbar) verwendet; $1 \text{ nbar} = 10^{-9} \text{ bar}$. Auch im vorliegenden Buch wurde diese Darstellungsform gewählt. Sie

gestattet eine bequeme Berechnung des Volumen-Mischungsverhältnisses Ozon zu Luft. Dazu braucht man nur den Partialdruck des Ozons durch den Gesamtluftdruck in der betreffenden Höhe zu dividieren.

Ozonbildung und Ozonabbau

Der Entstehungsprozess stellt sich – nach der **Chapman-Theorie** – in vereinfachter Form folgendermaßen dar: Zunächst wird in einem ersten Schritt (1) molekularer Sauerstoff durch sogenannte **harte**, also besonders kurzwellige und damit energiereiche **UV-Strahlung** mit Wellenlängen $\leq 0,24\mu\text{m}$ in einzelne Sauerstoff-Atome gespalten. Man nennt einen solchen Vorgang **Fotodissoziation**. Im zweiten Schritt (2) reagieren diese mit benachbarten O_2 -Molekülen und bilden unter Mitwirkung eines Stoßpartners M ein Ozonmolekül. M trägt die überschüssige Reaktionsenergie in Form von kinetischer Energie – also Wärme – fort (Molekular kinetische Theorie), bleibt aber selbst unverändert.

Diesem **Aufbauprozess** steht ein parallel ablaufender **Zerfallsprozess** gegenüber. Dabei wird im ersten Schritt (3) wiederum durch Fotodissoziation aus einem Ozonmolekül ein atomarer Sauerstoff freigesetzt, der in einem zweiten Schritt (4) mit einem weiteren Ozonmolekül reagiert. Dabei entstehen zwei gewöhnliche Sauerstoffmoleküle. Für die Reaktion (3) reicht erheblich energieärmere Strahlung mit Wellenlängen $\leq 1,1\mu\text{m}$ aus; UV-Strahlung mit Wellenlängen $\leq 0,3\mu\text{m}$ führt bei diesem Vorgang zur Entstehung einer sehr reaktionsfreudigen Form von atomarem Sauerstoff, der beim Abbau der Ozonschicht im Rahmen der sogenannten Ozonloch-Problematik eine große Rolle spielt (→ siehe unten).

- (1) $\text{Quant} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}$ (Wellenlänge $\leq 0,24\mu\text{m}$)
- (2) $\text{O} + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{O}_3 + \text{M} + \text{Wärmeenergie}$
- (3) $\text{Quant} + \text{O}_3 \rightarrow \text{O} + \text{O}_2$ (Wellenlänge $\leq 1,1\mu\text{m}$)
- (4) $\text{O} + \text{O}_3 \rightarrow 2 \text{O}_2$

Diese vier Prozesse zusammen führen zu einem Konzentrationsgleichgewicht.

Von erheblicher Tragweite sind die zu den Reaktionen (1) und (3) führenden Absorptionsvorgänge. Sie führen dazu, dass über 50% der ankommenden UV-Strahlung von der Erde ferngehalten

werden. Vor allem die besonders gefährlichen kurzen Wellenlängen, also das harte UV wird durch die Ozonschicht aus der Sonnenstrahlung praktisch restlos herausgefiltert. Welche Wellenlängen davon im Einzelnen betroffen sind, zeigt die Abbildung 3.12. Wie dadurch die Spektralverteilung der Sonnenstrahlung verändert wird, sieht man in Abbildung 3.8.

► Bekannte Persönlichkeiten

Chapman, Sidney; Geophysiker und Mathematiker; * 21.1.1888 in Eccles bei Manchester; † 16.6.1970 in Boulder. Bedeutende Arbeiten zur kinetischen Gastheorie, zum Erdmagnetismus, über Polarlichter, Sonnenplasma und Ozon.

