Astronomie und Astrophysik

Geophysik, Meteorologie und Klimatologie

von

Andreas Schwarz

28.05.2025

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....3

2 Geophysik….....4

2.1 Der Aufbau der Erde.....5

2.2 Die biologische und geologische Entwicklung der Erde.....6

2.3 Die Atmosphäre der Erde.....7

2.4 Solar-terrestrische Beziehungen.....7

2.5 Lunar-terrestrische Beziehungen.....11

3 Meteorologie.....14

3.1 Hochdruck und Tiefdrucksysteme…….....14

3.2 Wind…….....15

3.3 Wolken.....18

3.4 Niederschläge.....20

3.5 Gewitter.....21

3.6 Wettervorhersage.....23

4. Klimatologie.....26

4.1 Das Klimasystem und die Klimaelemente.....26

4.2 Gründe für Klimaschwankungen.....27

4.3 Messmethoden der Klimatologie.....27

4.4 Die natürliche Entwicklung des Klimas.....29

4.5 Der anthropogene Klimawandel.....30

5 Nachwort.....32

6 Literatur- und Quellenverzeichnis.....33

1 Einleitung

Dieses Kompendium behandelt als ausgesuchte Geowissenschaften die Geophysik, die Meteorologie und die Klimatologie. Die Erde nimmt als Planet eine Schnittstelle zwischen Astro- und Geophysik ein. Zu einem ist die Erde ein Planet und damit Gegenstand der Astrophysik. Zum anderen können wir diesen Planeten direkt und unmittelbar erforschen, womit die Geowissenschaften im Allgemeinen und die Geophysik im Speziellen eigenständige Wissenschaften sind. Wir können im Rahmen der Astrophysik vieles über die Planeten des Sonnensystems und über die Extrasolaren Planeten um andere Sterne lernen. Die daraus resultierenden Erkenntnisse wirken in die Geowissenschaften hinein. Auf der anderen Seite liefern die Geowissenschaften so detailreiche und viele Erkenntnisse über den Planeten Erde, dass diese als Referenz für andere Planeten verwendet werden können. Im Rahmen der Astrophysik spielen die Planetenphysik (im Falle der Erde Geophysik), Meteorologie und Klimatologie auch eine Rolle. So ist es nur folgerichtig, diese Bereiche auch im Rahmen der Astronomie und Astrophysik zu behandeln. Nachfolgend soll auf die Gegenstände der Geophysik, der Meteorologie und der Klimatologie kurz eingegangen werden.

Die Geophysik im weiteren Sinn beinhaltet alle physikalischen Wissenschaften, welche sich auf die Erde beziehen. Hierzu gehören auch die Meteorologie und die Klimatologie. Die Geophysik im engeren Sinn befasst sich mit der Physik der festen Erde. Dazu gehören unter anderem Seismologie und Vulkanologie. Die Physik der Atmosphäre ist Gegenstand der Meteorologie. Mit diesem Gebiet hat die Klimatologie die größten Schnittmengen. Weitere Gebiete sind die Geographie, die Ozeanographie, die Glaziologie (Physik des Eises) und die Geochemie, wobei diese Aufzählung nicht abschließend ist.

Im Rahmen der Geophysik wird die Erde als Planet betrachtet, vor allem deren innerer und äußerer Aufbau sowie die Bahnelemente und die Atmosphäre der Erde. Im Rahmen der solar-terrestrischen Beziehungen wird die vielseitige Wechselwirkung zwischen Erde und Sonne betrachtet, welche auch grundlegend für die irdische Meteorologie und Klimatologie ist. Des Weiteren werden die lunar-terrestrischen Beziehungen betrachtet, welche die Wechselwirkung zwischen Erde und Mond zum Gegenstand haben. Auch diese sind wichtig für die Meteorologie und Klimatologie der Erde. So stabilisiert der Mond die Erdachse, deren Neigung für die Jahreszeiten und die Klimazonen der Erde ursächlich ist. Die Gezeiten des Mondes sind außerdem wichtig für bestimmte Ökosysteme.

Gegenstand der Meteorologie ist die Physik und die Chemie der Atmosphäre. Hierbei beschäftigt sich Meteorologie unter anderem mit der kurzfristigen Entwicklung des Wetters. Definition: „*Das Wetter ist der physikalische Zustand in der Atmosphäre (Troposphäre, unterste Atmosphärenschicht) an einem bestimmten Ort oder in einem Gebiet zu einem bestimmten Zeitpunkt oder in einem kurzen Zeitraum von Stunden bis hin zu wenigen Tagen.“* Meteorologie beschäftigt sich allerdings umfassend mit den physikalischen Vorgängen in der Erdatmosphäre. Früher wurden die Niederschläge in Abgrenzung zu den Feuermeteoren (Sternschnuppen) als Wassermeteore bezeichnet, woher der Name Meteorologie herrührt.

Die Klimatologie ist eine interdisziplinäre Wissenschaft, ein Teilgebiet der Geophysik im weiteren Sinn. Eine umfangreichere Definition für das Klima lautet „*Das terrestrische Klima ist für einen Standort, eine definierbare Region oder ggf. auch globale statistische Beschreibung der relevanten Klimaelemente, die für eine nicht zu kleine zeitliche Größenordnung die Gegebenheiten und Variationen der Erdatmosphäre hinreichend ausführlich charakterisiert. Ursächlich ist das Klima eine Folge der physikochemischen Prozesse und Wechselwirkungen im Klimasystem sowie der externen Einflüsse auf dieses System.“* Allerdings soll auch eine kürzere und gebräuchliche Definition für das Klima angegeben werden: „*Das Klima ist der mittlere Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort oder in einem bestimmten Gebiet über einen längeren Zeitraum.“*

2 Geophysik

Die Erde ist mit einem Äquatordurchmesser von 12.756 km der größte unter den terrestrischen Planeten im Sonnensystem. Ihr Poldurchmesser beträgt 12.714 km, womit die Erde an ihren Polen abgeplattet ist. Die Masse der Erde beträgt $5{,}974 \cdot 10^{24}$ kg und ihre mittlere Dichte hat einen Wert von 5,515 g/cm³. Diese Größen werden auch als Referenz für andere Planeten benutzt. Die Erde ist der einzige Planet, auf dem es nachweislich Weise Leben gibt. Dieses bildet drei große Gruppen auf der Erde, die aufgrund ihrer Zellstrukturen unterschieden werden: Tiere, Pflanzen und Pilze. Die Menschen gehören zur Gruppe des tierischen Lebens. Allerdings haben diese eine kulturell-technischen Entwicklung durchgemacht und gehören damit zu den hochentwickelten intelligenten Lebensformen.

Die mittlere Entfernung der Erde von der Sonne beträgt rund 149.597.870,7 km und wird als Astronomische Einheit (AE) definiert. Diese dient als Entfernungsmaßstab im Sonnensystem. Die Bahn der Erde ist annähernd kreisförmig, d.h. ihre Bahn-Exzentrizität hat einen Wert von e = 0,0167, so dass ihre Entfernung zur Sonne zwischen rund 147.099.000 km (0,983 AE) und 152.096.000 km (1,0173 AE) schwankt. Bei einer mittleren Bahngeschwindigkeit von 29,78 km/s benötigt die Erde für einen Umlauf um die Sonne 365,256 Tage. Ihre Bahnneigung gegen die Ekliptikebene beträgt definitionsgemäß 0°, da die Ekliptikebene die Ebene der Erdbahn um die Sonne ist. Die Erde rotiert einmal in $23^{h}\ 56^{min}04^{s}$ um ihre eigene Achse und die Neigung ihrer Rotationsachse gegenüber der Ekliptik beträgt 23,44°.

Bild 1: Die Erde aufgenommen von Apollo 8 vom Mond aus / Quelle: NASA

2.1 Der Aufbau der Erde

Die Erde besteht aus einer Erdkruste, einem Erdmantel sowie einem äußeren flüssigen und inneren festen Erdkern. Die Erdkruste hat eine Dicke von rund 50 km und eine Dichte von rund 2,8 g/cm³. Die Temperaturen in der Kruste bewegen sich in einem Bereich von etwa 561 bis 996°C. Der Erdmantel gliedert sich in einen äußeren und einen inneren Mantel. Der äußere Mantel befindet sich in einem Tiefenbereich von etwa 50 bis 1000 km, hat eine Dichte von etwa 3,5 g/cm³ und eine Temperatur von etwa 2.600 °C. Der innere Mantel befindet in einer Tiefe von 1.000 bis 2.900 km. Die Dichte steigt dort auf rund 4,7 g/cm³ und die Temperatur auf 3.000 °C an. Der äußere flüssige Kern befindet sich in einem Tiefenbereich von 2.900 bis 5.100 km. Hier steigen die Dichte auf Werte von 9,0 bis 12,5 g/cm³ und die Temperatur auf 3.600 °C an. Der feste innere Kern befindet sich in einem Tiefenbereich von 5.100 bis 6.371 km und bildet das Zentrum. Dichte und Temperatur steigen auf 13 g/cm³ und 4.100 °C an. Der Erdkern besteht aus Eisen und Nickel. Alle Zahlenwerte sind natürlich auch mit Unsicherheiten behaftet.

Das Innere der Erde kann durch die Ausbreitung der Erdbebenwellen (Seismologie) studiert werden. Es gibt zwei Arten von Wellen. Die longitudinalen Kompressionswellen (p-Wellen) breiten sich senkrecht zu ihrer Fortpflanzungsrichtung aus. Dies ist zum Beispiel auch bei Schallwellen der Fall. Des Weiteren können sich p-Wellen in Flüssigkeiten ausbreiten, also auch durch den flüssigen äußeren Erdkern gehen. Transversalwellen (s-Wellen) breiten sich seitlich zu ihrer Fortpflanzungsrichtung aus. Licht bzw. elektromagnetische Wellen sind Transversalwellen. Sie können sich allerdings nicht in Flüssigkeiten ausbreiten.

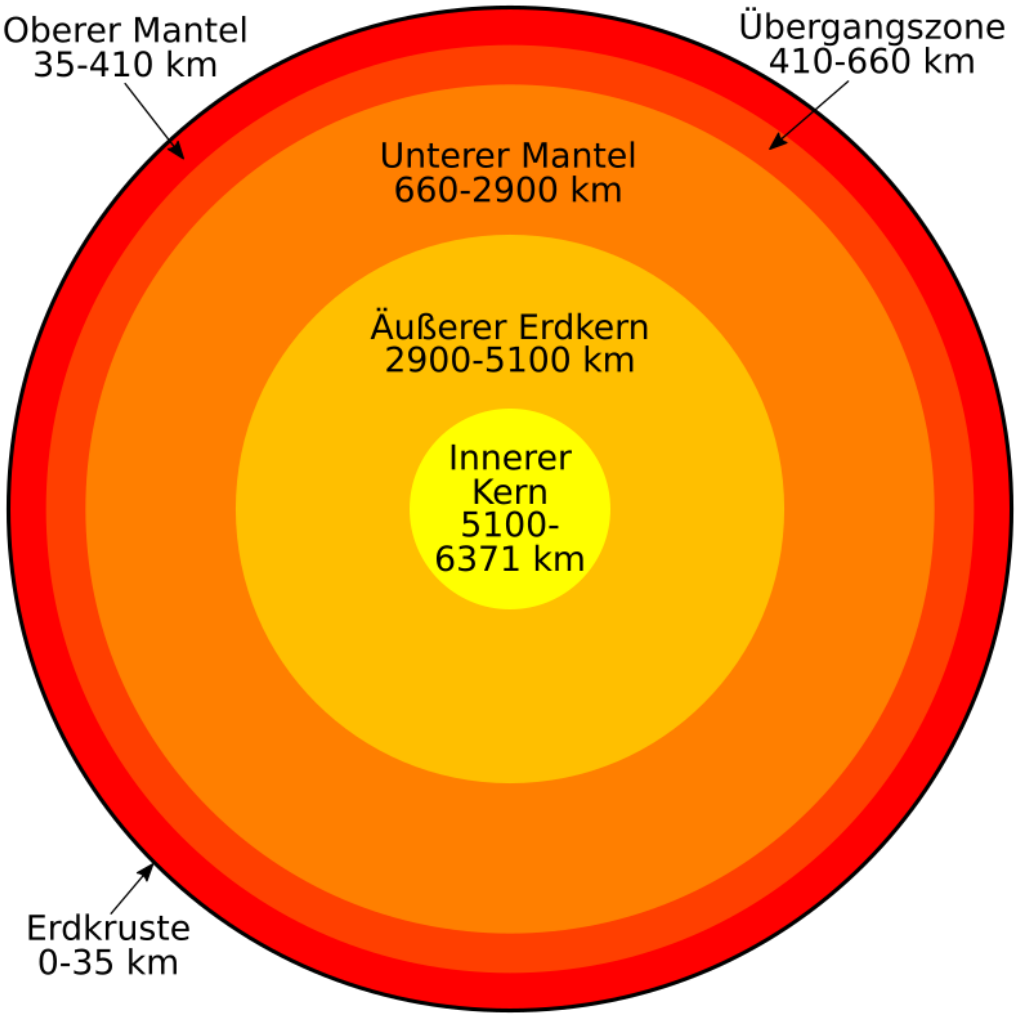

Bild 2: Der innere Aufbau der Erde / Graphik von Wikipedia (Gemeinfrei)

Der hohen Temperaturen bzw. der geschmolzene äußere Kern haben ihre Ursache in thermischer Energie, welche vom Erdentstehungsprozess noch übrigblieb und aufgrund von radioaktiven Zerfallsprozessen noch weiterhin nachgeliefert wird. Die flüssige Materie liegt zum Teil als Plasma vor, besteht also aus geladenen Teilchen. Durch die Erdrotation bilden die geladenen Teilchen einen elektrischen Strom, welcher zu einem Dynamoprozess führt und annähernd ein Dipolfeld generiert. Dieses hat am Erdäquator eine Stärke von 0,31 Gauß. Die Magnetfeldachse dieses Feldes ist um 12° gegenüber der Rotationsachse der Erde geneigt. Das Magnetfeld der Erde ändert sich in Perioden von etwa Zehntausend bis Hunderttausend Jahren. Zurzeit nimmt die Feldstärke langsam ab. Die Magnetosphäre der Erde wird auf der sonnenzugewandten durch den Sonnenwind (Teilchenstrahlung der Sonne) gestaucht und reicht dort etwa 10 Erdradien weit in den Raum. Auf der sonnenabgewandten Seite der Erde bildet die Magnetosphäre hingegen einen Schweif, welcher etwa 100 Erdradien in den Raum reicht. Die Magnetosphäre schützt die Erde vor für Leben gefährlicher Teilchenstrahlung aus dem Weltraum.

Die Erdkruste bildet keine durchgehende Schicht, sondern besteht aus Platten. Diese Platten werden von großen Blöcken gebildet, welche auf dem flüssigen Erdmantel (wo Silikate wie Olivin vorkommen) schwimmen. Die Erdplatten unterliegen daher dynamischen Prozessen, wie in der Theorie der Plattentektonik von 1960 beschrieben wird. Bereits im Jahre 1915 stellte Alfred Wegener (1880 – 1930) seine Theorie über die Kontinentalverschiebung (Kontinentaldrift) auf. Ursprünglich gab es einen Urkontinent, welcher Pangäa genannt wird. Durch die Plattentektonik driftete der Kontinent jedoch auseinander und es bildete sich die heute bekannte Verteilung der Kontinente auf der Erde heraus. Durch die Verteilung der Kontinente werden die Meeresströmungen bestimmt, welche wiederum wesentlichen Einfluss auf das Erdklima haben.

Die Erdoberfläche hat eine Fläche von rund 510 Millionen km², wovon 71 Prozent mit Wasser (Ozeane und Meere) bedeckt sind. Auf ihrer Landfläche gibt es unterschiedliche Formationen wie flache Ebenen, hügelige Landschaften und Gebirge. Des Weiteren ist die Landschaft, entsprechend dem lokalen Klima, von unterschiedlichen Formen von Leben geprägt. Als Nulllinie, worauf sich Höhen und Tiefen auf der Erdoberfläche beziehen, wird die sogenannte mittlere Meereshöhe (Normalnull) definiert. So bildet der Mount Everest mit einer Höhe von 8.848 Metern den höchsten Punkt auf der Erde, während der Marianengraben mit einer Tiefe von 11.000 m den tiefsten Punkt auf der Erde bildet. Die mittlere Tiefe der Ozeane und Meere beträgt etwa 3.500 m. Den tiefsten frei zugänglichen Punkt der Erdoberfläche bildet das Tote Meer, dessen Meeresspiegel und Ufer etwa 423 m unter Normalnull liegen. Durch zivilisatorischen Einfluss hat sich die Oberfläche der Erde stark verändert.

