

Umweltphysik

von Ulrich Platt und Werner Aeschbach

Dieser Text ist die herausgeberisch und redaktionell bearbeitete, aber noch nicht abschließend lektorierte und ungesetzte Vorabveröffentlichung eines Kapitels, das im Band

**Umwelt interdisziplinär
Grundlagen – Konzepte – Handlungsfelder**

**herausgegeben von Thomas Meier, Frank Keppler, Ute Mager,
Ulrich Platt und Friederike Reents**

bei Heidelberg University Publishing (heiUP; <https://heiup.uni-heidelberg.de/>) Open Access und in gedruckter Form erscheinen wird.

Text © die Autoren 2022



Dieser Text ist unter der Creative-Commons-Lizenz CC BY-SA 4.0 veröffentlicht.

DOI: <https://doi.org/10.11588/heidok.00031280>

Umweltphysik

Ulrich Platt^{1,2}, Werner Aeschbach^{1,2}

¹ Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg

² Heidelberg Center for the Environment (HCE), Universität Heidelberg

Zusammenfassung: Die Physik (von lat. *physica*) bedeutet „Naturlehre“, sie beschäftigt sich dementsprechend mit der wissenschaftlichen Erforschung und quantitativen Beschreibung von Naturerscheinungen. Die heutige Physik ist eine hochdifferenzierte Wissenschaft, sie hat sich in vielen ihrer Sparten Erscheinungen zugewandt, die mit unseren Sinnen nicht direkt wahrnehmbar sind (wie etwa Elementarteilchen, Radioaktivität, ...). Neben dem grundlegenden Verständnis unserer materiellen Welt bildet die Physik auch die Grundlage unserer technisierten Gesellschaft. Die Sparte Umweltphysik hat sich von der Untersuchung von wahrnehmbaren Phänomenen wie Ebbe und Flut, Ursache von Wetterereignissen, etc. zur Erforschung vieler Fragen entwickelt, die unsere gegenwärtige und zukünftige Umwelt bestimmen, wie etwa der Entwicklung des Erdklimas.

Schlüsselbegriffe: Physik, Umweltphysik, Umwelt, Naturwissenschaft

Entstehungsgründe und aktueller Standort des Themas „Umwelt“ in der Disziplin

Die Physik als Naturwissenschaft

Die Physik (von lat. *physica*) bedeutet „Naturlehre“, sie beschäftigt sich dementsprechend mit der wissenschaftlichen Erforschung von Naturerscheinungen (siehe z. B. <https://de.wikipedia.org/wiki/Naturerscheinung>).

Es geht um die Eigenschaften und Gesetzmäßigkeiten von grundlegenden Phänomenen der Natur. Hierzu bedient sich die Physik mathematischer Beschreibung und quantitativer Modelle. Wesentliche Begriffe sind Materie und →Energie sowie Raum und Zeit und deren Wechselwirkungen. Eine zentrale Methodik ist das Experiment; dabei geht es darum, mittels planmäßig durchgeführter wissenschaftlicher Versuche qualitative und quantitative Aussagen über Vorgänge in der Natur zu erhalten. Die Physik versucht, allgemeingültige Naturgesetze zu entdecken, möglichst einfach zu beschreiben und anzuwenden (siehe z. B. Greulich, Kilian und Weber 2003,13, Meschede 2015).

Das Wissensgebiet der Physik ist im Laufe der letzten hundert Jahre derart gewachsen, dass die Physik heute in etwa zwei Dutzend Sparten (wie Hochenergiephysik, Atomphysik, Kernphysik, Quantenphysik, Festkörperphysik, etc.) zerfällt, die ihrerseits jeweils wieder spezialisierte Unterstrukturen hervorgebracht haben (siehe z. B. Meschede 2015). Zum Beispiel besteht das „Handbuch der Physik“, das in den Jahren 1955 bis 1988 erstellt wurde

(Flügge 1988), aus nicht weniger als 55 Einzelbänden (z. T. auf mehrere Bücher aufgeteilt), die sich mit den Unterdisziplinen befassen. Seitdem ist das Wissen der Physik nochmals enorm angewachsen, der Versuch, es in einem Werk zusammenzufassen, ist nicht mehr unternommen worden.

Die heutige Arbeitsweise der Physik fußt nicht mehr nur auf experimentellen Methoden, sondern umfasst auch theoretische Modellbildung. Damit lässt sich die Physik einteilen in die Sparten:

Experimentalphysik und

Theoretische Physik,

die üblicherweise auch von jeweils entsprechend spezialisierten Physikerinnen und Physikern betrieben werden.