Ozon bildet sich bevorzugt in den niederen Breiten, weil dort die Sonnenstände und damit die Strahlungsintensität besonders hoch sind. Polwärts lässt die Produktion rasch nach. Messungen in höheren Breiten ergeben jedoch größere Ozonwerte als aufgrund theoretischer Betrachtungen zu erwarten wäre. Diese Diskrepanz lässt sich nur mit einem kontinuierlichen Ozontransport von der Äquatorialregion zu den höheren Breiten erklären. Es ist naheliegend, danach zu fragen, warum sich das Ozon nur in der begrenzten Höhengschicht zwischen 10 und 50 km bildet. Die Antwort ist einfach: Beim Passieren der Ozonschicht wird infolge der dort ablaufenden Reaktionen (1) und (3) bereits so viel UV-Strahlung absorbiert, dass in tieferen Etagen für die Reaktion (1) des Syntheseprozesses nicht mehr genügend zur Verfügung steht. Dass die Ozonkonzentration oberhalb von 40 km rasch zurückgeht, liegt daran, dass mit zunehmender Höhe der Luftdruck und damit die Luftdichte zurückgeht – die Luft immer „dünner“, wie man landläufig sagt – und damit das Ausgangsmaterial, der Sauerstoff, immer weniger wird.

Die Reaktion (2), so haben wir gesehen, ist eine exotherme Reaktion, eine Reaktion also, bei der Wärmeenergie freigesetzt wird. Diese führt zu einem deutlichen Anstieg der Lufttemperatur im Bereich der Ozonschicht. Dadurch wird die mit der Höhe fortschreitende Abkühlung der Atmosphäre gestoppt – mehr noch, zwischen etwa 20 und gut 40 km Höhe steigt die Temperatur sogar stetig an, d. h. es baut sich eine sogenannte Inversion auf, die die gesamte Dynamik der unteren

Atmosphäre, insbesondere die Wettervorgänge und den Vertikaltransport atmosphärischer Spurengase und Aerosole, entscheidend beeinträchtigt.

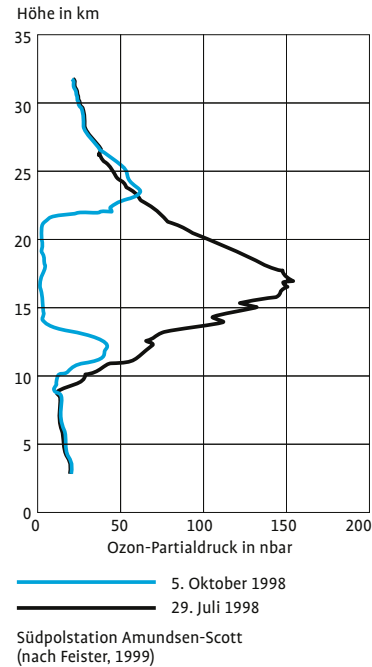
1985 wurde erstmals beobachtet, dass zum Ende des Polarwinters hin über der Antarktis eine dramatische Abnahme der Ozonkonzentration stattfindet. Auch in den Folgejahren setzte jeweils im September und Oktober insbesondere in Höhen zwischen 15 und 25 km ein rapider Ozonverfall ein, der jedes Jahr etwas stärker wurde. Man sprach kurzerhand vom Ozonloch. Das ist natürlich Unsinn, denn es handelt sich ja nicht um ein „Loch“ in der Ozonschicht, sondern um einen Konzentrationsrückgang, der allerdings beachtliche Dimensionen annahm. Die Abbildung 1.5 stützt sich auf Messergebnisse von der Südpolstation Amundsen-Scott. Die schwarze Kurve zeigt die Ozon-Höhenverteilung vom 29. Juli 1998, von einem Zeitpunkt also, an dem ganz normale Verhältnisse geherrscht haben. Man erkennt ein Konzentrationsmaximum in etwa 17 km Höhe mit einem Partialdruck von etwas über 150 nbar. Die blaue Kurve wurde am 29. Oktober 1998 erhoben, also mitten während einer „Ozonloch“-Episode. Wie man sieht, bricht die Konzentration in einer Höhe von etwa 13 km sehr stark ein, bewegt sich dann bis etwa 22 km Höhe nur wenig oberhalb Null, um dann, innerhalb von nicht einmal 2 km, wieder auf den gewohnten Wert zu springen.