2.2 Die biologische und geologische Entwicklung der Erde

Die biologische und die geologische Entwicklung der Erde werden in mehrere Phasen eingeteilt. Diese sollen nachfolgend kurz zusammengefasst werden. So fanden zur Zeit des Präkambriums vor mehr als 590 Millionen Jahren drei Gebirgsbildungsphasen statt, welche als Laurentische, Algonische und Assynitische Gebirgsbildungen bezeichnet werden. Die Algenzeit (Eophytikum) begann vor 590 – 500 Millionen Jahren, geologisch wird diese Zeit Kambrium genannt. Zur Zeit des Ordoviziums vor 505 – 438 Millionen entstanden die ersten Wirbeltiere. Vor 438 – 408 Millionen Jahren, im geologischen Zeitalter des Silurs, traten Trilobiten („Dreilapper“, ausgestorbene Gliederfüßler) und die ersten Gefäßpflanzen auf. Der Panzerfisch trat erstmals im Devon-Zeitalter, vor 408 – 360 Millionen Jahren, und Gefäßsporenpflanzen erstmals vor 360 – 286 Millionen Jahren, am Ende des Karbon-Zeitalters, auf. Am Beginn des Perm-Zeitalters, vor 286 – 248 Millionen Jahren, entstanden die ersten Reptilien. Die Zeit der Saurier begann mit dem Trias-Zeitalter vor 248 – 213 Millionen Jahre und endete, vermutlich aufgrund eines Einschlags von einem Kleinkörper (Impakt), vor 65 Millionen Jahre. Die ersten Bedecktsamer und Vögel entwickelten sich in der Kreidezeit vor 144 – 65 Millionen Jahren. Die ersten Menschen traten in der Quartär-Zeit vor rund 2 Millionen Jahren auf und existieren bis heute.

2.3 Der Atmosphäre der Erde

Die Erdatmosphäre bestand ursprünglich aus molekularem Wasserstoff (H_2), Helium (He) und Wasserstoffverbindungen, darunter auch Wasser. Durch Vulkanismus und Entgasungsprozesse wurde die Erdatmosphäre mit molekularem Stickstoff (N_2), Kohlenstoffdioxid (CO_2), Wasser (H_2O) und Argon angereichert. Mit molekularem Sauerstoff (O_2) wurde die Erde erst aufgrund der Photosynthese angereichert, welche vor etwa 2,5 Milliarden Jahren einsetzte und biologischer Natur ist. Damit bestimmt das Leben auf der Erde die heutige Zusammensetzung der Erdatmosphäre mit. Sie besteht heute zu 78,02 Volumenprozent aus Stickstoff (N_2), zu 20,95 Volumenprozent aus Sauerstoff (O_2), zu 0,934 Volumenprozent aus Argon (Ar), zu 0,033 Volumenprozent aus Kohlenstoffdioxid (CO_2), zu 0,0018 Volumenprozent aus Neon (Ne), zu 0,0018 Volumenprozent aus Helium (He), zu 0,00015 Volumenprozent aus Methan (CH_4) und zu rund 0,0001 Volumenprozent aus Wasserdampf (H_2O).

Die Atmosphäre der Erde gliedert sich in verschiedene Schichten. Die unterste ist die Troposphäre, welche von der Erdoberfläche bis in eine Höhe von 15 km reicht. In ihr finden das Wettergeschehen und das Erdklima statt. Bis zu ihrer maximalen Höhe nimmt die Temperatur der Troposphäre auf -50°C ab. Der Troposphäre schließt sich die Stratosphäre an, welche bis in eine Höhe von 50 km reicht. In ihr steigt die Temperatur leicht auf -20°C an. Die Mesosphäre folgt auf die Stratosphäre. Sie reicht bis in eine Höhe von 90 km, wobei die Temperatur in dieser Höhe wieder auf -100°C abnimmt. Der Mesosphäre schließt sich die Ionosphäre an, welche bis in eine Höhe von 700 km reicht. Der Bereich von 90 bis 250 km wird als Thermosphäre bezeichnet, da in diesem Bereich die Temperatur auf bis zu 1.500 °C ansteigt. In der Ionosphäre kommt es zur Ionisation der Atome bzw. Moleküle, daher ihr Name. Sie schützt das Leben auf der Erde vor der extrem kurzwelligen Röntgen- und Gammastrahlung. Ihr äußerer Bereich, der fließende Übergang zum Weltraum, wird als Exosphäre bezeichnet. Aufgrund der stärkeren Streuung des kurzwelligeren blauen Anteils des Lichts in der Atmosphäre erscheint der Himmel bläulich. Aus dem gleichen Grund erscheint die Sonne bei ihrem Auf- und Untergang rötlich. In diesem Fall erreicht nur noch der langwelligere rötliche Anteil des Lichts den Beobachter, da der blaue Anteil weggestreut wird. Aufgrund der Wechselwirkung zwischen der ultravioletten Strahlung der Sonne mit dem irdischen Sauerstoff (O_2) entsteht in einer Schicht von etwa 10 bis 40 km Höhe Ozon (O_3): $3O_2 \leftrightarrow 2O_3$. Die Ozonschicht schützt die Erde vor kurzwelliger ultravioletter Strahlung in einem Wellenlängenbereich zwischen 300 und 210 Nanometer (1 nm = 10^{-9} m). Dieser Bereich ist für biologisches Leben schädlich.

Das Klima und das Wettergeschehen auf der Erde werden durch die Sonneneinstrahlung und die Rotation der Erde bewirkt. Aufgrund der Bahnbewegung der Erde und der Neigung der Erdachse von rund 23,5° ist die Intensität der Sonnenstrahlung an verschiedenen Orten und zu verschiedenen Zeiten unterschiedlich, so dass es auf der Erde vier Jahreszeiten und unterschiedliche Klimazonen gibt. Die Klimazonen auf der Erde sind die Polargebiete, die subpolaren Gebiete, die gemäßigten Zonen, die Subtropen und die Tropen. Die Polargebiete befinden sich jeweils am geografischen Nord- und Südpol der Erde. Diese Gebiete sind von einer dicken Eisschicht überzogen, welche als Polkappen bezeichnet werden. Dort werden die niedrigsten Temperaturen auf der Erde erreicht. Die Tropen befinden sich im Bereich des Erdäquators. Dort werden die höchsten Temperaturen erreicht. Die anderen Zonen finden sich jeweils dazwischen. Die subpolaren Gebiete sind der Übergangsbereich zwischen den Polargebieten und den gemäßigten Zonen, während die Subtropen den Übergangsbereich zwischen den gemäßigten Zonen und den Tropen bilden.

2.4 Solar-terrestrische Beziehungen

Die Sonne ist ein gelber Zwergstern mit einer Oberflächentemperatur von rund 5.800 K (6.073°C) vom Spektraltyp G 2 V. Ihre Masse beträgt $1{,}98 \cdot 10^{30}$ Kg, was 333.000 Erdmassen entspricht. 99,86 Prozent der Masse des Sonnensystems ist in der Sonne vereinigt.

Der kleine Rest von 0,14 Prozent verteilt sich auf Planeten, Zwergplaneten, Trabanten, Kleinplaneten, Kometen, Staub und sonstige Materie im Sonnensystem. Der Sonnenradius beträgt 695.900 km und ihre Leuchtkraft $3{,}826 \cdot 10^{26}$ W.

Des Weiteren ist die Sonne der Stern, welcher das Leben auf der Erde erst ermöglicht. Ohne die Sonne hätte sich auf der Erde kein Leben entwickeln können. Auch viele von den Menschen genutzte Energiequellen gehen letztendlich auf Sonnenenergie zurück. Nur die Kernenergie und die Energie aufgrund der Nutzung der Gezeiten (Gezeitenkraftwerke) gehen nicht auf Sonnenenergie zurück. Die Erde empfängt von der Sonne eine Leistung von etwa $1{,}8 \cdot 10^{17}$ W. Ein Großteil davon, etwa 10^{15} W wird in die kinetische Energie der Luftbewegungen umgesetzt. Auf der Erde kommt durchschnittlich ein Strahlungsfluss von 1.367 W/m² an. Dieser Wert, beruhend auf den mittleren Abstand von Erde und Sonne, wird als Solarkonstante bezeichnet. Streng genommen ist dies keine Konstante, da der Wert aufgrund der Variation der Entfernung Erde – Sonne ebenfalls variiert und auch der Zustand der Atmosphäre (z.B. die Bewölkung) Einfluss hat. Die Sonne ist damit entscheidend für die Dynamik der Atmosphäre verantwortlich. Neben geophysikalischen Faktoren bestimmen vor allem astrophysikalische Faktoren die Entwicklung des Wetters (Meteorologie) und des Klimas (Klimatologie). Für die Dynamik des Klimas ist die Energie der Sonnenstrahlung maßgeblich. Allerdings spielen auch die Bahnparameter der Erde eine Rolle, sie bestimmen wie und mit welcher Leistung die Sonnenenergie auf die Erdoberfläche durch Sonnenstrahlung einwirkt. Auf der Erde wiederum bestimmen sowohl geophysikalische als auch biologische Faktoren die Entwicklung des Klimas. Ausführlich wird darauf in Kapitel „**4 Die Klimatologie** “ eingegangen.

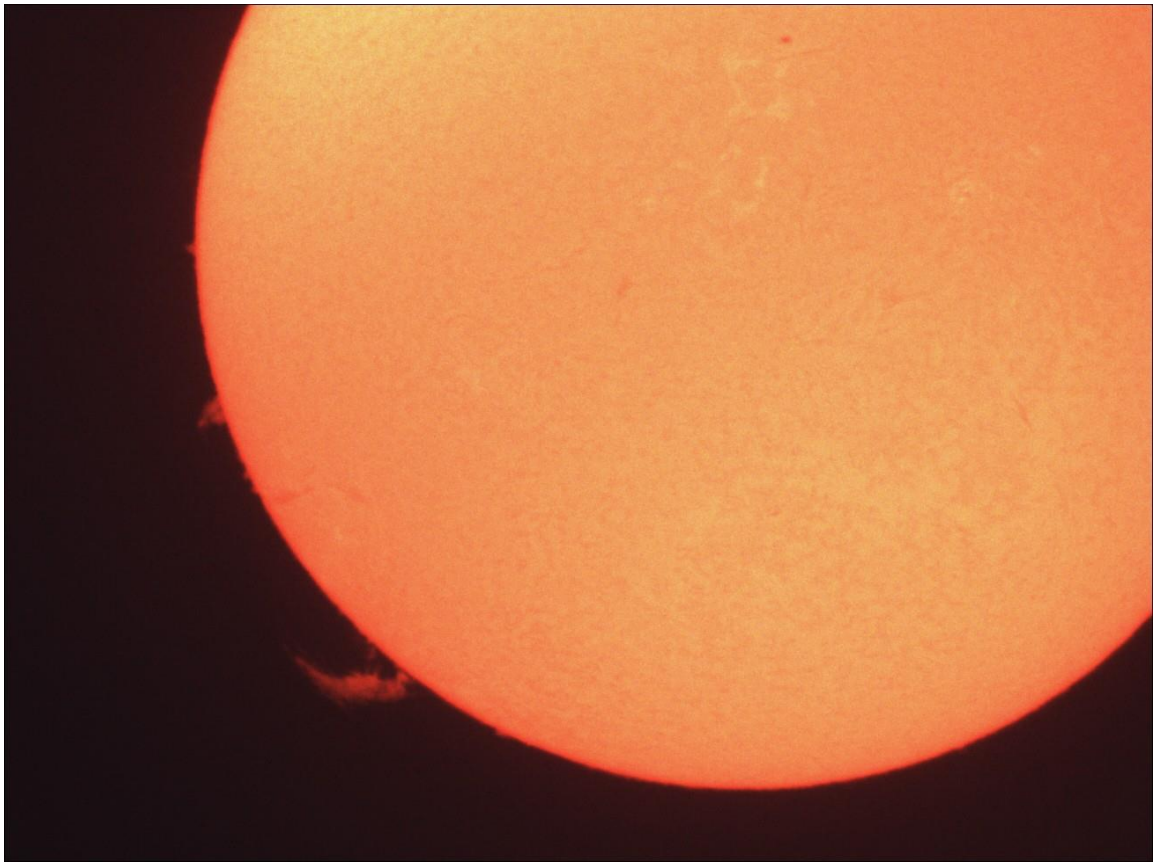

Bild 3: Die Sonne im H-Alpha-Licht / Astrofotografie von Michael Tolkmitt AVWF

Die Gravitation der Sonne hat ebenfalls Einfluss auf die Erde. Zunächst zwingt sie die Erde auf eine fast kreisförmige Bahn und liefert damit einen Beitrag zu einem stabilen Klima auf der Erde. Auch zu den Gezeiten auf der Erde liefert die Sonne einen Beitrag. Zwar wirkt die Gravitation des Mondes aufgrund seiner relativen Nähe zur Erde wesentlich stärker, doch Beeinflussen die Stellung des Mondes und der Sonne zueinander die Intensität der Gezeiten. Wirken ihre Kräfte zusammen, dann entsteht eine sogenannte und im Durchschnitt höhere Springtide (Springflut). Wirken sie gegeneinander, da Mond und Sonne in einem Winkel von 90° zueinanderstehen, entsteht eine sogenannte und im Durchschnitt niedrigere Nipptide (Nippflut).

Der solare Strahlungsfluss (die solare Irradianz) unterliegt leichten Schwankungen. Änderungen der Irradianz gehen auf Sonnenflecken, Fackeln, von der Supergranulation hervorgerufene Netzwerke, Einflüsse von Magnetfeldern auf den konvektiven Wärmefluss und auch auf nicht-magnetische Einflüsse zurück. So kann eine Änderung der Sonnenstrahlung um 0,1 Prozent zu einer Temperaturänderung auf der Erde um 0,2° K bzw. 0,2°C führen. Zur Zeit eines Aktivitätsmaximums ist die Sonne etwa um 0,1 Prozent heller. Seit 1990 nimmt die Sonnenaktivität insgesamt zu, so dass ein kleiner Teil des Temperaturanstiegs auf der Erde auch darauf zurückgeführt werden kann.

Neben dem 11-jährigen Aktivitätszyklus der Sonne, in dessen Maximum besonders viele Sonnenflecken auftreten, dürfte es noch einen 90-jährigen Gleißberg-Zyklus (nach dem Astronomen Wolfgang Gleißberg) geben sowie längere Phasen mit besonders geringer oder hoher Sonnenaktivität. So konnten in den Phasen mit besonders geringer Sonnenaktivität für mehrere Jahrzehnte keine Sonnenflecken beobachtet werden. Diese Phasen waren: das Maunder-Minimum (1645 – 1715), das Spörer-Minimum (1460 – 1550), das mittelalterliches Maximum (1100 – 1250) und das römische Maximum (20 – 80). Diese Phasen scheinen auch Einfluss auf das Erdklima zu haben. So kam es während des Maunder-Minimums zu einer kleinen Eiszeit in Europa. Während des Mittelalterlichen Maximums gab es eine ungewöhnlich warme Klimaperiode auf der Erde, bei der z.B. Grönland eisfrei und damit tatsächlich eine grüne Insel war.

Es scheint einen Zusammenhang zwischen dem Klima auf der Erde und der Sonnenaktivität zu geben. Eine höhere Sonnenaktivität dürfte im Ergebnis zu einem wärmeren Klima auf der Erde bzw. zu höheren Erdtemperaturen führen. Trotz der Sonnenflecken, welche ja um etwa 1.000 °C kühler sind, dürfte die Strahlungsleistung der Sonne bei einem Aktivitätsmaximum höher sein. Denn das von den Sonnenflecken hervorgerufene Strahlungsdefizit wird durch die erhöhte Abstrahlung in den hellen und heißen Fackelgebieten überkompensiert.

Der 11-jährige Aktivitätszyklus der Sonne spiegelt sich auch in der Struktur der Jahresringe von Bäumen wider. Auch die besonderen Phasen der Sonnenaktivität, etwa das Maunder-Minimum, spiegeln sich dort wider. Des Weiteren gibt es noch einen Zusammenhang zwischen der Konzentration von radioaktivem Kohlenstoff-14 in Baumringen und der Sonnenaktivität. Die Sonnenaktivität ist mit dem Magnetfeld der Sonne verknüpft. Das interplanetare Magnetfeld ist bei höherer Sonnenaktivität dichter als bei niedrigerer Aktivität. In Folge können weniger Teilchen der Kosmischen Strahlung die Erde erreichen. Im Ergebnis entsteht das C-14 aus einem Zusammenstoß von einem Neutron mit einem Stickstoff-14-Atom in der Erdatmosphäre. Das Neutron wiederum entsteht als Sekundärteilchen aus einer Wechselwirkung der Kosmischen Strahlung mit der Erdatmosphäre. Die Pflanzen nehmen unter anderem auch das radioaktive C-14 auf. Bei höherer Sonnenaktivität entsteht im Ergebnis weniger C-14 als bei niedrigerer Aktivität und das lässt sich messen. So finden wir in der Pflanzenwelt Hinweise auf den Aktivitätszyklus der Sonne.