Die theoretische Physik beschäftigt sich vorwiegend mit formalen mathematischen Beschreibungen und den physikalischen Naturgesetzen. Die Überprüfung der Vorhersagen in Form reproduzierbarer Messungen an gezielt gestalteten physikalischen Experimenten oder durch Beobachtung natürlicher Phänomene ist das Gebiet der Experimentalphysik.

In der modernen, inhaltlich hochdifferenzierten Physik spielt die Untersuchung der Umwelt eher eine Nebenrolle. Die Ursprünge der Physik betreffen aber ganz wesentlich Fragen unserer natürlichen Umwelt wie etwa die Ursachen des Tag/Nacht- oder Jahreszeiten-Rhythmus, der Meereszeiten, der meteorologischen Vorgänge (Wolken, Niederschlag, Wind, Temperaturänderung), Gewitter, die Farbe des Himmels oder das Wesen der Luft, die uns umgibt. Dies sind Fragen, deren Untersuchung heute zu den Umweltwissenschaften gezählt wird. Dennoch wird jeder Physiker und jede Physikerin der Aussage zustimmen, dass die Untersuchung unserer Umwelt ureigenes Gebiet der Physik ist.

Historisch betrachtet haben sich viele bedeutende Physikerinnen und Physiker auch den Phänomenen unserer physischen Umwelt gewidmet, siehe oben aufgeführte Beispiele. Eine Frage, deren quantitative Beantwortung uns bis heute beschäftigt, ist die Begründung für die mittlere Erdtemperatur und deren Voraussage (→Klimawandel). Die quantitative Erklärung der astronomischen Rhythmen ist mit den Namen von Johannes Kepler und Isaac Newton verbunden. Die blaue Farbe des Himmels wurde von John William Strutt, 3. Baron Rayleigh, durch die stark wellenlängenabhängige Lichtstreuung in der Atmosphäre erklärt. Die ersten quantitativen Erklärungen des Erdklimas und seiner Abhängigkeit von Treibhausgasen gehen auf Joseph Fourier (1827), John Tyndall (1859) und Svante Arrhenius (1896) zurück.

Allerdings gelten viele der oben genannten Fragen zu Umwelterscheinungen mittlerweile (zum Teil durchaus zu Unrecht) als weitgehend geklärt und die „vornehmeren“ Aufgaben der Physik werden häufig in der Untersuchung von Fragen gesehen, die damit zu tun haben „was unsere Welt im Innersten zusammenhält“ (Goethe, Faust I). Also Fragen nach den Urbausteinen der Materie (Elementarteilchen), dem Zusammenhang zwischen Materie und Energie (Relativitätstheorie), den Prozessen auf Mikroskalen (Quantenmechanik) und den Naturkräften sowie Fragen nach dem Beginn und der Zukunft des Universums (Kosmologie).

Heute sind die Teilgebiete der Physik, die sich mit der Umwelt befassen (Umweltphysik, Geophysik, Physik der Atmosphäre, Physikalische Ozeanographie, Physikalische Limnologie, etc.), eher kleine Gebiete im Vergleich zu den „großen“ Gebieten der „fundamentalen Physik“ (Hochenergiephysik, Atomphysik, Kernphysik, Festkörperphysik, etc.) und werden von einigen Physikern und Physikerinnen sogar als „randständig“ wahrgenommen. Dies liegt auch daran, dass diese Gebiete stark mit den →Geowissenschaften überlappen und somit meist nicht zur „reinen“ Physik gerechnet werden.

Umweltphysik und Geophysik

Erst in jüngerer Zeit ist die Umweltphysik als eine der zahlreichen Sparten der Physik (siehe Abschnitt 1.1) wieder aufgetaucht und befasst sich zusammen mit der Geophysik mit Fragen der Umwelt des Menschen im engeren Sinne. Im angelsächsischen Raum ist dafür der Begriff „*Geophysics*“ gebräuchlich. Im deutschsprachigen Raum ist der Begriff „Geophysik“ enger gefasst und bezeichnet meist nur die Physik des Erdkörpers (z. B. die Magnetfeldentstehung, Seismologie) und die Physik der Exosphäre (äußerste Atmosphärenschicht der Erde ab etwa 400 km Höhe) und Magnetosphäre (der Bereich, in dem das Magnetfeld der Erde eine Rolle spielt).