Mögliche Auswirkungen eines Ozonschwundes

Nachdem man den Rückgang der Ozonkonzentration über der Antarktis festgestellt hatte, kam die Befürchtung auf, der Ozon-Verlust könnte die ganze Atmosphäre erfassen, zumal man auch in niedrigeren Breiten eine – allerdings weniger spektakuläre – Ozonabnahme festgestellt hatte: Am Meteorologischen Observatorium auf dem Hohenpeißenberg (nördlich von Garmisch-Partenkirchen), wo seit den 1960er-Jahren Ozonforschung getrieben wird, hat man einen jährlichen Rückgang von durchschnittlich 0,2 % beobachtet (Wege et al. 1988). Der Rückgang des Ozons bedeutet aber gleichzeitig eine Zunahme der UV-Strahlung. Eine einfache Faustregel der Luftchemiker besagt: **Jedes Prozent Ozonverlust lässt zwei Prozent mehr UV-Strahlung zur Erdoberfläche durchdringen.**

Abb. 1.5

Ozonkonzentration in Abhängigkeit von der Höhe unter normalen Bedingungen (schwarz) und während einer „Ozonloch“-Episode (blau).



Man begann abzuschätzen, welche Folgen eine weitere Ozon-Abnahme und damit ein Anstieg der UV-Bestrahlung für das Leben auf der Erde haben könnten. So ergaben Modellrechnungen, dass eine 5 %ige Abnahme der Ozonkonzentration ein um 10 % erhöhtes Hautkrebsrisiko bewirken würde. Das bedeutet z. B. allein für die USA jährlich 40 000 neue Fälle. Aus anderen Modellrechnungen geht hervor, dass 1 % Ozonabnahme nach 20 Jahren das Risiko, an einem Nicht-Melanom-Hautkrebs zu erkranken, um 3 % erhöht. Weitere Folgen eines Ozonschwundes wären Hautverbrennungen, Augenerkrankungen und Schäden am Immunsystem. 1 % weniger Ozon hat 0,6 bis 0,8 % mehr Fälle von Augenlinsentrübungen zur Folge.

Unter den Pflanzen gelten eine Reihe von Nahrungs- und Futterpflanzen, darunter die Sojabohne, als außerordentlich UV-empfindlich. Eine Untersuchung hat gezeigt, dass bei einer simulierten Ozonabnahme um 25 % die Nettoproduktion um 20 bis

25% sinken kann (Schönwiese und Diekmann 1987). Besonders folgenschwer wären Schäden an Mikroorganismen, insbesondere Algen, denn sie produzieren doppelt so viel Sauerstoff und binden doppelt so viel Kohlendioxid wie die grünen Pflanzen zusammen. Sie stehen zudem am Beginn einer Nahrungskette, die bis zum Menschen reicht.

Ursachen des Ozonschwundes

Angesichts solcher Gefahren hat man mit Nachdruck die Erforschung des Phänomens forciert und hat verschiedene Theorien entwickelt, von denen aber keine eine umfassende Erklärung zu liefern vermochte. Im Lauf der Zeit ist aber klar geworden, dass anthropogene Einflüsse beim Ozonabbau eine erhebliche, wahrscheinlich sogar die ausschlaggebende Rolle spielen. Heute weiß man, dass insbesondere die FCKWs, aber auch andere ähnliche Substanzen, eine gewaltige Zerstörungskraft entwickeln.

Ozonabbau durch FCKWs

Die Reaktionsfolge (5) bis (7) beschreibt den Ozonabbau durch FCKWs. Zunächst wird in Reaktion (5) unter der Einwirkung von harter UV-Strahlung ein Chlor-Atom abgespalten, das in Reaktion (6) unter Zerstörung eines Ozon-Moleküls oxidiert wird. Über die schon von oben bekannte Reaktion (3) werden O-Radikale produziert, die dem Chloroxid in (7) den Sauerstoff wieder entreißen. Das dabei frei werdende Cl-Atom – und das ist das Teuflische an diesem Vorgang – ist damit bereit, erneut in die Reaktion (6) einzutreten und ein nächstes Ozon-Molekül zu reduzieren. Bis zu 10 000-mal kann sich dieser Prozess wiederholen, ehe das Chlor anderweitig gebunden wird. **Man muss sich einmal klarmachen, was das bedeutet: Ein einziges FCKW-Molekül kann auf diese Weise bis zu 10 000 Ozonmoleküle zerstören.**