Bild 4: Polarlicht, hervorgerufen durch Sonnenwind / Foto von Ralf Schmidt AVWF

Der aus geladenen Teilchen (Protonen, Heliumkerne, Kerne schwererer Elemente und Elektronen) bestehende Sonnenwind wechselwirkt sowohl mit dem Erdmagnetfeld als auch mit der Atmosphäre der Erde. Die Magnetosphäre der Erde wird auf der sonnenzugewandten Seite der Erde gestaucht, während sich auf der sonnenabgewandten Seite ein Schweif bildet. Der Sonnenwind kann in der Erdatmosphäre Ströme erzeugen. Diese können wiederum Überspannungen in Überlandleitungen induzieren, Transformatoren zerstören und damit die Stromversorgung in den betroffenen Gebieten lahmlegen. Ein anderes Phänomen wurde bereits angesprochen. Bei Flares wird Röntgenstrahlung emittiert, welche die Ionendichte in der Erdatmosphäre erhöht.

Es kann dabei zu plötzlich aufkommenden Störungen der Ionosphäre kommen. In Folge können Funksignale in der D-Schicht absorbiert und damit der Funkverkehr gestört werden. Auf der anderen Seite werden bei einem Aktivitätsmaximum höhere Frequenzen von Radiostrahlung reflektiert und damit deren Reichweite erhöht. Selbst die Störung von Computern ist durch die energiereichen Teilchen des Sonnenwindes möglich. So kommt es zum Effekt der sogenannten Bit-Umkehr und damit zu falschen Befehlen. Durch die erhöhte kurzwellige Strahlung wird die obere Erdatmosphäre erhitzt und dehnt sich aus. In Folge können erdnahe Satelliten abgebremst werden und abstürzen. Intensive Teilchenstrahlung ist auch gefährlich für Lebewesen, insbesondere für Raumfahrer, so dass auf das sogenannte Weltraumwetter, unter dem die oberen Ereignisse dieses Abschnitts zusammengefasst werden, besonders geachtet werden muss. Daher wird das Weltraumwetter beobachtet und versucht, Vorhersagen über dessen Entwicklung zu machen.

Besonders eindrucksvoll ist noch eine andere Wechselwirkung des Sonnenwindes mit der Erdatmosphäre, die Polarlichter. Sie entstehen, wenn die elektrisch geladenen Teilchen des Sonnenwindes vom Magnetfeld der Erde eingefangen und sie entlang der Magnetfeldlinien auf die obere Erdatmosphäre treffen. Die hochenergetischen Teilchen ionisieren in Folge Stickstoff- und Sauerstoffatome der Erdatmosphäre.

Nach kurzer Zeit erfolgt jedoch wieder die Rekombination, d.h. die Elektronen werden wieder von den Stickstoff- und Sauerstoffionen eingefangen. Dabei wird Licht in Form von verschiedenen Wellenlängen bzw. Frequenzen bzw. Farben emittiert. So entsteht grünes und rotes Polarlicht durch Sauerstoff, blaues und violettes Licht durch Stickstoff. Polarlichter leuchten nicht nur im optischen Bereich, sondern können auch im unsichtbaren langwelligen und kurzwelligen Bereich, etwa im infraroten und ultravioletten Bereich, strahlen. Da die Magnetfeldlinien der Erde an den jeweiligen Erdpolen eintreten, die geladenen Teilchen sich entsprechend dort entlang bewegen, kommen Polarlichter hauptsächlich in den Polargebieten und höheren geographischen Breiten vor. Da der Sonnenwind mit der Aktivität der Sonne korreliert ist, kommen Polarlichter auch besonders bei einem Aktivitätsmaximum der Sonne vor.

2.5 Lunar-terrestrische Beziehungen

Der Mond ist ein natürlicher Satellit bzw. Trabant der Erde. Aufgrund der Größenverhältnisse zwischen Erde und Mond wird auch von einem Doppelplaneten-System gesprochen. Der Durchmesser des Mondes beträgt 3.476 km und damit rund ein Viertel des Erddurchmessers. Im Sonnensystem ist der Mond damit der fünftgrößte Trabant. Die Entfernung zwischen Erde und Mond bewegt sich in einem Bereich von 363.300 km bis 405.500 km. Die mittlere Entfernung beträgt 384.400 km. Die Masse des Mondes beträgt 1/81 der Erdmasse. Aufgrund der geringen Oberflächengravitation kann der Mond keine Atmosphäre halten. Die mittlere Dichte des Mondes beträgt 3,3 g/cm³. Der Mond rotiert in rund 27,3 Tagen um seine eigene Achse, im Prinzip genauso lange wie er für einen Umlauf um die Erde benötigt. Dadurch ist, abgesehen von leichten Schwankungen, der Erde immer dieselbe Mondseite zugewandt. In diesem Fall wird von einer gebundenen Rotation gesprochen. Sie kommt durch die Gezeitenwirkung (periodische Verschiebung von Massen aufgrund der Gravitation) zwischen Erde und Mond zustande.

Bild 5: Der Mond / Astrofotografie von Ralf Schmidt AVWF

Der Mond hat verschiedene Einflüsse auf die Erde. In diesen Fällen wird von lunar-terrestrischen Beziehungen gesprochen. Der größte Einfluss kommt aufgrund der Mondgravitation zu Stande. So werden die Gezeiten auf der Erde durch den Mond verursacht. Dabei stabilisiert der Mond auch die Erdachse, die eine Neigung von 23° gegenüber der Ekliptik aufweist. Ohne die stabilisierende Wirkung des Mondes würde die Erdachse zwischen 15° und 30° schwanken. In Folge hätten sich keine zeitlich stabilen Klimazonen auf der Erde herausbilden können. Dies hätte auch negative Auswirkungen auf die Entwicklung des Lebens auf der Erde gehabt. Nach der Sonne ist der Mond das hellste astronomische Objekt am Himmel und das der Erde am nächsten gelegene. Aus diesem Grunde gehörte der Mond auch zu den ersten Zielen von Raumfahrtmissionen und zum bisher einzigen Ziel, welches von Menschen betreten wurde.

Der Mond dürfte auch Einfluss auf biologische Systeme haben. Viele der dem Mond nachgesagten Einflüsse sind auch umstritten oder haben sich als falsch herausgestellt. Nachfolgend soll auf die Gezeiten ausführlich eingegangen werden.

Die durch den Mond erzeugten Gezeiten führen zu periodischen Massenbewegungen in der Erdatmosphäre, des Erdkörpers und der Meere. In der Erdatmosphäre äußern sich die Gezeiten durch periodische Schwankungen des Luftdruckes, welche in einer Größenordnung von 0,1 hPa liegen. Im Falle des Erdkörpers bewirken die Gezeiten eine Anhebung und Senkung der Erdkruste in einem Größenbereich von etwa 50 cm innerhalb von 12 Stunden. Am auffälligsten und bekanntesten sind jedoch die Gezeiten des Meeres (Tiden), welche sich als Ansteigen (Flut) und Absinken (Ebbe) des Meeresspiegels äußern. Es gibt zwei Flutberge und zwei Täler, welche innerhalb eines Mondtages $24^h\ 50^m$ (Umlaufzeit des Mondes) um die Erde laufen. Auf diese Weise ist im durchschnittlichen Abstand von $12^h\ 25^m$ jeweils Flut oder Ebbe.

Die durch den Mond erzeugten Schwingungen der Luft- und Wassermassen sowie der Erdkruste ergeben sich aus den resultierenden Kräften aus Gravitationskraft und Zentrifugalkraft. Auf der dem Mond zugewandten Seite der Erdoberfläche ist die durch die Gravitationskraft des Mondes ausgeübte Kraft stärker als im Erdmittelpunkt. Daraus ergibt sich ein resultierender Kräfteunterschied, der sich auf die Erdoberfläche geringfügiger und auf das Meerwasser stärker auswirkt.

Die Gravitation des Mondes zieht das Wasser jeweils tangential (Winkel von 90° zur Erdoberfläche) zu sich heran, wo dann jeweils die Fluttäler entstehen. Die Wassermassen sammeln sich dann in Richtung des Mondes, wo ein Flutberg entsteht. Auf der dem Mond entgegengesetzten Seite der Erde verhält es sich mit den resultierenden Kräften dann anders herum. Die Gravitationskraft des Mondes ist auf dieser Seite der Erdoberfläche geringer als im Erdmittelpunkt.

Die Folge ist eine nach außen gerichtete resultierende (Zentrifugal-)Kraft, welche auch auf der dem Mond abgewandten Seite der Erde einen Flutberg entstehen lässt. Eine andere Interpretation lässt auch folgendes Bild zu. Die Erde wird stärker vom Mond angezogen als die Wassermassen, welche sich auf der dem Mond abgewandten Seite der Erde befinden. Daraus resultiert dann ein Flutberg. Allerdings sind beide Flutberge nicht gleich groß, da auch die jeweils resultierenden Kräfte nicht gleich groß sind. Der Flutberg auf der dem Mond zugewandten Seite der Erde ist um etwa sieben Prozent größer.

Die Sonne bewirkt ebenfalls Gezeiten auf der Erde. Da die Gezeitenwirkung allerdings mit einem Wert von $1/r^3$ mit zunehmender Entfernung (r) zwischen zwei Himmelsobjekten abnimmt, ist die durch die Sonne hervorgerufene Gezeitenbeschleunigung um die Hälfte kleiner als die des Mondes. Bei Vollmond und Neumond wirken die Gezeitenkräfte zusammen. Es entsteht dann eine im Durchschnitt höhere Flut, die sogenannte Springflut.

Bei Halbmond stehen Erde, Mond und Sonne jeweils in einem Winkel von 90° zueinander, so dass sich die Kräfte gegenseitig teilweise aufheben. In diesem Fall kommt es zu einer im Durchschnitt niedrigeren Flut, der sogenannten Nippflut.

Der Einfluss des Mondes würde die Wassermassen auf der Erde im Durchschnitt nur um 0,6 Meter heben, wenn diese vollständig mit Wasser bedeckt sein würde. Tatsächlich gibt es auf der Erde auch Landflächen, die natürliche Hindernisse bilden und so zu einer wesentlich höheren Flut führen. So können an der französischen Atlantikküste Tidenhübe von 7 bis 11,5 m erreicht werden. In der Fundy Bay, an der Ostküste Kanadas, wird mit 16 m und 21 m bei einer Springflut der höchste Tidenhub erreicht. In Deutschland wird der höchste Tidenhub mit einer mittleren Höhe von 3,7 m im Jadebusen bei Wilhelmshaven erreicht und der niedrigste an der deutschen Nordseeküste mit 1,6 m am Westrand von List auf der Insel Sylt. In der Ostsee beträgt der Tidenhub nur 0,3 m. Im Ergebnis sind die Höhen der Tiden eine Wechselwirkung zwischen den bewegen Meereswassermassen und den Küstenformationen.

Bild 6: Die Mondoberfläche / Astrofotografie von Ralf Schmidt AVWF

3 Meteorologie

Gegenstand der Meteorologie ist die Physik und die Chemie der Atmosphäre. Hierbei beschäftigt sich die Meteorologie mit der kurzfristigen Entwicklung des Wetters. Definition: „*Das Wetter ist der physikalische Zustand in der Atmosphäre (Troposphäre, unterste Atmosphärenschicht) an einem bestimmten Ort oder in einem Gebiet zu einem bestimmten Zeitpunkt oder in einem kurzen Zeitraum von Stunden bis hin zu wenigen Tagen.“* Die meteorologischen Größen sind: Luftdruck, Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur, Taupunkt, Windgeschwindigkeit und Windrichtung, Wolkenart und -grenzen / Bedeckungsgrad, Sichtweite, Niederschlagsmenge und –art.

3.1 Hochdruck- und Tiefdrucksysteme

Die Dynamik des Wetters zeigt sich besonders durch Hochdruck- und Tiefdrucksysteme. Die Sonneneinstrahlung bewirkt eine Erwärmung der festen und flüssigen Erdoberfläche. Diese Erwärmung hängt von der Beschaffenheit der Erdoberfläche, den Breitengraden, dem Winkel der Sonneneinstrahlung (Jahreszeit), dem Sonnenstand und dem Zustand der Atmosphäre ab. Die erwärmte Erdoberfläche erwärmt die darüber liegenden Luftschichten. Wärmere Luft steigt nach oben, da sie eine geringere Dichte als kühlere Luft hat. Durch das Aufsteigen der wärmeren Luft sinkt am Boden der Luftdruck, während er dafür oben ansteigt. Seitlich über die kühlere Luft sinkt die wärmere Luft, welche sich dabei abkühlt, wieder ab. Dort wo sie absinkt, steigt am Boden der Luftdruck, während er oben dafür wieder sinkt. Dieser Vorgang findet über einem größeren Gebiet statt.

Die aufsteigende Luft kühlt sich ab. Mit sinkender Temperatur nimmt auch die Speicherkapazität für Wasser ab. In der Folge kondensiert das Wasser in Form von Tröpfchen aus und bildet Wolken. Zunächst bilden sich beim seitlichen Abfließen der sich abkühlenden ursprünglich wärmeren Luft Schleierwolken (Cirren), welche sich immer mehr verdichten. Durch den weiteren Nachfluss von sich abkühlender feucht-warmer Luft bilden sich Schleier-Schichtwolken (Cirrostratus), welche sich weiter zu mittelhohen Schichtwolken (Altostratus) entwickeln. Diese entwickeln sich dann weiter zu Regenwolken (Nimbostratus), welche einen länger anhaltenden Niesel- bzw. Langregen zur Folge haben. Nach dem Abregnen bricht die Wolkendecke wieder auf und die Sonne kommt wieder durch. Nun kann sich die Luft wieder erwärmen.

Zu unterscheiden sind ein thermisches und ein dynamisches Tief. Bei einem thermischen Tief steigt die wärmere Luft nach oben und dadurch nimmt der Luftdruck am Boden ab. Weiter oben steigt der Luftdruck aufgrund des Aufsteigens der Luft an. So bilden sich ein Bodentief und ein Höhenhoch. Da unten ein Druckgefälle zwischen Gebieten mit tieferem und höherem Luftdruck entsteht, strömt Luft vom höheren Luftdruckgebiet ins tiefere Luftdruckgebiet. Diese Luftströmung wird als Wind bezeichnet. Je größer der Druckunterschied, umso stärker ist auch der Wind. Bei Umkehrung des Vorgangs, also dem Absinken der kühleren Luft, bilden sich ein Höhentief und ein Bodenhoch. Denn jetzt sinkt oben der Luftdruck, während er unten ansteigt.

Dynamische Tiefdrucksysteme sind deutlich komplexer. Bei diesen großflächigen Druckgebieten können die Rotation der Erde und die Höhenwinde nicht mehr vernachlässigt werden. Zwischen den Polen der Erde und dem Erdäquator gibt es einen starken Temperaturunterschied. Unter vereinfachten Rahmenbedingungen würde die wärmere Luft am Äquator aufsteigen und an den Polen wieder absinken. Durch diesen Lufttransport entstehen definierte Höhenwinde. Aufgrund der Erdrotation tritt jedoch die sogenannte Corioliskraft auf, welche zu einer Ablenkung dieser Höhenwinde führt. Dies führt zu definierten Höhenströmen, etwa der Westströmung. Im Ergebnis kommt es zur Bildung von dynamischen Tiefdrucksystemen. Hierbei fließen in den tieferen Schichten der Atmosphäre Luftströme zusammen, was als Konvergenz bezeichnet wird. Wie beim thermischen Tief strömen bodennahe Luftmassen nach oben. Die Geschwindigkeit der Luftmassen nimmt aufgrund der freiwerdenden Kondensationsenergie und des Pirouetten-Effekts dabei zu.

In der Höhe fließen die Luftmassen wieder auseinander, was als Divergenz bezeichnet wird. Bei dieser Divergenz verliert die Luftströmung an Geschwindigkeit. Aufgrund des Druckgefälles fließt die Luft in einem Tiefdruckgebiet nach innen. Durch die Corioliskraft wird diese Luftströmung auf der Nordhalbkugel nach rechts abgelenkt, so dass das Tiefdruckgebiet gegen den Uhrzeigersinn rotiert. Auf der Südhalbkugel der Erde ist es umgekehrt.