Umweltphysik

Der Begriff „Umweltphysik“ wurde mit der Gründung des Instituts für Umweltphysik in Heidelberg im Jahr 1975 von Walter Roedel geprägt (siehe z. B. Roether und Platt 1997; Münnich 2003). Arbeitsgebiet der Umweltphysik sind die klassischen Systeme Wasser, Boden, Luft und Ökosysteme, die die menschliche Umwelt bilden. Hierzu gehören auch die Flüsse von →Energie und von Stoffen sowohl innerhalb dieser Kompartimente wie auch zwischen ihnen. Wichtige Ansätze sind die Untersuchungen von Transportvorgängen mittels Spurenstoffen und die Entwicklung von Modellen, die die Umwelt systemisch nachbilden. Daneben geht es auch um die Entwicklung hochspezialisierter Messverfahren, was ja eine klassische Aufgabe der Physik ist. Umweltphysik ist ein Teilgebiet der Physik, sie hebt sich aber von anderen Bereichen der Physik ab durch ihre systemorientierte Sichtweise und durch spezielle Methoden, mit denen Fragestellungen angegangen werden. Mit den klassischen Fachdisziplinen (z. B. der Meteorologie, der Hydrologie, der Ozeanographie, der (physikalischen) Limnologie, der Bodenkunde, der Glaziologie [→Geowissenschaften] und der →Physischen Geographie) gibt es deutliche Überlappungen. Die Umweltphysik ist aber physikalischer und eher auf Grundlagenforschung hin ausgerichtet.

Im angelsächsischen Sprachgebrauch wird Environmental Physics heute meist im gleichen Sinne wie „Umweltphysik“ im Deutschen verwendet (bzw. im Wesentlichen synonym zu Geophysics), gelegentlich wird (bzw. wurde) mit Environmental Physics auch nur die Physik der Interaktion von Organismen mit ihrer Umwelt bezeichnet (siehe z. B. Monteith 1973).

In Mitteleuropa wird Umweltphysik (bzw. Environmental Physics im Sinne von „Umweltphysik“) in Instituten oder Arbeitsgruppen mit dieser Bezeichnung in mehr als einem Dutzend Organisationen – überwiegend Universitäten – betrieben. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit sind dies: Bayreuth (Universität Bayreuth), Bern (Universität Bern, Abt. Klima und Umweltphysik), Bremen (Universität Bremen), Glasgow (University of Glasgow), Greifswald (Ernst-Moritz-Arndt Universität Greifswald), Hannover (Leibniz Universität Hannover), Heidelberg (Ruprecht-Karls Universität Heidelberg), Hohenheim (Universität Hohenheim), Kiel (Christian-Albrechts-Universität zu Kiel), Landau (Universität Koblenz-Landau), London (London’s Global University, UCL), Prag (Institute of Atmospheric Physics, Tschechische Akademie der Wissenschaften, CAS), Trondheim (Norwegian University of Science and Technology, NTNU), Tübingen (Eberhard Karls Universität Tübingen), Wien (Universität Wien) und Zürich (ETH Zürich).

Dazu kommen noch eine große Zahl von Forschungsinstitutionen, die umweltphysikalische Forschung unter anderen Bezeichnungen betreiben, etwa die Max-Planck-Institute für Chemie (Mainz), Meteorologie (Hamburg) und Biogeochemie (Jena), das Forschungszentrum Jülich (Institute für Chemie und Dynamik der Geosphäre), das Karlsruher Institut für Technologie (Institute für Meteorologie und Klimaforschung), das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Institut für Physik der Atmosphäre), Oberpfaffenhofen, das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK, Potsdam) und das Deutsche GeoForschungsZentrum (GFZ, Potsdam).

Weltweit arbeitet eine kaum übersehbare Zahl von Instituten unter einer Reihe von Bezeichnungen (häufig *Geophysics*, *Climate Research*) an umweltphysikalischen Fragestellungen. Zwei Beispiele für Institute mit der Bezeichnung *Environmental Physics* finden sich in Seattle, USA (Washington State University, WSU) und Toronto, Kanada (University of Toronto).