(5) $\text{Quant} + \text{CCl}_2\text{F}_2 \rightarrow \text{CClF}_2 + \text{Cl}$ (Wellenlänge $\leq 0,22 \mu\text{m}$)

(6) $\text{Cl} + \text{O}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{ClO}$

(3) $\text{Quant} + \text{O}_3 \rightarrow \text{O} + \text{O}_2$ (Wellenlänge $\leq 1,1 \mu\text{m}$)

(7) $\text{ClO} + \text{O} \rightarrow \text{Cl} + \text{O}_2$

Ähnliche katalytische Prozesse laufen auch mit Brom-Molekülen ab, die aus Feuerlöschern und Treibstoffen stammen, und schließlich wird das oben schon diskutierte N_2O in eine katalytische Reaktionskette einbezogen, bei der NO als Katalysator fungiert.

Angesichts der schwerwiegenden Folgen des stratosphärischen Ozonabbaus gelang es, das bis heute erfolgreichste Klimaschutzabkommen zu treffen: das **Montrealer Protokoll**. Die zunächst 48 Unterzeichnerstaaten verpflichteten sich darin zur Reduzierung und schließlich zur vollständigen Beendigung der Emission von chlor- und bromhaltigen Chemikalien, die atmosphärisches Ozon zerstören. Es wurde am 16.09.1987 abgeschlossen und trat am 01.01.1989 in Kraft. Im Laufe der Folgejahre traten dem Abkommen zahlreiche weitere Staaten bei. Die Vereinbarung zeigte rasch Wirkung: Der Anstieg der Konzentration gefährlicher FKW und FCKW verlangsamte sich innerhalb weniger Jahre und ging alsbald in einen kontinuierlichen Rückgang über. In einem im September 2014 von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) herausgegebenen Bericht heißt es, wenn sich die Entwicklung so fortsetze wie bisher, **werde das Ozonloch spätestens im Jahr 2050 kein Thema mehr sein. Das zeigt, wie erfolgreich engagierte internationale Abkommen sein können!**

Ozonbildung in der unteren Atmosphäre

Während in der höheren Atmosphäre, der sogenannten **Stratosphäre**, das Ozon abnimmt, wird es in der bodennahen Atmosphäre, der sogenannten **Troposphäre**, immer mehr. Zurzeit steigt dort der Ozongehalt pro Jahr um etwa 1,1%. Bei den Ozon-Messungen auf dem Hohenpeißenberg wurde sogar eine doppelt so schnelle Zunahme festgestellt. Allerdings ist dieser Anstieg nur auf der Nordhalbkugel zu beobachten. Gegenwärtig beträgt die bodennahe Ozon-Konzentration nördlich des Äquators im Mittel etwa 40 ppb. Auf der Südhalbkugel liegt sie nur um 10 bis 20 ppb. In Deutschland findet man üblicherweise Werte zwischen 25 und 45 ppb, hat aber auch schon Konzentrationen über 200 ppb gemessen.

Woher kommt eigentlich das Ozon der unteren Luftschichten? Zum Teil sickert es natürlich aus der Stratosphäre ein, seit einigen Jahrzehnten lässt sich aber auch eine zusätzliche anthropo-

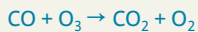
gen bedingte Komponente mit etwa 0,5 Gt pro Jahr nachweisen. Ozon entsteht nämlich in der untersten Atmosphärenetage sowohl aus Kohlenmonoxid als auch aus Kohlenwasserstoffen, wenn gleichzeitig Stickoxide und kurzweilige Strahlung vorhanden sind.

Beim Bildungsprozess aus Kohlenmonoxid läuft folgende Reaktionskette ab:

- (1) $\text{CO} + \text{OH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$
 - (2) $\text{H} + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{HO}_2 + \text{M}$
 - (3) $\text{HO}_2 + \text{NO} \rightarrow \text{OH} + \text{NO}_2$
 - (4) $\text{Quant} + \text{NO}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{O}$ (Wellenlänge $\leq 0,4 \mu\text{m}$)
 - (5) $\text{O} + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{O}_3 + \text{M}$
- Netto: $\text{CO} + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{O}_3$

(M sind für die Reaktion notwendige Stoßpartner).