Ein dynamisches Tiefdrucksystem lenkt aufgrund seiner Rotation auf seiner vorderen Ostseite warme Tropenluft nach Norden und auf seiner hinteren Westseite kalte Polarluft nach Süden. Dies führt zu der Entstehung von Warm- und Kaltfronten. Diese sind auf der Nordhalbkugel wiederum an die überlagernde Westströmung gekoppelt, so dass sich diese Fronten von dem Atlantik in den europäischen Kontinent hineinbewegen. Eine voranschreitende Warmfront gleitet über eine Kaltluft in Bodennähe, was zu deren Abkühlung und zur Verringerung von deren Wasserspeicherungskapazität führt. In Folge bildet sich wie oben bereits beschrieben die Regenwolken (Nimbostratus), was zu Niesel- bzw. Landregen führt. Bei einer Kaltfront stoßen polare Luftmassen gegen wärmere Massen aus Tropenluft. Die leichtere Tropenluft wird dadurch angehoben, und es entsteht daraus eine konvektive Bewölkung, die sogenannten Haufenwolken (Cumulus). Aus diesen können dann schauerartige Niederschläge fallen.

Auf der Rückseite des Tiefdrucktrogs konvergieren die Stromlinien der Luft in der Höhenströmung. Sie fließen also zusammen und wieder nach unten. Hierbei erwärmen sich die Luftmassen wieder und ihre Wasserspeicherungskapazität nimmt wieder zu. Die Bewölkung löst sich auf und der Luftdruck am Boden steigt an. Es bildet sich ein Hochdruckgebiet. Diese Vorgänge sind der Grund, warum Tiefdrucksysteme mit schlechtem Regenwetter und Hochdrucksysteme mit gutem Sonnenwetter in Zusammenhang gebracht werden. Barometer für den Hausgebrauch, welche den Luftdruck messen, sind oft entsprechend bezeichnet. Tatsächlich ist diese Beschreibung sehr ungenau, da auch bei Tiefdrucksystemen gute Wetterphasen und bei Hochdrucksystemen schlechte Wetterphasen auftreten können. In Bodennähe fließt die Luft aus dem Hochdruckgebiet wieder in Richtung eines Tiefdruckgebietes, so dass wieder ein Ausgleich des Druckunterschiedes angestrebt wird. In der Höhe kommt es bei einem Hochdruckgebiet zu keine Frontenbildung. Des Weiteren baut sich während des Absinkens der Luft eine Inversion auf, eine kältere Luftschicht liegt dann über einer wärmeren. Insgesamt bauen sich Hochdruckgebiete relativ langsam auf, können dafür sehr stabil sein.

Hochdruckgebiete werden analog zu den Tiefdruckgebieten aufgrund ihrer Entwicklung und ihres Ursprungs in drei Kategorien eingeteilt: Kältehoch (thermisches Hoch), dynamisches Hoch und Höhenhoch. Die Vorgänge kehren sich im vergleich zum Tiefdrucksystem dann um.

3.2 Wind

Winde sind Luftströmungen von einem höheren Luftdruckgebiet in ein tieferes. Die Stärke des Windes hängt vom Druckunterschied und von der Ausdehnung des Strömungsbereiches ab. Auch Erdformationen wie Gebirge beeinflussen die Windgeschwindigkeit. Windströmungen können horizontal und vertikal erfolgen. Der Wind hat also eine bestimmte Richtung. Um den Wind zu charakterisieren wird in der Regel seine Geschwindigkeit bzw. Stärke und seine Richtung angegeben. Der Druckgradient beschreibt den Druckunterschied zwischen zwei Punkten. Aufgrund dieses Unterschieds wirkt eine Kraft, so dass auch von einer Druckgradienten-Kraft gesprochen wird. Als zusätzliche Kräfte wirken noch die Corioliskraft und die Reibungskraft.

In der Erdatmosphäre entstehen wie bereits in Unterkapitel „**3.1 Hochdruck- und Tiefdrucksysteme**“ beschrieben Hoch- und Tiefdrucksysteme. Grundsätzlich steigen wärmere Luftmassen aufgrund ihrer kleineren Dichte nach oben. Am Boden entsteht so ein Bodentief und in der Höhe ein Höhenhoch. Umgekehrt sinkt kühlere Luft aufgrund ihrer größeren Dichte wieder nach unten. In diesem Fall entsteht am Boden ein Bodenhoch und in der Höhe ein Höhentief.

Insgesamt wird auch von thermischen Hochs und Tiefs gesprochen. Aufgrund des Luftdruckunterschieds entsteht eine Luftströmung, ein Wind. Als Beispiel hierfür sei der Land-See-Wind genannt. Die Landmassen erwärmen sich bei Sonneneinstrahlung stärker als die Wassermassen im Meer. So entsteht über dem Land ein Bodentief und über dem Meer ein Bodenhoch. Die Luft strömt vom Hoch zum Tief, als kommt der Wind aus Richtung der See zum Land. In der Nacht kühlt sich die Landmasse stärker ab als die Wassermassen im Meer. Daher bildet sich über dem Land ein Bodenhoch und über der See ein Bodentief. Nun weht der Wind vom Land in Richtung des Meeres.

Bei den großen dynamischen Hochs- und Tiefs muss die Erdrotation berücksichtigt werden. Konkret tritt die ablenkende Kraft der Erdrotation als sogenannte Corioliskraft auf, eine Scheinkraft, welche nur auf bewegte Massen wirkt. Sie wirkt immer senkrecht auf die Bewegungsrichtung einer Masse. Im Falle der Nordhalbkugel wirkt diese Kraft nach rechts ablenkend. Ein von Nord nach Süd wehender Wind wird so nach Nordost oder Ost abgelenkt. Damit kann die Luftströmung bzw. der Wind nicht unmittelbar der Gradienten-Kraft vom höheren Druck zum niedrigeren folgen. Eigentlich wäre damit ein Druckausgleich verhindert. Allerdings tritt aufgrund der Rauigkeit der Erdoberfläche eine Reibungskraft auf, deren Reibungsschicht auf 500 bis 1000 Metern begrenzt ist. Die Reibungskraft übt eine bremsende Wirkung auf die Luftströmung bzw. den Wind aus, dadurch erhält die Luftströmung eine Komponente vom höheren zum tieferen Druck und damit kommt es doch zum Druckausgleich.

Aufgrund des unterschiedlichen Zusammenwirkens von thermischer Sonneneinstrahlung, der Corioliskraft aufgrund der Erdrotation und der Reibungskraft aufgrund der Beschaffenheit der Erdformationen kommt es zu vielfältigen atmosphärischen Strömungen in Form von Wind, Sturm und Orkan. Es gibt 17 Stufen, welche in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit und der damit verbunden Wirkung auf dem Land und der See einen Wind bzw. Sturm bzw. Orkan charakterisieren. So umfassen die Stufen 1 bis 8 die Luftströmungen von 0 bis 74 km/h und werden als Windstill bzw. Wind bezeichnet. Die Stufen 9 bis 11 umfassen Luftströmungen mit Geschwindigkeiten von 75 – 116 km/h werden als Sturm bezeichnet. Ab Windstärke 12 bzw. 118 km/h wird von einem Orkan gesprochen. Vor jeder Stufe wird dem Wind oder dem Sturm noch ein zusätzliches Adjektiv beigefügt, wie leichter Wind, schwacher Wind, mäßiger Wind, stürmischer Wind, Sturm, schwerer Sturm oder orkanartiger Sturm. Die Stufen 13 bis 17 reichen zu Geschwindigkeiten von bis zu 200 km/h. Diese werden allerdings nur in Hochlagen oder Tornados (Wirbelstürme) erreicht. Die Geschwindigkeiten des Windes sind Durchschnittswerte, welche um 20 bis 30 % unterschritten oder überschritten werden können. Es wird von der Böigkeit des Windes gesprochen. Diese wird durch die Rauigkeit des Bodens, den konvektiven Luftaustausch und Turbulenzen in der Luft erzeugt.

Tornados sind lokale Wirbelstürme mit Durchmessern von 100 bis 2000 Metern. In Deutschland werden diese auch als Windhosen, über Wasser als Wasserhosen und über Sand als Sandhosen bezeichnet. Voraussetzung für ihre Entstehung sind sogenannte Superzellen, welche alleinstehende, rotierende und stabile Zirkulationssysteme mit Durchmessern von 20 bis 50 km darstellen. Tornados sehen aus wie Elefantenrüssel, welche als Tromben bezeichnet werden. Sie bilden einen vom Erdboden bis in die Tropopause reichenden Kegelstumpf. Rechts wird feuchtheiße Warmluft nach oben gesaugt (Updraft) und hinten um den Kegelstumpf herumgeführt. Zur gleichen Zeit stürzt kalte Höhenluft von der linken Seite nach unten (Downdraft). Am Erdboden wird diese in die Horizontalen gelenkt und erzeugt dort heftige Sturmböen.

Eine Superzelle entsteht, wenn sich in der Höhe eine kühlere und trockenere Luftschicht über eine bodennahe Schicht feucht-heißer Luft schiebt und sich der Wind mit zunehmender Höhe in Geschwindigkeit und Richtung ändert, was als Windscherung bezeichnet wird. Das ruft in der Atmosphäre eine massive Labilität hervor, welche zu den oben genannten Up- und Downdrafts führen.

Die Windscherung bewirkt, dass die nach unten strömenden Kaltluftmassen nicht in den Aufwindbereich kommen und der feucht-heiße Energienachschub erhalten bleibt. Der Einzugsbereich der Warmluft ist bei 20 bis 50 km groß genug, um in den Wirkungsbereich der Corioliskraft zu kommen. Dadurch erhält die Superzelle ihre Rotation, welche wiederum eine wichtige Voraussetzung für die Entstehung eines Tornados ist. Die Warmluft steigt spiralförmig auf. Durch die Pirouetten-Effekt wird die Spiralbewegung nach oben beschleunigt. Aufgrund der Drehimpulserhaltung nimmt die Geschwindigkeit der spiralförmigen Warmluftströmung zu, wenn der Durchmesser dieser Spirale kleiner wird.

Innerhalb der Superzelle können weitere Wirbel entstehen, z. B. waagerecht liegende Böenwalzen. Diese können von den Updraft-Aufwinden erfasst und senkrecht aufgestellt werden. Die Achse eines kräftigen Wirbels kann auch im Übergangsbereich von Up- und Downdaft in die Senkrechte gebracht werden. Wenn die Rotationsenergie des Wirbels groß genug ist, kann im Zusammenwirken mit der Rotation der Superzelle ein nach unten wachsender schlauchförmiger Wirbel entstehen. Dieser wird als „Funnel“ bezeichnet, wenn dieser den Erdboden erreicht wird von einem Tornado gesprochen.

Der Tornado berührt in der Regel nur wenige Minuten den Boden, kann jedoch auch stundenlang andauern. Sobald der Tornado den Boden berührt, reißt dieser alles mit, was ihm in den Weg kommt. Hierbei wirbelt er im unteren Bereich viel Staub und Schutt auf. Die Rotationsgeschwindigkeiten reichen von 150 bis 550 km/h. Auf Basis dieser Geschwindigkeiten wird die Stärke eines Tornados in 5 Stufen eingeteilt. Auch Schallgeschwindigkeit könnte auftreten. Aufgrund der hohen Rotationsgeschwindigkeit treten starke Zentrifugalkräfte auf. Diese bewirken im Innern des Tornados einen Druckabfall um 50 bis 100 hPa. Das führt auch zu einer adiabatischen Abkühlung, was zum Auskondensieren des reichlich vorhandenen Wasserdampfes führt. Dieser auskondensierte Wasserdampf bildet den Wirbelsturm deutlich in Form eines Elefantenrüssels ab.

Staubteufel und Sandhexen sind keine Tornados. Sie haben Durchmesser von 1 bis 2 Metern, reichen nur einige Meter in die Höhe und haben oft nur eine Lebensdauer von ein paar Minuten. Sie entstehen an heißen Sommertagen über sehr aufgeheizten Böden. Unterschiede in der Bodentemperatur führen zu dynamischen Vorgängen, welche warme Luft wirbelförmig nach oben aufsteigen lassen.

Tropische Wirbelstürme werden je nach Entstehungsort als Hurrikane, Taifune und Zyklone bezeichnet. Sie sind von einem Tornado klar zu unterscheiden. Gemeinsam haben sie lediglich einen um 50 bis 100 hPa geringeren Kerndruck. Auch tropische Wirbelstürme werden aufgrund ihrer Wirbelgeschwindigkeit in fünf Kategorien eingeteilt, allerdings werden maximale Geschwindigkeiten um 300 km/h erreicht. Das Geschwindigkeitsmaximum wird etwa 30 bis 50 km um das Zentrum erreicht, wobei das Zentrum, welches als Auge bezeichnet wird, einen Durchmesser von etwa 20 bis 40 km hat. Tropische Wirbelstürme sind oft von sintflutartigen Regenfällen begleitet und können Wellen mit Höhen von 15 bis 20 Metern erzeugen.

Die Tropischen Wirbelstürme entstehen ausschließlich über den Ozeanen in einer Zone zwischen 5° und 20° nördlicher und südlicher Breite. Sie werden von der Corioliskraft beeinflusst wie die Tiefdrucksysteme und rotieren entsprechend. Für ihre Entstehung ist eine Wassertemperatur von mindestens 26 bis 27°C erforderlich. Die Energie erzielen tropische Wirbelstürme überwiegend aus Kondensationsvorgängen, womit entsprechend hohe Wassertemperaturen erforderlich sind. Außerhalb dieses Temperaturbereichs oder auf dem Land schwächen sie sich ab. Die genaue Entstehung eines tropischen Wirbelsturms ist noch nicht geklärt. Störungen im Luftdruckfeld, welche sich in Form von Wellen bewegen, tragen wahrscheinlich im Zusammenspiel mit der von Ost nach West verlaufenden Passatströmung zur Wirbelbildung bei.

3.3 Wolken

Die Wolken werden klassifiziert nach ihrem Aussehen und der Höhe ihrer Untergrenze. So gibt es zunächst eine Unterteilung in hohe, mittelhohe und tiefe Wolken. Es gibt 10 Wolkengattungen, 14 Wolkenarten und 9 Wolkenunterarten.

Die hohen Wolken haben ihre Untergrenzen in einer Höhe von etwa 6000 Metern und bestehen aus Eiskristallen. Die Wolkengattungen Cirrus (hohe Federwolken), Cirrocumulus (hohe Haufenwolken) und Cirrostratus (hohe Schleierwolken) gehören zu den hohen Wolken. Cirrus (Ci) sind isolierte Wolken in Form zarter Fäden, Bänder oder Flecken am ansonsten blauen Himmel. Sie zeigen ein faseriges Aussehen. Der Cirrocumulus (Cc) erscheint in Form von weißen, gerippt oder gekörnt aussehenden Bällchen oder Flecken. Diese scheinen flächenartig miteinander verwachsen zu sein. Der Cirrostratus (Ci) ist eine hohe Schichtwolke, welche als weißer Schleier erscheint und ein faseriges oder glattes Aussehen hat. Sie ist so dünn, dass die Sonne hindurch scheinen kann. An den Eiskristallen der dünnen Schichtwolke kann es zu Brechungs- und Reflexionsvorgängen kommen, so dass ein farbiger und ringförmiger Halo entstehen kann.

Die mittelhohen Wolken haben ihre Untergrenzen in einem Höhenbereich von etwa zwischen 2000 und 6000 Metern. Zu ihnen gehören die Wolkengattungen Altocumulus (grobe Haufen- bzw. Schäfchenwolke) und Altostratus (mittelhohe Schichtwolke). Der Altocumulus (Ac) ist eine weißgraue und zusammengewachsene Wolke aus Bällchen und Flecken. Diese Bällchen und Flecken sind etwas größer als beim Cirrocumulus. Der Altostratus (As) ist eine graue, mittelhohe Wolkenschicht von einförmigem Aussehen. Diese Wolkenschicht kann unterschiedlich dick sein, so dass die Sonne noch schwach hindurch scheinen kann oder vollständig verdeckt wird.