Geschichte der Umweltphysik

Die Umweltphysik als Forschungsrichtung entwickelte sich beginnend in den 1950er-Jahren aus der Entwicklung und Anwendung kernphysikalischer Messmethoden mit dem Ziel, das System Erde nach physikalischen Gesichtspunkten zu untersuchen (Roether und Platt 1997). Heute beobachten und untersuchen mehrere Umweltphysik-Institute physikalische Umweltprozesse auf allen Kontinenten und in allen Kompartimenten (Atmosphäre, Ozean, Eis, Böden, Grundwasser, ...). Dabei wird ein Spektrum von hochspezialisierten physikalischen Methoden eingesetzt, das von Isotopenverfahren über spektroskopische Methoden bis hin zu geophysikalischen Messungen reicht und von Satelliten-, Ballon-, und Flugzeugplattformen aus ebenso eingesetzt wird wie an fest installierten Stationen. Darüber hinaus werden Aspekte von Umweltprozessen im Labor experimentell untersucht. Schließlich werden wesentliche Prozesse modelliert und auf Höchstleistungsrechnern numerisch simuliert.

Im Zentrum des Interesses stehen dabei weniger praktische Fragen des Umweltschutzes als vielmehr die fundamentalen physikalischen Prozesse, die in unserer Umwelt die Flüsse von Materie und \rightarrow Energie antreiben und bestimmen: Ihre natürliche Dynamik, ihre Geschichte, aber auch ihre Modifikation durch die sozio-kulturelle Entwicklung der Menschheit.

Der Bereich Umweltphysik ist seit 1998 in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) durch einen eigenen Fachverband „Umweltphysik“ vertreten (siehe z. B. Roether 2019 und <https://www.dpg-physik.de/vereinigungen/fachlich/ohne-sektion/fvup>).

Umweltphysik in der Lehre

Die Umweltphysik versteht sich als Teilgebiet der Physik, es gibt daher in Deutschland keinen eigenständigen Studiengang der Umweltphysik. Damit werden (wie für andere Teilgebiete der Physik auch) spezielle Kurse im Hauptstudium angeboten, dies ist an 14 Universitäten im deutschen Sprachraum der Fall (siehe Abschnitt 1.1). Die eigentliche Spezialisierung beginnt dann mit der Wahl der Themen für Bachelor- beziehungsweise Masterarbeiten.

Berufsaussichten von (Umwelt)Physikerinnen und Physikern

Unabhängig von ihrer Spezialisierung erwerben Physikerinnen und Physiker ein umfassendes Grundwissen in Physik und damit im Bereich der quantitativen Behandlung von Zusammenhängen in Natur und Technik. Entsprechend dem Programm der Physik, grundlegende Gesetzmäßigkeiten (wie etwa Erhaltungssätze) herauszuarbeiten, ist auch das Physikstudium sehr grundsätzlich ausgelegt und mehr auf die Erfassung und Quantifizierung von Zusammenhängen als auf die Vermittlung von Faktenwissen ausgerichtet. Für die Absolventen und Absolventinnen gibt es natürlich Tätigkeiten in Bereichen, die spezielle Kenntnisse in Physik erfordern, wie physikalische Grundlagen und angewandte Forschung, Elektronik, Elektrotechnik und Fernmeldetechnik. Darüber hinaus wären zahlreiche Bereiche der Umweltforschung, der Umwelttechnik und der Informatik zu nennen. Dazu kommen – unabhängig von der Spezialisierung – Berufsmöglichkeiten in fast allen Bereichen der Gesellschaft, wobei die Physik-Absolventinnen und -absolventen zuweilen davon profitieren, dass das Studium als schwierig gilt (ob das zutrifft, sei aufgrund des oben Gesagten dahingestellt), erfolgreiche Absolventen und Absolventinnen also offenbar die Fähigkeit haben müssen, Schwierigkeiten zu überwinden.

Entwicklung von umweltspezifischen Fragestellungen und Methoden

Eine besondere Qualität des Faches Umweltphysik im Vergleich zu den \rightarrow Geowissenschaften und Umweltwissenschaften liegt in der Nähe zu den grundlegenden Methoden der Physik. Im Laufe der Zeit haben sich Methoden und Anwendungen in der Umweltphysik gegenseitig befruchtet und weiterentwickelt. An dieser Stelle ist eine grundsätzliche Bemerkung zu Methoden angebracht: Gelegentlich wird versucht, die Rolle der Physik (bzw. Umweltphysik) in der Umweltforschung auf die Entwicklung physikalischer Messmethoden zu reduzieren. Dies ist jedoch eine völlig falsche Einschätzung. Zwar spielt die Entwicklung und

