

Astro- und Geophysik

Die Erde und ihr Klima

von

Andreas Schwarz



www.astronomie-whv-fri.de

1 Die Erde, unser Heimatplanet

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 $5,515 \text{ g/cm}^3$. Diese Größen werden auch als Referenz für andere Planeten benutzt. Die Erde ist der einzige Planet, auf dem es nachweislich 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 hochentwickeltesten 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 $23^{\text{h}} 56^{\text{min}} 04^{\text{s}}$ um ihre eigene Achse und die Neigung ihrer Rotationsachse gegenüber der Ekliptik beträgt $23,44^\circ$.

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 $2,8 \text{ g/cm}^3$. 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 $3,5 \text{ g/cm}^3$ und eine Temperatur von etwa 2.600°C . Der innere Mantel befindet sich in einer Tiefe von 1.000 bis 2.900 km. Die Dichte steigt dort auf rund $4,7 \text{ g/cm}^3$ 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 $12,5 \text{ g/cm}^3$ und die Temperatur auf 3.600°C an. Der feste innere Kern befindet sich in einem Tiefenbereich von 5.100 bis 6.370 km und bildet das Zentrum. Dichte und Temperatur steigen auf 13 g/cm^3 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.

Der hohen Temperaturen bzw. der geschmolzene äußere Kern haben ihre Ursache in thermischer Energie, welche vom Erdentstehungsprozess noch übrig blieb 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.

Die geologische und die biologische 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.

Die Erdatmosphäre bestand ursprünglich aus molekularem Wasserstoff (H₂), Helium (He) und Wasserstoffverbindungen, darunter auch Wasser. Durch Vulkanismus und Entgasungsprozesse wurde die Erdatmosphäre mit molekularem Stickstoff (N₂), Kohlenstoffdioxid (CO₂), Wasser (H₂O) und Argon angereichert. Mit molekularem Sauerstoff (O₂) 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 (N₂), zu 20,95 Volumenprozent aus Sauerstoff (O₂), zu 0,934 Volumenprozent aus Argon (Ar), zu 0,033 Volumenprozent aus Kohlenstoffdioxid (CO₂), zu 0,0018 Volumenprozent aus Neon (Ne), zu 0,0018 Volumenprozent aus Helium (He), zu 0,00015 Volumenprozent aus Methan (CH₄) und zu rund 0,0001 Volumenprozent aus Wasserdampf (H₂O).

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 kurzwelligigen 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): $3\text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{O}_3$. Die Ozonschicht schützt die Erde vor kurzwelligerer ultravioletter Strahlung in einem Wellenlängenbereich zwischen 300 und 210 Nanometer ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). 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 $23,5^{\circ}$ 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 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 $1,98 \cdot 10^{30} \text{ Kg}$, was 333.000 Erdmassen entspricht. 99,86 Prozent der Masse des Sonnensystems ist in der Sonne vereinigt. Der kleine Rest verteilt sich auf Planeten, Zwergplaneten, Trabanten, Kleinplaneten, Kometen, Staub und sonstige Materie im Sonnensystem. Der Sonnenradius beträgt 695.900 km und ihre Leuchtkraft $3,826 \cdot 10^{26} \text{ W}$.

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 $1,8 \cdot 10^{17} \text{ W}$. 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/m^2 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 der Erde“ eingegangen.

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 Nipp tide (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 $0,2^\circ\text{K}$ bzw. $0,2^\circ\text{C}$ 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 mittelalterliche 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.

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 auftretenden 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 ultravioletten und Röntgenbereich, 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.

3 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.

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 bewegten Meereswassermassen und den Küstenformationen.

4 Die Klimatologie der Erde

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.

Die Meteorologie beschäftigt sich 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.*“ Weltweit werden hierfür 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 Kurzfristvorhersage 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.

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.

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 ergebenden 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.

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: die 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.

Für den anthropogenen Klimawandel ist das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid (CO₂) maßgeblich verantwortlich. In den letzten 10.000 Jahren schwankte der CO₂-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 verursachte 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 CO₂-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 CO₂ 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 Jahrtausenden 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.