Die tiefen Wolken haben ihre Untergrenzen in einer Höhe von etwa unterhalb von 2000 Metern. Zu ihnen gehören die Wolkengattungen Nimbostratus (Regen-Schichtwolke), Stratocumulus (Schicht-Haufenwolke), Stratus (tiefe Schichtwolke), Cumulus (Haufenwolke) und Cumulonimbus (Schauer- und Gewitterwolke). Der Nimbostratus (Ns) ist eine dunkelgraue Schicht- und Regenwolke. Diese Wolkengattung ist verwandt mit dem Altostratus, jedoch niedriger und zeigt das Auftreten von Wolkenfetzen. Der Nimbostratus kann großflächig auftreten und zu langanhaltenden Regen oder Schneefall führen. Der Stratocumulus (Sc) ist eine tiefe Haufenschichtwolke, welche aus zu einer Wolkenschicht zusammengewachsenen grauweißen Ballen und Schollen besteht. Der Stratus (St) ist eine durchgehende, graue und tiefe Wolkenschicht. Die Untergrenze dieser Wolke kann so niedrig sein, dass sie die oberen Teile von Masten, Hochhäusern und Türmen einhüllt. Daher wird in diesem Fall auch von Hochnebel gesprochen. Der Nebel als solches ist im Prinzip eine Wolke die bis zum Erdboden reicht. Niederschläge treten nur in Form von leichtem Sprühregen oder Schneegriesel auf.

Der Cumulus (Cu) ist eine isolierte und tiefe Wolke, welche sich scharf gegenüber dem blauen Himmelshintergrund abhebt. In der Vertikalen weist die Wolke Formen von Hügeln und Kuppeln und zeigt ein blumenkohlartiges Aufquellen. Aus diesem Grund wird der Cumulus auch als Quell- und Haufenwolke bezeichnet. Die von der Sonne beschienenen oberen Teile der Wolke erscheinen weiß, während die unteren nicht von der Sonne beschienenen Teile dunkel erscheinen. Die Untergrenze der Wolke verläuft weitgehend horizontal.

Der Cumulonimbus (Cb) erreicht in den gemäßigten Breiten eine Höhe von 10 Kilometern und in den Tropen sogar eine Höhe von 17 Kilometern. Damit dehnt sich diese Wolke über den Bereich der mittelhohen Wolken bis in den Bereich der hohen Wolken aus. Aufgrund ihrer Untergrenze gehört sie zu den tiefen Wolken. Wasser kommt in Form von Eiskristallen im oberen Bereich, unterkühlten Tropfen und Tropfen vor. Der obere Teil der Schauer- und Gewitterwolke kann die Form eines Ambosses annehmen, während der oft sehr dunkle untere Teil Wolkenfetzen aufweist. Unterkühlte Tropfen sind flüssiges Wasser bei unter 0°C.

Wolken bestehen aus Wassertropfen, welche aus verschiedenen Gründen in der Luft auskondensieren. Je nach Wolkengattung variiert die Anzahl der Tropfen pro Kubikzentimeter. Die höchsten Werte mit etwa 400 Tropfen pro cm³ erreichen die Wolkengattungen Altostratus, Stratus und Stratocumulus, gefolgt von Cumulus mit rund 350 Tropfen pro cm³, Nimbostratus mit rund 250 Tropfen pro cm³ und Cumulonimbus mit rund 100 Tropfen pro cm³. Die mittleren Tropfendurchmesser betragen bei Altostratus, Stratus und Stratocumulus 10 µm, bei Nimbostratus 15 µm und bei Cumulonimbus 40 µm. In anderen Wolkengarten können Größen von 15 bis 20 µm vorkommen.

Aufgrund von Verdunstungsvorgängen reichert sich die Atmosphäre mit Wasserdampf an. Die Wolkenbildung erfolgt durch Kondensation von Wasserdampf in der Atmosphäre. Vorhandensein dafür müssen Wasserdampf und Kondensationskerne bei einer bestimmten Temperatur. Wasserdampf ist Wasser im gasförmigen Aggregatzustand und wird aus historischen Gründen als Wasserdampf bezeichnet. Des Weiteren ist die Temperatur entscheidend. Eine Wolke kann in Abhängigkeit vom Druck und von der Temperatur nur eine bestimmte Menge Wasserdampf aufnehmen. Bei 20°C sind es 17 g/m³, bei 10°C 9 g/m³, bei 0°C 5 g/m³, bei -10°C 2 g/m³ und bei -20°C 1 g/m³. In der Regel entstehen Wolken durch aufsteigende Luft, welche sich dabei um ca. 0,65°C pro 100 Meter abkühlt.

Die Gründe für das Aufsteigen der Luft können hierbei verschieden sein. So hebt sich die Luft an einem Hindernis, etwa einem Berg. Doch häufiger sind konvektive Vorgänge dafür verantwortlich. So steigt warne Luft nach oben und kühlt sich hierbei ab. Wenn die Speicherkapazität für Wasserdampf mit zunehmender Höhe abnimmt, kondensiert das Wasser in Form von Tropfen aus. In Tiefdrucksystemen wird Luft in große Höhen transportiert und abgekühlt. Der Übergang von gasförmigem Wasserdampf zu flüssigem Wasser erfolgt an sogenannten Kondensationskeimen, feste und sehr kleine Staubpartikel. An diesen lagert sich das Wasser an und die Tropfen können beginnen zu wachsen. Erst ab einer bestimmten Größe können diese Tropfen in Form von Niederschlägen den Erdboden erreichen.

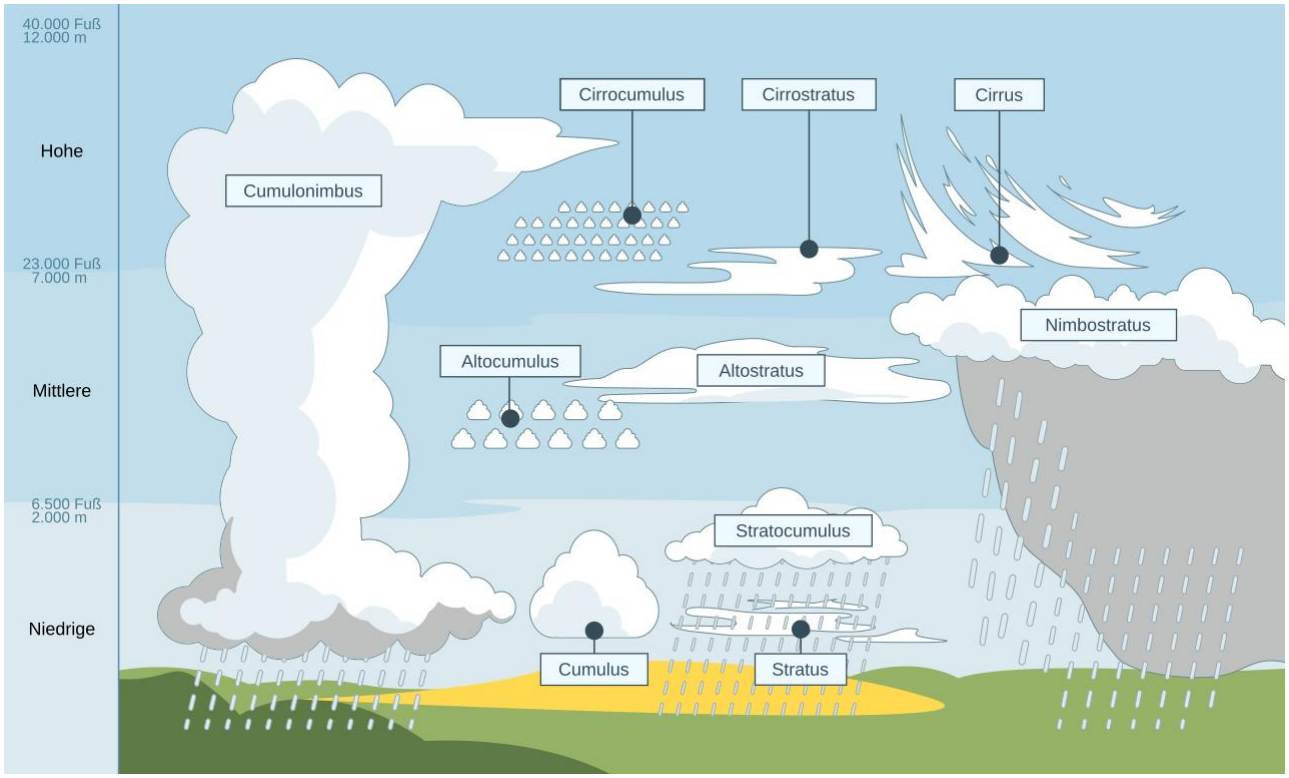

Bild 6: Die Wolkengattungen und -höhen / Quelle: Wikipedia CC BY-SA 3.0

3.4 Niederschläge

Niederschläge können in flüssiger Form als Niesel und Regen sowie in fester Form als einzelne Eiskristalle, Schnee, Graupel, Hagel und Eiskörner auftreten. Diese einzelnen Niederschlagsarten sollen nachfolgend im Einzelnen betrachtet werden.

Nieselregen hat Tröpfchen-Radien von 0,05 bis 0,25 mm. Dieser Sprühregen fällt in der Regel aus tiefen Stratuswolken. Er kann aber auch in einem dichten, nässenden Nebel entstehen. Die Niesel-Tröpfchen entstehen durch das zufällige Zusammenstoßen und Zusammenfließen von Wolken-Tröpfchen. Dieser Vorgang wird als Koaleszenz bezeichnet. Der Vorgang wird durch den Abbau der Oberflächenspannung von einzelnen Tröpfchen gefördert. Einzelne Tröpfchen besitzen eine größere Oberfläche als der daraus entstehende Tropfen. Durch die Verringerung der Oberfläche sinkt im Ergebnis auch die Oberflächenspannung. Aufgrund ihrer geringen Größe haben die Niesel-Tröpfchen Fallgeschwindigkeiten von 0,25 bis 2,0 m/s und werden daher leicht vom Wind mitgenommen. Nieselregen entsteht typischerweise beim Einströmen von feuchten Warmluftmassen von wärmeren in kältere Gebiete. Durch den Kontakt mit dem Boden werden dieses feuchten Warmluftmassen auskondensiert, und es entsteht Nieselregen.

Regen hat Tropfen-Radien von 0,25 bis 3,00 mm, womit es einen fließenden Übergang von Nieselregen zum Regen gibt. Unterschieden wird der Regen nach seiner Dauer und Intensität. So kann Regen als Schauerregen kurzzeitig mit hoher Intensität oder lang anhaltend mit weniger Intensität auftreten. Im letzten Fall wird von Landregen gesprochen. Die Wolken-Tröpfchen haben Radien von 0,00003 mm, so dass etwa eine Million dieser Tröpfchen für die Bildung eines Regentropfens benötigt werden. Die Entstehung von Regentropfen ist komplex. So können zunächst größere Tropfen wie beim Nieselregen durch Koaleszenz aus kleineren Tröpfchen entstehen. Die Fallgeschwindigkeit nimmt mit der Größe der Tropfen zu. Größere Tropfen stoßen also mit den auf dem Weg nach unten befindlichen kleineren Tropfen bzw. Tröpfchen zusammen und wachsen durch das Zusammenfließen an. Durch starke Aufwinde können größere Tropfen in der Schwebe gehalten und mit kleineren Tröpfchen zur Koagulation gebracht werden, d. h. die kleineren Tröpfchen kleben sich bildlich gesprochen an den größeren Tropfen an, womit diese insgesamt anwachsen. Die Aufwinde können in Extremfällen eine Geschwindigkeit von bis zu 30 m/s erreichen, womit Wassertropfen gefrieren und damit zu Eiskristallen werden. Genaugenommen gefrieren unterkühlte Wassertropfen zu Eiskristallen. Diese Eiskristalle wachsen weiter an, bis sie aufgrund ihres Gewichtes nach unten fallen. Wenn hierbei die Temperaturgrenze von 0°C überschritten wird, schmelzen die Eiskügelchen und werden zu großen Regentopfen. Tropfen mit einem Radius von über 3,0 mm werden instabil. Sie verformen sich beim Fallen und reißen hierbei auseinander.

Schnee entsteht genauso wie ein Regentopfen. Allerdings liegen im Falle von Schnee die Temperaturen ausreichend unter 0°C, so dass die sich bildenden Eiskristalle nicht schmelzen. Aus unterkühlten Wassertropfen entstehen Eiskristalle. Eine Lage von Wassermolekülen nach der anderen wird hierbei auf der Kristalloberfläche aufgebaut. Die Kristallformen hängen von den Feuchtigkeitsverhältnissen und der Temperatur ab. Es gibt rund 200 unterschiedliche Formen von Schneekristallen. Auf dem Weg vom Entstehungsort zum Boden durchlaufen die Schneekristalle Gebiete mit unterschiedlichen Feuchtigkeitsverhältnissen und Temperaturen, so dass sich die Gestalt der Schneekristalle während der Fallzeit noch ändern kann. Schneekristalle haben während des Fallens Größen zwischen 1 und 5 mm. Durch Anfrieren von unterkühlten Wassertropfen können Schneekristalle auf bis zu 10 cm anwachsen. Sie haben dann eine unregelmäßige Gestalt und werden als Schneeflocken bezeichnet. Es gibt weitere Prozesse von Agglomeration (Anwachsen) und Koagulation (Ankleben) bei unterschiedlichen Rahmenbedingungen, so dass es eine Vielzahl von Erscheinungsformen von Schneeflocken gibt. Bei Temperaturen von unter -20°C ist keine dendritische Kristallbildung mehr möglich, so dass es bei diesen Temperaturen nicht mehr zum Schneefall kommt.

Graupel sind Eis- oder Schneekristalle, welche mit vielen gefrorenen Wassertröpfchen überzogen sind. Wie bereits oben beschrieben können kleine unterkühlte Wasser mit einzelnen Eiskristallen koagulieren. Die Anzahl der koagulierenden Tröpfchen kann so groß sein, dass die ursprüngliche Kristallform nicht mehr erkennbar ist. Damit kann unter bestimmten Voraussetzungen eine poröse und undurchsichtige Kugel mit einem Durchmesser von einigen Millimetern entstehen. Diese Kügelchen werden als Graupel bezeichnen. Im Gegensatz zu Hagel sind diese deutlich kleiner und auch weniger fest. Sie zerplatzen in der Regel beim Auftreffen auf dem Boden. Sie sind brüchig und spröde und lassen sich leicht zerdrücken. Graupel kann alleine und zusammen mit Schnee auftreten, wobei Graupel alleine in der Regel im Frühjahr auftritt.

Hagel sind schalenartig aufgebaute Eisklümpchen, welche Durchmesser von 10 cm und mehr erreichen können. Sie entstehen in Cumulonimbuswolken aus unterkühlten Wassertropfen. Diese setzen sich in großer Zahl auf die geringere Zahl von vorhandenen Eiskristallen ab. In Folge kommt es zu einem explosionsartigen Wachstum dieser Eiskristalle. Aufgrund des Freiwerdens von Kondensationsenergie werden in der Cumulonimbuswolke Aufwinde von 20 bis 30 m/s erzeugt. Die fallenden Eiskristalle werden immer wieder durch den Aufwind nach oben getragen und immer wieder lagern sich hierbei unterkühlte Wassertropfen an. Dadurch erhalten die Hagelkörner ihren zwiebelartigen Aufbau. Ab einem bestimmten Gewicht kann der Aufwind den freien Fall der Hagelkörner nicht mehr aufhalten. Sie fallen hierbei mit Geschwindigkeiten von 25 bis 33 m/s was 90 bis 120 km/h entspricht. Die feste Masse und die hohe Fallgeschwindigkeit erklären auch die hohe Zerstörungskraft des Hagels. Die Aufwinde im Cumulonimbus werden in etwa 8.000 Metern Höhe durch die Tropopauseninversion zunehmend begrenzt und müssen daher seitlich ausweichen. Auf diese Weise entsteht die typische Ambossform am oberen Teil des Cumulonimbus. Die Tropopause ist der Übergangsbereich zwischen Troposphäre und Stratosphäre.

3.5 Gewitter

Ein Gewitter stellt eine elektrische Entladung in der Atmosphäre da. Quelle der Entladung ist ein starkes elektrisches Feld innerhalb einer Wolke, welche durch Ladungstrennung entsteht. Die Entladung kann innerhalb der Wolke, zwischen Wolken und zwischen Wolke und Erdboden erfolgen. Voraussetzung für die Entstehung eines Gewitters sind das Aufeinandertreffen von stark unterschiedlich temperierten Luftmassen oder große vertikale Temperaturunterschiede in der Atmosphäre. Es gibt Luftmassengewitter, Frontgewitter und orthographische Gewitter.