Wie aus der Nettoreaktion zu erkennen ist, entsteht bei der Oxidation jedes CO-Moleküls ein Ozon-Molekül. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die Luft eine Mindestkonzentration an Stickoxiden (NO_x) enthält. Bleibt die Konzentration der Stickoxide unter dem kritischen Wert, so läuft eine ganz andere Reaktionsfolge ab, die netto zu folgender Gleichung führt:



In diesem Fall verschwindet also bei der Oxidation jedes CO-Moleküls ein Ozonmolekül.

Ähnliche, allerdings noch kompliziertere Vorgänge spielen sich auch bei der Oxidation von flüchtigen organischen Verbindungen, z. B. von Kohlenwasserstoffen, aber auch einer Reihe anderer organischer Spurengase ab. Neben Ozon entstehen dabei weitere, in ihrer Wirkungsweise dem Ozon verwandte Stoffe, die man als **Fotooxidantien** bezeichnet, z. B. Peroxiacetylnitrat (PAN) oder Wasserstoffsuperoxid.

Es wurde schon darauf hingewiesen, dass Vorgänge dieser Art überwiegend anthropogen verursacht sind. Man wird sich also fragen, woher die an diesen Reaktionen beteiligten Stoffe kommen. Die Stickoxide entstehen zwar zu einem geringen Teil auch auf natürlichem Wege z. B. bei Blitzentladungen ($\rightarrow$ S. 20). Der größte Teil stammt jedoch von heißen Verbrennungsprozessen, wie sie z. B. in fossil befeuerten Industrieanlagen oder Automotoren ablaufen. In Deutschland schlägt der Kraftverkehr etwa mit 60 % zu Buche.

Das Kohlenmonoxid entsteht bei der unvollständigen Verbrennung organischer Energieträger. Da praktisch alle Verbrennungsvorgänge mehr oder weniger unvollständig sind, wird dabei stets CO freigesetzt. Gut die Hälfte (2,6 Mrd. t pro Jahr) kommt aus anthropogenen Quellen, wobei der Kraftverkehr wieder die Spitzenstellung einnimmt. Auch die vorhin genannten, in der Luft vorhandenen flüchtigen organischen Verbindungen hat zu einem erheblichen Teil der Kraftverkehr zu verantworten. Sie entweichen beim Tanken, durch Verdunstung aus Kraftstofftanks und beim unvollständigen Verbrennen des Benzins. Nicht unerhebliche Mengen stammen aus den in Industrie und Haushalt verwendeten Lösungsmitteln.

Schäden durch troposphärisches Ozon

Wenn hier das troposphärische Ozon so ausführlich behandelt wird, dann liegt das daran, dass dieses Gas als sehr gefährlich eingeschätzt wird:

- Trotz seiner geringen Konzentration beträgt sein Anteil am atmosphärischen Glashauseffekt an die 10 %.
- Wegen seiner aggressiven Oxidationskraft löst es an allen Oberflächen verstärkt Korrosion aus.
- Ozon ist außerdem ein giftiges Gas. Gerade in den letzten Jahren hat man erkennen müssen, dass es eine ganze Reihe von Krankheiten auslösen kann. Sie reichen von Reizungen der Schleimhäute, der Atemwege und des Lungengewebes über Abnahme der körperlichen Leistungsfähigkeit bis zu Asthmaanfällen. In Ruhe werden zwar relativ hohe Ozonkonzentrationen toleriert. Bei starker körperlicher Belastung genügen jedoch bereits Konzentrationen von 180 bis 240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Luft, um Körperreaktionen hervorzurufen. Allergische Personen reagieren auf Ozon besonders empfindlich.
- An Pflanzen treten ab 80 ppb – das ist ein Wert, der bei strahlungsreichem Sommerwetter in unseren Breiten häufig überschritten wird – offensichtliche Schäden auf, sogenannte „Wetterflecken“. Sie zeigen an, dass Zellkörperchen, die den grünen Pflanzenfarbstoff tragen (Chloroplasten), sowie Zellwände zerstört sind (Berge und Jaag 1970). Zu versteckten Schäden, die aber zu einer Hemmung der Fotosyntheseleistung führen und sich damit bei landwirtschaftlichen Nutzpflanzen in Ertragsrückgängen bemerkbar machen, kommt es schon bei geringeren Konzentrationen. Heagle (1989) berich-