Ein Luftmassengewitter ist ein typisches Wärmegewitter. Feuchte und warme Luft wird durch starke Sonnenstrahlung von Boden aus labilisiert, es kommt zur Konvektion. Bei einer Konvektion steigen warme Luftmassen auf und die kühleren sinken wieder ab. Der gleiche Vorgang kann bei kochendem Wasser auf einem Herd beobachtet werden. Feucht-warme Luft steigt weit nach oben und kühlt dabei ab. Es bilden sich Cumuluswolken, welche sich über die Stadien Cumulus Mediocris und Cumulus Congestus zu einem Cumulonimbus entwickeln können. Diese Wolke erreicht in den gemäßigten Breiten Höhen von 10 bis 12 Kilometern. Innerhalb der Wolke finden dynamische Prozesse statt, welche zur Ladungstrennung und damit zum Aufbau eines elektrischen Feldes führen. Wasser kommt oberhalb der Wolke in gefrorenem Zustand, im Übergangsbereich durch unterkühlte Tropfen und im unteren Bereich in Form von Wasser vor. Unterkühltes Wasser ist flüssiges Wasser bei unter 0°C. In der Regel treten Wärmegewitter vom Nachmittag bis zum Abend auf. Nach der Entladung kann sich das warme Sommerwetter wieder fortsetzen.

Frontgewitter treten im Zusammenhang mit Kalt- und Warmluftfronten auf. Im Falle einer Kaltfront treten diese Gewitter an der Frontgrenze auf. Die Kaltluft bewirkt eine Labilisierung und Konvektion der Luftmassen. Durch diese dynamischen Vorgänge kommt es ebenfalls zu einer Ladungstrennung und zum Aufbau eines elektrischen Feldes.

Bei Warmfrontgewittern bewirkt eine Kaltfront ein Aufgleiten der warmen Luftmassen und deren Labilisierung. Die Warmfrontgewitter finden aufgrund des Aufgleitens der warmen Luftmassen in höheren Bereichen der Atmosphäre statt. In diesem Fall erfolgen die Entladungen innerhalb der Wolke oder von Wolke zu Wolke. Frontgewitter können zu allen Jahres- und Tageszeiten auftreten. Sie können auch großflächig auftreten.

Die orthographischen Gewitter entstehen auch durch das Aufgleiten von warmen Luftmassen. Allerdings sind hierfür natürliche Hindernisse wie Gebirge für verantwortlich.

Ein Blitz ist ein elektrischer Strom, welcher zum Ausgleich von negativen und positiven elektrischen Entladungen führt. Unterschieden werden Erdblitze, Luftblitze und Wolkenblitze. Erdblitze können nur entstehen, wenn die Wolkenuntergrenze nicht höher als 3000 Meter ist. Sie erreichen in Mitteleuropa Längen von 1 bis 2 km. In den Tropen hingegen können die Wolkenuntergrenze auch höher liegen und die Blitze Längen von 2 bis 3 km erreichen. Ein Luftblitz ist eine Entladung zwischen einer Wolke und dem wolkenfreien Luftraum. Bei Wolkenblitzen tritt die Entladung innerhalb der Wolke oder zwischen Wolken auf. In Mitteleuropa sind 65 Prozent der Blitze Wolkenblitze. Erdblitze machen etwa 20 Prozent aller Blitze aus.

Bild 7: Ein weitverzweigter Blitz mit Bodeneinschlag / Foto von Ralf Schmidt AVWF

Die genaue Entstehung des Blitzes ist noch nicht abschließend erforscht und geklärt. Beobachtet wird eine Ladungstrennung in Form von ionisierten Wassermolekülen, welche in flüssiger, unterkühlter und gefrorener Form in der Gewitterwolke vorkommen. Die gewaltigen Aufwinde führen zu Kollisionen zwischen den Wassermolekülen in den verschiedenen Zuständen. Einige werden dadurch positiv geladen, die anderen negativ. Die positiv geladenen Moleküle sammeln sich im oberen Bereich der Wolke an, die negativen im unteren Bereich der Wolke. Nach einer Theorie sind die positiv geladenen Moleküle leichter und werden durch die Aufwinde nach oben transportiert. Die schwereren negativ geladenen Moleküle bleiben unten.

Nach einer anderen Theorie werden die negativ geladenen Moleküle zunächst durch Aufwinde nach oben transportiert und gelange erst durch seitliche Abwinde nach unten. Die Grenze zwischen negativ und positiv geladenen Molekülen liegt in einem Temperaturbereich von -15°C bis -20°C. In diesem Bereich treten Eisteilchen und unterkühlte Wassertropfen gleichzeitig auf. Es finden massive Gefriervorgänge statt.

Wenn sich aufgrund der Ladungstrennung ein ausreichend großes elektrisches Feld mit Durchschlagpotential aufgebaut hat, kommt es zur Entladung. Im Falle eines Erdblitzes kann der Boden gegenüber der negativ geladenen unteren Seite der Wolke positiv geladen sein. Im Erdboden sind ebenfalls Moleküle vorhanden, insbesondere auch Wasser. In Molekülen sind die Ladungen nicht immer gleichmäßig verteilt, so dass es Schwerpunkte mit Überschüssen von negativer oder positiver Ladung gibt. Im Erdboden richten sich nun die Moleküle mit ihrem positiven Ladungsschwerpunkt gegenüber der Wolke aus. Von der Erdoberfläche gehen eine Reihe von Vorentladungen aus. Trifft diese auf eine Fangladung, welche von der Wolke ausgeht, entsteht der Blitzkanal und es fließt ein elektrischer Strom. Dieser Strom erreicht bei Spannungen von 20 bis 30 Millionen Volt Stärken von 20.000 bis 40.000 Ampere. Die Luft im Blitzkanal wird bei diesem Vorgang auf bis zu 30.000°C erhitzt.

Die Luft dehnt sich mit Überschallgeschwindigkeit aus und erzeugt eine Schockwelle, welche wir als Donner wahrnehmen. Der eigentliche Blitzkanal hat einen Durchmesser von etwa 12 mm. Dennoch erscheint der Blitz deutlich dicker zu sein. Das liegt an der Ionisation der umgebenen Luft aufgrund der hierbei erzeugten Hitze. Nach der Rekombination wird die überschüssige Energie in Form von Licht abgestrahlt, was auch das Nachleuchten im Blitzkanal nach Durchgang der Entladung erklärt.

3.6 Wettervorhersage

Die Beobachtung der meteorologischen Erscheinungen in der Troposphäre wie Färbungen des Himmels, Entwicklung und Zugrichtung der Bewölkung sowie der meteorologischen Elemente Lufttemperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit mit Hilfe von Messgeräten ermöglich bereits einfache Prognosen zur Wetterentwicklung. Auch die Tiere zeigen in Abhängigkeit der Wetterentwicklung bestimmte Verhaltensweisen.

Ein kräftiges Morgenrot, bereits vor Sonnenaufgang, lässt eine erhebliche Wetterverschlechterung erwarten. Weitere Kriterien wie ein Abendgrau, Sonnenringe und Nebensonnen, eine gute Fernsicht, steigender Nebel und ein starker Wind bei klarem Morgenhimmel unterstützen die Prognose für eine Wetterverschlechterung. Im Gebirge erscheinen die Berge dunkelgrau, während über dem Meer eine besondere Fernsicht herrscht. Die Tiere zeigen ebenfalls bestimmte Verhaltensweisen bei einer Wetterverschlechterung. Ameisen laufen bei drohendem Niederschlag unruhig hin und her. Mücken, Wespen und andere Insekten zeigen bei drohendem Gewitter eine höhere Aggressivität gegenüber Menschen. Rot und Rehwild verlässt bei drohendem Regen oder Gewitterschauern kaum den Wald. Bei drohendem Unwetter reagieren auch manche Pflanzen. So lässt der Klee seine Blütenköpfe hängen und faltet seine Blütenblätter zusammen.

Ein schönes Abendrot am wolkenlosen Himmel deutet auf gutes Wetter am nächsten Tag hin. Das Erscheinen von rötlich angestrahlten Cirren deutet sogar auf beständiges gutes Wetter in den nächsten Tagen hin. Weitere Anzeichen für gutes Wetter sind Morgentau und ein starker Tau frühmorgens. Ein Ostwind kann im Sommer große Hitze bringen und im Winter einen starken Frost. Die Mücken spielen bei guter Wetterprognose in Schwärmen in der Abendsonne. Die Bienen schwärmen aus, um Blütenstaub aufzunehmen. Spinnen bauen ihre Netze bei guter Wetterentwicklung, da sie das für ihre Netze benötigte Material nicht unbegrenzt produzieren können und sie es daher nur bei einer hierfür geeigneten Wetterlage machen.

Für die persönlichen Wetterprognose eignen sich auch ein Außenthermometer zur Messung der Lufttemperatur, ein Barometer zur Messung des Luftdruckes und ein Hydrometer zur Messung der Luftfeuchtigkeit. Besonders die Art und Geschwindigkeit der Änderungen der meteorologischen Elemente deuten auf die weitere Wetterentwicklung hin. Grob zusammengefasst deuten langsame Veränderungen auf anhaltendes Wetter hin und schnelle Änderungen auf unbeständiges Wetter. Nachfolgend soll etwas detaillierter auf die Änderungen der meteorologischen Elemente und der sich daraus möglichen Prognose für die Wetterentwicklung eingegangen werden.

Das Außenthermometer darf nicht der direkten Sonnenstrahlung ausgesetzt sein. Es sollte in nördliche Richtung ausgerichtet sowie weit genug vom Boden oder einer Wand entfernt sein, damit es zu einer materialbedingten Wärmestrahlung auf das Thermometer kommt. Ein rasches Absinken der Temperatur im Sommer könnte auf ein Gewitter hindeuten. Im Winter deutet ein rasches Absinken der Temperatur auf langhaltenden Frost mit einer kalten Hochdrucklage aus dem Osten hin. Werden im Hochsommer bereits Temperaturen von über 20°C am Morgen erreicht, so deutet sich ein heißer Tag an. Im Winter folgt bei nachlassender Kälte bzw. einem Anstieg der Temperaturen in der Regel Tauwetter.

Die Änderung des Luftdrucks und die Geschwindigkeit dieser Änderung lassen sich für eine Wetterprognose heranziehen. Bei einem fallen des Luftdrucks lässt sich schlechtes Wetter erwarten. Wenn der Luftdruck schnell fällt, dann ist Sturm zu erwarten. Im Sommer kann ein schnell fallender Luftdruck auf ein Gewitter hindeuten. Ein Ansteigen des Luftdrucks lässt gutes und sonniges Wetter erwarten. Im Herbst kann ein ansteigender Luftdruck auf länger anhaltendes gutes Wetter hindeuten. Die Barometer für den Hausgebrauch sind entsprechend oft mit den Begriffen für schlechtes Wetter bei tiefem Druck, unbeständiges Wetter bei mittlerer Druckentwicklung und gutem Wetter bei hohem Druck versehen. Allerdings sind das nur Richtwerte, welche nicht immer stimmen. Auch bei tiefem Druck kann gutes Wetter und bei hohem Druck schlechtes Wetter auftreten.

Die Luftfeuchtigkeit ist ebenfalls ein Anhaltspunkt für eine Wetterprognose. Ein Wert von 50 % Luftfeuchtigkeit deutet auf eine stabile Wetterlage mit trockener Luft und schönem Wetter hin. Eine Luftfeuchtigkeit in Richtung 100 % deutet auf eine Wetterverschlechterung hin. Im Sommer werden Tage mit hoher Luftfeuchtigkeit als schwül wahrgenommen. In diesem Fall kann ein Wärmegewitter entstehen.

Die Stärke und Richtung des Windes liefern ebenfalls Indizien für eine Wetterprognose. Die Windrichtung gibt an aus welcher Richtung der Wind kommt. So kommt ein Nordwind aus dem Norden und weht in Richtung Süden. Kommt der Wind aus Süd bis West ist mit einer Wetterverschlechterung zu rechnen. In diesem Fall ist der Wind abnehmend und hat eine Stärke von 1 bis 4. Ein Wind aus Nordost bis Ost deutet hingegen auf eine Wetterverbesserung hin. In diesem Fall ist der Wind zunehmend auf eine Stärke von über 5.

In der wissenschaftlichen Meteorologie werden mit Messstationen zu Lande, im Wasser, in der Luft und im Weltraum weltweit jeweils um 00:00, 06:00, 12:00 und 18:00 Uhr Weltzeit (UTC) folgende meteorologische Größen gemessen: Luftdruck, Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur, Taupunkt, Windgeschwindigkeit und Windrichtung, Wolkenart und -grenzen / Bedeckungsgrad, Sichtweite, Niederschlagsmenge und –art. Die Beobachtung des Wettergeschehens wird als synoptische Meteorologie bezeichnet.

Neben der Beobachtung spielt auch die Berechnung des zukünftigen Wettergeschehens mit Hilfe von mathematisch-physikalischen Differenzialgleichungen eine wichtige Rolle. Dies ist das Gebiet der numerischen Meteorologie. Der Planet Erde wird für die numerische Berechnung des Wettergeschehens mit einem Gitternetz überzogen.

Für jeden diskreten (endlich abzählbaren) Gitterpunkt werden Differenzialgleichungen für die physikalischen und chemischen Vorgänge in der Atmosphäre gelöst, um die Entwicklung von meteorologischen Größen wie z.B. Luftdruck, Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Windgeschwindigkeit für die nahe Zukunft zu berechnen.

Die Kürzestfristvorhersage umfasst ein Zeitintervall von bis zu 12 Stunden und hat dabei eine Eintreffwahrscheinlichkeit von 90 Prozent. Die Kurzfristvorhersage umfasst ein Zeitintervall von 12 bis 72 Stunden und erreicht hierbei noch eine Eintreffwahrscheinlichkeit von 75 Prozent. Für die Mittelfristvorhersage (3 bis 10 Tage) und die Langfristvorhersage (10 bis 14 Tage) sind die Eintreffwahrscheinlichkeiten deutlich geringer. Allerdings ist die Eintreffwahrscheinlichkeit auch von der konkreten Wetterlage abhängig. So liegt sie im Falle einer Winterhochdrucklage für sieben Tage bei 90 Prozent und bei einer Sommergewitterlage für nur noch 24 Stunden bei 70 Prozent.

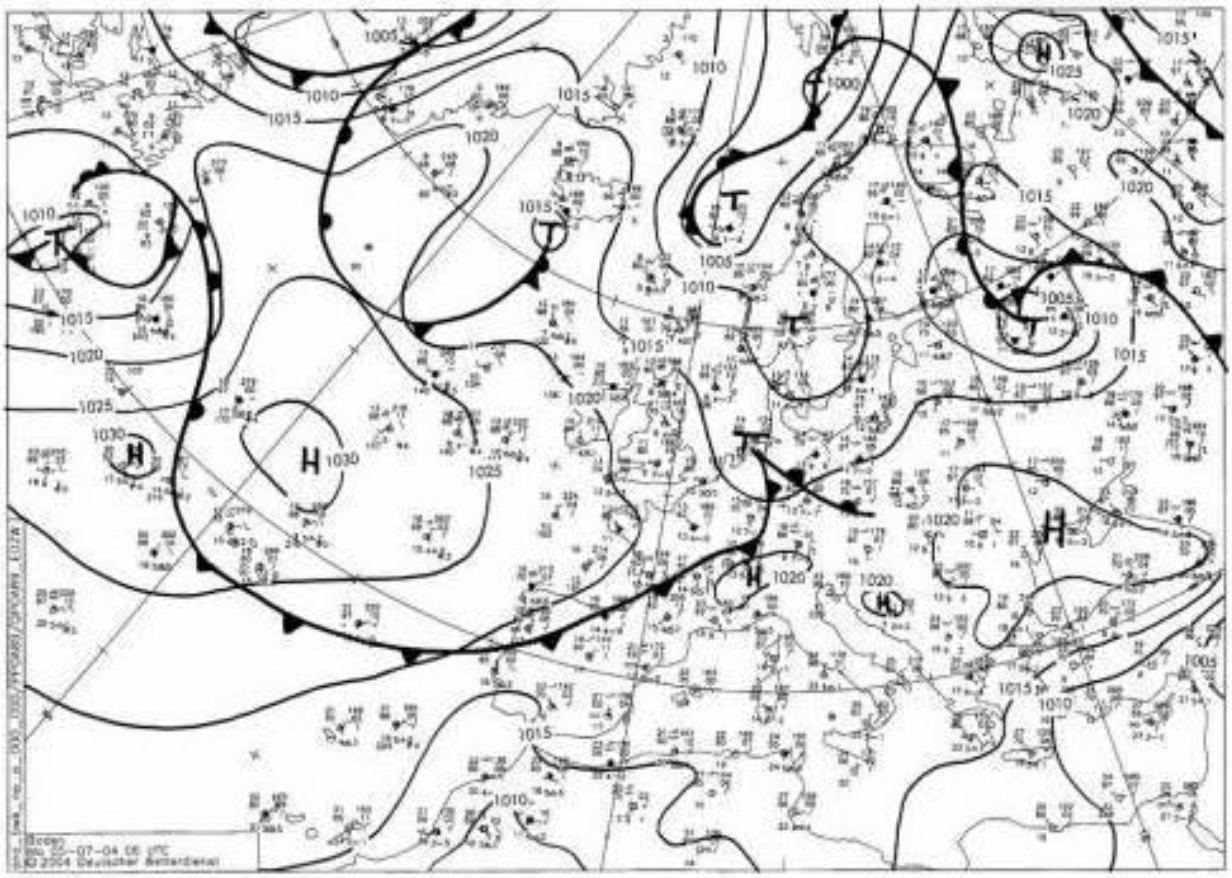

Bild 8: Eine Wetterkarte / Quelle: Wikipedia (Gemeinfrei)

Im Übergangsbereich vom Wetter zum Klima ist noch der Begriff der Witterung zu definieren: „*Als Witterung wird der durchschnittliche Charakter des Wetterablaufs an einem Ort oder in einem Gebiet über mehrere Tage bis zu mehreren Wochen bezeichnet*.“ Dieser Zeitraum ist wesentlich kürzer als jener, der für die Definition des Klimas zugrunde gelegt wird.

4 Klimatologie

Die Klimatologie ist eine interdisziplinäre Wissenschaft, ein Teilgebiet der Geophysik im weiteren Sinn. Die Geophysik im weiteren Sinn beinhaltet alle physikalischen Wissenschaften, welche sich auf die Erde beziehen. Dies ist zunächst die Geophysik im engeren Sinn, welche sich mit der Physik der festen Erde befasst. Dazu gehören unter anderem Seismologie und Vulkanologie. Die Physik der Atmosphäre ist Gegenstand der Meteorologie. Mit diesem Gebiet hat die Klimatologie die größten Schnittmengen. Weitere Gebiete sind die Geographie, die Ozeanographie, die Glaziologie (Physik des Eises) und die Geochemie, wobei diese Aufzählung nicht abschließend ist.

4.1 Das Klimasystem und die Klimaelemente

Für das Klima gibt es aufgrund der Komplexität der Thematik keine abgeschlossene und einfache Definition. Eine umfangreichere Definition lautet „*Das terrestrische Klima ist für einen Standort, eine definierbare Region oder ggf. auch globale statistische Beschreibung der relevanten Klimaelemente, die für eine nicht zu kleine zeitliche Größenordnung die Gegebenheiten und Variationen der Erdatmosphäre hinreichend ausführlich charakterisiert. Ursächlich ist das Klima eine Folge der physikochemischen Prozesse und Wechselwirkungen im Klimasystem sowie der externen Einflüsse auf dieses System.“* Allerdings soll auch eine kürzere und gebräuchliche Definition für das Klima angegeben werden: „*Das Klima ist der mittlere Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort oder in einem bestimmten Gebiet über einen längeren Zeitraum.“* Als Zeitspanne empfiehlt die Weltorganisation für Meteorologie (World Meteorological Organization, WMO) mindestens 30 Jahre. Je nach Forschungsgegenständen sind auch Betrachtungen über längere Zeiträume wie Jahrhunderte und Jahrtausende gebräuchlich. So befasst sich die Paläoklimatologie mit dem jeweiligen Klima der verschiedenen Erdzeitalter.

Das Klimasystem der Erde umfasst folgende Bereiche:

- Atmosphäre
- Hydrosphäre (Ozeane, Meere, Flüsse, Seen)
- Biosphäre (Fauna, Flora)
- Lithosphäre (feste, unbelebte Erde)
- Kryosphäre (Eis, Gletscher, Permafrost)

Die Klimatologie umfasst also nicht bloß die Vorgänge in der Atmosphäre der Erde, wenn gleich hier der Schwerpunkt liegt. Analog zu den meteorologischen Größen werden nachfolgende Klimaelemente definiert:

- Lufttemperatur
- Luftfeuchtigkeit
- Luftdruck
- Wind
- Niederschlag
- Sicht
- Bewölkung
- Sonnenscheindauer

Ebenfalls analog wie in der Meteorologie werden physikalische Differenzialgleichungen für Impuls-, Energie- und Massenerhaltung zur Vereinfachung für diskrete Gitterpunkte gelöst, um die zukünftige Entwicklung des Klimas zu berechnen. Für die globalen Klimamodelle werden Gitternetzabstände von etwa 100 km festgelegt. Lokale Klimamodelle können kleinere Gitternetzabstände haben.

Die Klimavorhersagen werden aus den Anfangsbedingungen (den heutigen Werten für die Klimaelemente) berechnet. Des Weiteren werden bestimmte Werte als Randbedingungen festgelegt und so Klimaprojektionen in die Zukunft erstellt. Ausgehend von den heutigen Anfangsbedingungen und den sich aus der heutigen Situation ergebenen Randbedingungen, sagen die verschiedenen Klimamodelle einen Temperaturanstieg von 1,5 bis 4,5 °C, bei einer Häufung von 3,0°C voraus. Bereits in den letzten 100 Jahren ist die mittlere Temperatur der Erde um etwa 1°C von 14°C auf 15°C gestiegen. Allein bis zum Jahr 2030 können weitere 0,5°C dazu kommen.

4.2 Gründe für Klimaschwankungen

Für die Klimaschwankungen sind sowohl exterrestrische und als auch terrestrische Einflüsse verantwortlich. Zu den exterrestrischen Einflüssen gehören: Die Solarkonstante (langfristige Variationen der Sonneneinstrahlung), kurzfristige Änderungen der Solarkonstanten aufgrund der Entwicklung der Sonnenaktivität, die Rotation der Galaxis mit unserem Sonnensystem und die Gezeiten (sowohl durch den Mond als auch durch die Sonne und die anderen Planeten). Die terrestrischen Einflüsse umfassen: der Kontinentaldrift, die Orogenese (Gebirgsbildung), den Vulkanismus, großflächige Brände (z.B. Waldbrände), die Zusammensetzung der Atmosphäre einschließlich der Bewölkung und die Zirkulation der Atmosphäre, Salzgehalt des Ozeans, Zirkulation des Ozeans, Eis- und Schneebedeckung, Vegetation und Autovariationen im Klimasystem.

Sowohl exterrestrischer als auch terrestrischer Natur sind Veränderungen der Erdbahnparameter. Die Erdbahn ist leicht elliptisch. Die Form der Ellipse ist Veränderungen unterworfen. Auch die Stellung der Rotationsachse der Erde ist Veränderungen unterworfen. So dürften Eis- und Warmzeiten auf der Erde ihre Ursache in der Änderung der Erdbahnparameter haben. Dies führt zu einer Änderung der Sonneneinstrahlung mit entsprechenden Rückkopplungseffekten. Verringert sich die Einstrahlung, so wird es kälter auf der Erde und die Eisflächen nehmen zu. Aufgrund der Zunahme der Eisflächen wird auch mehr Sonnenstrahlung in den Weltraum reflektiert, so dass die Temperatur zusätzlich sinkt.

Einen wichtigen Beitrag zum Klima liefert der sogenannte Treibhauseffekt. Kurzwellige elektromagnetische Sonnenstrahlung (Ultraviolette Strahlung) erreicht die Erdoberfläche, welche wiederum von dieser als langwelligere elektromagnetische Strahlung (Infrarotstrahlung) emittiert wird. Die Infrarotstrahlung wird von den sogenannten Treibhausgasen Wasserdampf (60 % Anteil am Treibhauseffekt), Kohlenstoffdioxid (26 %), Ozon (kleiner als 8 %), Lachgas (4 %) und Methan (2 %) absorbiert und wieder zur Erdoberfläche zurück emittiert. In Folge steigt die Temperatur. Aufgrund des natürlichen Treibhauseffektes liegt die mittlere Erdtemperatur bei +14°C und nicht bei -18°C. Während der natürliche Treibhauseffekt erst die für das Leben auf der Erde geeigneten Temperaturen ermöglicht, bewirkt der zusätzliche durch die Menschen verursachte anthropogene Treibhauseffekt einen unkontrollierten Anstieg der mittleren Erdtemperatur.

4.3 Messmethoden der Klimatologie

Die moderne Klimatologie muss natürliche Klimaschwankungen erforschen und diese vom ebenfalls zu erforschendem anthropogenen Klimawandel abgrenzen. Diese Aufgabe ist aufgrund der Erdgeschichte von 4,56 Milliarden Jahren natürlich sehr komplex. Meteorologische Messungen sind abgesehen von Ausnahmen etwa ab Mitte des 17. Jahrhunderts möglich. Weitere Quellen für die Klimaentwicklung von einigen Tausend Jahren sind Chroniken und auch Bilder. Hier zeigt sich schon, dass es in diesen Zeiträumen natürliche Klimaschwankungen gegeben hat. Doch müssen wir auch Zeiträume von 1000, 10.000, 100.000, 1.000.000 und mehr Jahren überblicken können. Dies kann nur mit indirekten Methodiken geschehen, welche nachfolgend vorgestellt werden sollen.

Die Pollenspektren-Methode nutzt die Abhängigkeit der Vegetationszusammensetzung von den klimatischen Bedingungen zur Bestimmung des Klimas einer Epoche. So hat jede Klimaepoche ihre charakteristische Vegetation. Die Pollen lassen sich auch nach mehreren hunderttausend Jahren noch identifizieren und ihr Alter lässt sich ebenfalls bestimmten. Besonders über die Niederschlags- und Temperaturverhältnisse lassen sich Rückschlüsse ziehen. Diese Methode reicht unter günstigen Rahmenbedingungen bis zu 300.000 Jahre zurück.

Die Entwicklung der Jahresringe der Bäume (Dendroklimatologie) ermöglicht einen Rückblick bis zu 10.000 Jahren. Aufgrund der Jahreszeiten befinden sich Bäume abwechselnd in Ruhe- und Vegetationsphasen. Konkret hängen diese von den Temperaturschwankungen ab. Damit hängt die jährliche Entwicklung der Baumringe auch von den klimatologischen Bedingungen ab. Durch Untersuchung der Baumringe kann etwas über die zu einer bestimmten Zeit vorherrschenden Klimabedingungen in Erfahrung gebracht werden. Allerdings wird die Entwicklung der Baumringe auch von anderen Faktoren beeinflusst, so dass diese Methode mit Ungenauigkeiten behaftet ist.

Ablagerungen in Gletscherschmelzwässern liefern Informationen der Entwicklung des Klimas im Bereich von einigen Tausend Jahren. In den abflussarmen Herbst- und Wintermonaten führen Gletscherschmelzwässer mehr feines und tonartiges Material aus zerriebenem Gestein mit sich. In den Frühlings- und Sommermonaten wird hingegen mehr gröberes und sandiges Gestein gefördert. Es bilden sich so innerhalb eines Jahres im Sediment Doppelschichten, welche als Warven bezeichnet werden. Die Gesamtsedimentschicht wird als Bänderton bezeichnet. Die Ausprägung der sandreichen Schichten lässt Rückschlüsse auf die Schmelzwasserführung und damit auf die Sommertemperatur zu.

Die Ausdehnung der Gletscher lässt Rückschlüsse auf die Temperatur zu, da die Entwicklung von Gletschern ebenfalls von den klimatischen Bedingungen abhängig ist. Gletscher besitzen große Massen. Bei ihrem Abschmelzen entsteht ein zäher Brei, welcher sich langsam den Berg herunterbewegt. Dies führt zu starker Erosion. So werden unter anderem Gesteinsbruchstücke geschliffen, welche als Moränen zurückbleiben und frühere Gletscherumrisse markieren.

Die Sauerstoff-Isotopen-Methode liefert Informationen über die Entwicklung des Klimas bis zu einigen Millionen Jahren zurück in die Vergangenheit. Ein Sauerstoff-Atom (Chemisches Symbol O) hat 8 Protonen im Atomkern. Die Anzahl der Neutronen im Atomkern des Sauerstoffs kann 8, 9 und 10 betragen. Die Anzahl der Protonen und Neutronen im Kern ist die Massenzahl. Sie kann hier also zwischen 16, 17 und 18 betragen. Entsprechend wird von Sauerstoff-16 bzw. O-16, O-17 und O-18 gesprochen. Chemisch verhalten sich die Isotope völlig gleich, nur in ihren physikalischen Eigenschaften unterscheiden sie sich. So haben sie schon einmal eine unterschiedliche Masse und können damit unterschiedliche Dichten haben. Auch in ihren Schmelz- und Siedepunkten können sie abweichen.

Bei der Sauerstoff-Isotopen-Methode wird das Verhältnis von O-16 zu O-18 betrachtet. Sowohl O-16 als auch O-18 bilden mit zwei Wasserstoffatomen (H) ein Wassermolekül H_2O. Das Wassermolekül mit einem O-18-Atom ist etwas schwerer als das mit einem O-16-Atom. Aufgrund der unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften geht bei Verdunstung von Meerwasser eher das Wassermolekül mit einem O-16-Atom in die Dampfphase über. In kälteren Phasen wird das verdunstete Wasser in Schneekristallen umgewandelt und diese führen zur Gletscherbildung. Damit nimmt der Anteil von Wassermolekülen mit O-16-Atomen im Meerwasser ab und im Gletschereis zu. In wärmeren Klimaperioden schmilzt das Gletschereis und führt dem Meerwasser wieder mehr Wassermoleküle mit O-16-Atomen zu.

Wenn Tiere im Meer absterben, sinken ihre Schalen auf den Meeresgrund und bilden dort Meeressedimente. Das zur Zeit des Sterbens vorherrschende Verhältnis von O-16 zu O-18 wird so konserviert. Damit sind direkte Rückschlüsse auf die zu dieser Zeit herrschenden Temperaturen möglich. Damit können Kalt- und Warmzeiten für einen Zeitraum von mehreren Millionen Jahren exakt bestimmt werden.

4.4 Die natürliche Entwicklung des Klimas

Nachfolgend soll die Entwicklung des Klimas auf der Erde der letzten 100, 1000, 10.000, 100.000 und 1.000.000 Jahre betrachtet werden. In den letzten 100 Jahren gab es zwischen 1900 und 1950 auf der Nordhalbkugel einen kontinuierlichen Anstieg der durchschnittlichen Temperatur um 1°C. Dadurch hatte sich die Vegetationszeit um drei Wochen verlängert und zum Teil blühten einige Pflanzen schon einige Wochen früher. Auf der Südhalbkugel der Erde betrug der Temperaturanstieg im selben Zeitraum etwa 0,6°C. Zwischen 1950 und 1970 zeigte der Temperaturanstieg eine wellenartige Bewegung nach unten und steigt seit 1970 kontinuierlich an. Die 1990er Jahre waren die wärmste Dekade im 20. Jahrhundert und diese Entwicklung wurde in den letzten Jahren deutlich übertroffen. Wir nähern uns aktuell einer um 1,5°C höheren Durchschnittstemperatur an, mit Tendenz nach oben.

In den letzten 1.000 Jahren gab kältere und wärmere Perioden. Zunächst lässt sich der Aufwärtstrend der Temperatur von 1900 bis 1950 etwa bis Mitte des 17. Jahrhundert zurückverfolgend. Dieser Trend ging aus einer auffälligen Kälteperiode hervor. Zurückgehend ab Mitte des 14. Jahrhunderts lässt sich der Trend zu dieser Kälteperiode deutlich wahrnehmen. Diese Kälteperiode hat zwei Extremwerte in der Mitte des 15. Jahrhunderts und Anfang des 18. Jahrhunderts. Die durchschnittliche Temperatur lag auf der Nordhalbkugel mehr als 1°C unter dem Durchschnittswert des 20. Jahrhunderts. Diese Epoche wird auch als Kleine Eiszeit bezeichnet, auch wenn es sich nicht um eine Eiszeit im klimatologischen Sinne handelte. Chronisten berichten von sehr kalten Wintern, langanhaltend zugefrorenen Gewässern und großen Gletscherausdehnungen. Das Meerwasser war sogar um 3 bis 5°C kälter als im 20. Jahrhundert. Teilweise waren auch die Sommer relativ kühl. Allerdings gab es auch innerhalb der Kleinen Eiszeit durchaus warme Sommer sowie gemäßigte und milde Winter.

Die kleine Eiszeit folgte auf das Mittelalterliche Optimum, einer mehrere Jahrhunderte umfassenden milden Warmperiode. Die Temperatur lag zeitweise etwa 1°C über der Durchschnittstemperatur des 20. Jahrhunderts. Es gab heiße und extrem trockene Sommer. Die Gletscher und das Polareis hatten sich sehr weit zurückgebildet. So war z. B. Grönland, wie im Namen zum Ausdruck kommt, eine grüne Insel. Der Meeresspiegel war hingegen 2 bis 3 Meter höher als heute. Insgesamt waren die kälteren Phasen auch feuchter und die warmen Phasen trockener. Im Ergebnis umfassen die 1.000 Jahre das Mittelalterliche Optimum von 1000 bis 1350, die Kleine Eiszeit von 1350 bis 1750 und das neuzeitliche Optimum ab 1750. Letzteres hält an und wird zunehmend vom anthropogenen Klimawandel überlagert.

In den letzten 10.000 Jahren finden wir weitere Kälteperioden (Pessima) und Warmperioden (Optima). Zwischen 450 und 800 gab es eine Kälteperiode, welche auch Völkerwanderungen zur Folge hatte. Deshalb wird auch vom Pessimum der Völkerwanderung gesprochen. Um die Zeit von Jesus Christus herum, also während der Zeit des Römischen Reiches, gab es eine Warmphase, welche höher war als die des Mittelalterlichen Optimums. Diese Phase wird als Römisches Optimum bezeichnet. Vor dieser Periode gab es 600 v. Chr. bis 200 v. Chr. eine Kälteperiode, welche als Subatlantik-Pessimum bezeichnet wird. Der Höhepunkt dieser Periode war um 400 v. Chr., mit Durchschnittstemperaturen von mehr als 1°C unter der vom 20. Jahrhundert und damit sogar kälter als die Kleine Eiszeit. Die Sommer waren kühl und niederschlagsreich, die Gletscher dehnten sich stark aus.

Vor dem Subatlantik-Pessimum lag eine ausgeprägte Warmzeit, welche von 6000 v. Chr. bis 600 v. Chr. reichte und als Altithermum bezeichnet wird. Sie weist Extremwerte um 4300 v. Chr., 2400 v. Chr. und 900 v. Chr. auf. Dazwischen gab es auch kühlere Phasen, besonders im Zeitraum von 4300 v. Chr. bis 900 v. Chr. Während der Extremphasen lag die Temperatur 2 bis 3°C höher als die Durchschnittstemperatur im 20. Jahrhundert. Es gab sehr heiße Sommer und sehr milde Winter. Die letzten Eisschilde aus der Eiszeit schmolzen ab und die Gletscher zogen sich sehr weit zurück. Die Zeit von 8000 v. Chr. bis 7000 v. Chr. ist durch einen stetigen Anstieg der durchschnittlichen Temperatur gekennzeichnet. Diese Zeitspanne wird als Präboreal bezeichnet und markiert den Übergang von der Würm-Eiszeit in die Wärmeperiode. Der Temperaturanstieg von vor 20.000 Jahren bis zum Altihermums markiert eine klimatologisch extrem lange Aufheizungsperiode. Sie beendete die Würm-Eiszeit und dauerte etwa bis 5000 v. Chr. an. Danach ließ die Aufheizung nach.

Die letzten 100.000 Jahren wurden von der Würm-Eiszeit dominiert, welche 80.000 Jahre andauerte. Innerhalb dieser Phase gab es zwei besondere Kälteperioden, welche durch etwas mildere Phasen unterbrochen wurden. Die durchschnittliche Temperatur auf der Nordhalbkugel lag bis zu 6°C unter der Durchschnittstemperatur des 20. Jahrhunderts. Die Mitteltemperatur war die Temperatur im Durchschnitt um 10°C geringer und im Winter sogar um 12 bis 24°C. Große Gebiete in Europa lagen unter Eis: Grönland, Island und große Teile der Britischen Inseln. Von Eis bedeckt waren auch große Gebiete rund um die Ostsee, die Alpen bis ins tiefere Oberbayern, die Pyrenäen, Nordasien und Kanada. Die Eismassen haben sehr viel Wasser gebunden, so dass der Meeresspiegel rund 150 Meter tiefer lag und einige der bekannten Meere ausgetrocknet waren. Dazu gehörten die Nordsee, der Ärmelkanal, die Adria sowie Teile des Golfes von Biskaya und des Schwarzen Meeres. In Mitteleuropa sah die Landschaft in etwa so aus wie es heute auf Island aussieht. Die Vegetation bestand aus niedrigen und baumartigen Nadelhölzern. Dazu gab es Gräser und Heidekraut. Das Klima war trocken und windig, alle Berge waren mit Eis und Schnee bedeckt.

Innerhalb der letzten 1.000.000 Jahre gab es insgesamt 11 Eiszeiten mit unterschiedlicher Dauer und Intensität. Diese wurden jeweils unterbrochen von milden Zwischeneiszeiten. In der gesamten Erdgeschichte sind 20 Eiszeiten bekannt. Aus der Klimahistorie können einige interessante Rückschlüsse auf die grundsätzliche Entwicklung des Klimas gezogen werden. Das normale Klima auf der Erde scheint das der Eiszeiten zu sein, während die milderen Zwischenzeiten eher die Ausnahme darstellen. Das derzeitige warme Klima ist im Verhältnis der gesamten klimatologischen Entwicklung der Erde außerordentlich warm und stellt eine Ausnahme dar. Wahrscheinlich dürfte diese Ausnahme mit zur bisherigen Entwicklung der Menschen beigetragen haben. Ein wichtiger Aspekt ist auch, dass sich alle Klimawandel über außerordentlich lange Zeiträume entwickelten. Die hierzu relativ hohe Geschwindigkeit des jetzigen Klimawandels ist nach unserem aktuellen Kenntnisstand ohne Beispiel in der Klimahistorie. Es dürfte daher sehr wahrscheinlich sein, dass es sich um einen anthropogenen Klimawandel handelt. Es gibt bisher keine schlüssigen Theorien den aktuellen Klimawandel auf eine natürliche Entwicklung zurückzuführen.

4.5 Der anthropogenen Klimawandel

Für den anthropogenen Klimawandel ist das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid (CO_2) maßgeblich verantwortlich. In den letzten 10.000 Jahren schwankte der CO_2-Anteil in der Atmosphäre zwischen 180 und 300 ppm (0,018 und 0,03 Prozent). Im Mai 2020 lag der Wert bei 418 ppm (0,0418 Prozent). Dieser nachweislich von Menschen verursache Anstieg vollzieht sich etwa 100-mal schneller als ein natürlicher Anstieg, so dass sich das Klimasystem nicht darauf einstellen und es zu erheblichen Rückkopplungseffekten kommen kann. Diese äußern sich durch eine Zunahme von extremen Wetterereignissen (z.B. intensive Hitzeperioden, Starkregenereignisse). So lag der Anstieg des CO_2-Gehalts in der Atmosphäre in den 1970er Jahren bei 0,7 ppm pro Jahr, in den 1980er Jahren bei 1,6 ppm pro Jahr und in den 2010er Jahren bei 2,2 ppm pro Jahr.

Die relativ schnelle Zunahme des Anteils von CO_2 in der Atmosphäre der Erde ist nachweislich ursächlich für den Anstieg der mittleren Erdtemperatur. Weder die Sonneneinstrahlung noch die Erdbahnparameter haben sich wesentlich geändert. Die Sonneneinstrahlung ist sogar leicht zurückgegangen. Erst im Verlauf von Jahrmillionen wird die Sonnenstrahlung deutlich zunehmen.

Die zunehmende Erdtemperatur führt auch zu einem Anstieg des Meeresspiegels. Wobei hierbei der Anteil der schmelzenden Eisflächen (Antarktis, Gebirgsgletscher, Grönland) bei 43 Prozent liegt. Den größeren Anteil macht mit 57 Prozent die thermische Ausdehnung des Wassers aus. Stoffe dehnen sich mit zunehmender Erwärmung aus, so auch das Wasser. Durch Satelliten können der Anstieg und die Anstiegsrate direkt gemessen werden. Im 20. Jahrhundert lag die Anstiegsrate bei 1,5 mm pro Jahr. Aktuell liegt die Anstiegsrate bei 3,5 mm pro Jahr, Tendenz steigend.

Der anthropogene Klimawandel ist wissenschaftlich erwiesen und stellt eine zunehmende Gefahr für die menschliche Gesellschaft dar. Es müssen zeitnah geeignete Gegenmaßnahme ergriffen werden, welche für die Gesellschaft eine große Herausforderung darstellen werden.

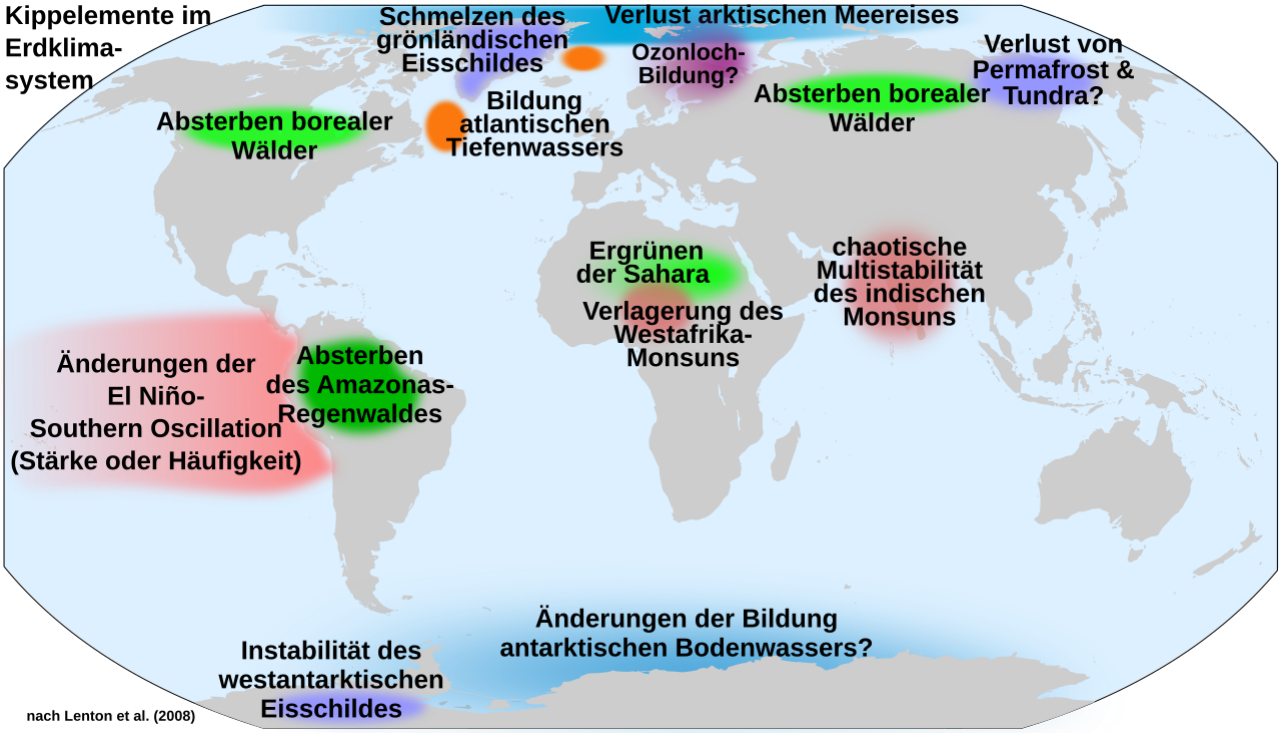

Bild 9: Kippelemente im Erdklimasystem / Quelle: Wikipedia CC BY-SA 4.0

5 Nachwort

Das Kompendium „Geophysik, Meteorologie und Klimatologie“ ist das Ergebnis einer Literaturrecherche. Die verwendete Literatur ist in Kapitel 6 Literatur- und Quellenverzeichnis aufgeführt.

Meine persönliche Beschäftigung mit dem Wetter begann am 28.05.1985. An diesem Tag fing ich an, das tägliche Wetter aufzuschreiben. Inspiriert hierzu wurde ich von einem schweren Frontgewitter am 27.05.1985. Doch schon vorher interessierte mich das Wetter mit seinen vielseitigen Erscheinungsformen: Wolkenformationen, Niederschläge, Gewitter, Winde und Stürme, und Wirbelstürme.

Im Schwerpunkt wendete ich mich ab dem 28.02.1988 der Astronomie und Astrophysik zu. Im Rahmen dieser Wissenschaften taucht die Erde als Planet unter anderen Planeten auf. Allerdings mit der Besonderheit, dass ich mich auf diesem Planeten befinde und daher vieles direkt beobachten kann. Die erdbezogenen Wissenschaften, die sogenannten Geowissenschaften, liefern viele Referenzwerte für die Astrophysik und sind damit grundlegend für die astronomische Wissenschaften. Astro- und Geophysik bilden eine funktionale Gemeinschaft für mich, wobei mein persönlicher Schwerpunkt in der Astrophysik liegt.

Die Klimatologie war ursprünglich ein Teilgebiet der Meteorologie und damit auch ein Beschäftigungsgegenstand von mir. Heute ist die Klimatologie ein eigenständiges Fachgebiet. Trotz der großen Schnittmengen mit der Meteorologie wirken viele andere Geowissenschaften hinein, wie Geophysik, Ozeanographie, Vulkanologie, etc. Ich selbst kann den Klimawandel persönlich erleben. Bis 1988 gehörten Winter mit Schnee noch zur Normalität. Einmal im Jahr konnte ich zumindest für wenige Tage den Schlitten nutzen. Jetzt sind schneereiche Winter eine absolute Ausnahme. Dafür haben heiße und trockene Sommer zugenommen. Besonders in Erinnerung ist mir der sehr heiße Sommer im Jahr 2003, dem weitere heiße Sommer folgten.

Im Rahmen der Astronomie müssen meteorologische und klimatologische Bedingungen beobachtet und berücksichtigt werden. Schon dies ist Grund genug, sich mit Meteorologie und Klimatologie zu beschäftigen. Für den Alltag der Menschen, ob beruflich oder privat, spielt die Meteorologie und Klimatologie ebenfalls mehr oder weniger eine Rolle.

Im Ergebnis sollte eine Institution Astro- und Geophysik gemeinsam betreiben, mit Schwerpunkt Astronomie, Astrophysik, Geophysik, Meteorologie und Klimatologie. Ich selbst fördere und unterstütze ausdrücklich eine entsprechende Infrastruktur. Ich möchte auch astronomische Vereinigungen ermutigen Meteorologie und Klimatologie zu betreiben, entsprechend interessierten Menschen eine organisatorische Basis zu bieten.

Ich selbst werde mich weiterhin aktiv mit Geophysik, Meteorologie und Klimatologie beschäftigen. Für die interessierte Öffentlichkeit biete ich hierbei ausdrücklich eine Teilhabe an. Konkret werde ich weiterhin über diese Themen informieren, Schriften veröffentlichen, Vorträge halten und Beobachtungen durchführen.

Diplom-Physiker / Astrophysiker Andreas Schwarz Wilhelmshaven, 28.05.2025

6 Literatur- und Quellenverzeichnis

Folgende Literatur und Informationsquellen wurden bei der Recherche zur Erstellung des Kompendiums „Geophysik, Meteorologie und Klimatologie“ verwendet:

1) Klaus Lindner; Taschenbuch der Astronomie; 1993.
2) Arnold Hanslmeier; Einführung in die Astronomie und Astrophysik; 2014.
3) Hans-Jürgen Götze, Dorothee Mertmann, Ulrich Riller, Jörg Arndt; Einführung in die Geowissenschaften; 2015.
4) Horst Malberg; Meteorologie und Klimatologie; 2007.
5) Hans Häckel; Meteorologie; 2016.
6) Christian-Dietrich Schönwiese; Klimatologie; 2013.
7) Günther D. Roth; Wetterkunde für alle; 1995.
8) Walter Sönnig, Claus G. Keidel; Wolkenbilder und Wettervorhersage; 2002.
9) Website des Deutschen Wetterdienstes; www.dwd.de; abgerufen im Mai 2025.
10) Website von Meteoblue; www.meteoblue.com; abgerufen im Mai 2025.

Bilderverzeichnis:

Titelbild: NASA

Bild 1: NASA

Bild 2: Wikipedia (Gemeinfrei)

Bild 3: Michael Tolkmitt

Bild 4: Ralf Schmidt

Bild 5: Ralf Schmidt

Bild 5: Ralf Schmidt

Bild 6: Wikipedia CC BY-SA 3.0

Bild 7: Ralf Schmidt

Bild 8: Wikipedia (Gemeinfrei)

Bild 9: Wikipedia CC BY-SA 4.0