Anwendung innovativer physikalischer Methoden, etwa zur Altersbestimmung oder zur hochempfindlichen Spurenstoffmessung, eine große Rolle, aber die Methoden der Physik müssen – wie im Folgenden noch näher ausgeführt – auf das Gesamtsystem angewandt werden, nicht nur auf einzelne Aspekte (wie etwa das Alter eines Grundwasserkörpers). Grundsätzlich kann man die Methoden einteilen in:

Messverfahren: Hier geht es um die Entwicklung (in aller Regel) physikalischer Verfahren zur Messung umweltrelevanter Größen. Beispiele sind (siehe auch unten) Isotopenhäufigkeiten, Spurenstoffkonzentrationen oder Fernerkundung.

Messstrategien: Über die Entwicklung der Messverfahren hinaus gibt erst die koordinierte Anwendung der Methoden die erwünschten Einblicke in die Vorgänge in Umweltsystemen. Beispiele sind 3D-Verteilungen von Wassermassen-Altersbestimmungen mittels Radiokohlenstoff (^{14}C), aus denen dann Muster der Ozeanzirkulation berechnet werden oder Messung von Tiefenprofilen der Kohlendioxid (CO_2)-Konzentration in Eisbohrkernen, aus denen Zeitreihen des atmosphärischen CO_2 -Gehaltes der vergangenen Jahrtausende abgeleitet werden.

Modellbildung und Modellierung: Modellbildung ist – wie oben erläutert – ein wichtiger Teil der Methodik in fast allen Sparten der Physik. Allerdings sind die Herausforderungen in der Umweltphysik häufig größer als in den meisten anderen Sparten, da in vielen Fällen Systeme von enormer Komplexität modelliert werden müssen. Beispiele (siehe auch Abschnitt 2.5) sind die Modellierung des zukünftigen (innerhalb der kommenden 1–2 Wochen) Zustandes der Atmosphäre für Wettervorhersagen oder des Klimasystems der Erde in den kommenden Jahrzehnten.

Die bereits erwähnten kernphysikalischen Methoden zur quantitativen Bestimmung von stabilen und radioaktiven Isotopen ermöglichten Untersuchungen über den globalen Wasserkreislauf (siehe z. B. Trenberth et al. 2007), die Ozeanzirkulation und das Klima der Vergangenheit. Erfolgreiche Methoden wie beispielsweise die ^{14}C -Datierung (Libby 1952) stießen im Zuge ihrer immer breiteren Anwendung an gewisse Grenzen, etwa bezüglich der benötigten Probenmenge. Solche Limitierungen konnten wiederum durch neue Messtechniken überwunden werden, zum Beispiel durch die Entwicklung der Beschleuniger-Massenspektrometrie, welche direkt auf den Großgeräten der Hochenergiephysik aufbaute. In jüngerer Zeit wurden laserbasierte Methoden der Atomphysik zu Messmethoden in der Umweltforschung entwickelt, von der *Cavity-Ring-Down*-Spektroskopie (siehe z. B. Maithani und Pradhan 2020) für stabile Isotope über Frequenzkämme (siehe z. B. <https://de.wikipedia.org/wiki/Frequenzkamm>) zur simultanen Messung verschiedener Spurengase bis hin zur *Atom-Trap-Trace*-Analyse (siehe z. B. Ebser et al. 2018) für ultraseltene Radioisotope.

Ein Verständnis der globalen Verteilung und Dynamik langlebiger Spurengase, insbesondere der Treibhausgase, ist allein aus lokalen Messungen nicht zu gewinnen. Der

Bedarf an fernerkundlichen, insbesondere satellitengestützten Messungen trieb die Entwicklung immer raffinierterer spektroskopischer Methoden voran. Umgekehrt ermöglichten es die Messtechniken, ein immer komplexeres Bild der Verhältnisse in der Atmosphäre zu zeichnen, welches wiederum neue numerische Methoden der Datenanalyse und Modellierung notwendig machte. Sowohl die Modelle als auch die Messmethoden erlauben heutzutage zunehmend höhere räumliche Auflösung, womit es beispielsweise möglich wird, lokale Quellen und das Senken von Treibhausgasen zu erforschen (siehe z. B. Burrows, Platt und Borrell 2011).

Auch bei der Untersuchung komplexer Prozesse in heterogenen Medien wie Böden schaukeln sich Messmethoden, Modelle und zunehmend umfassenderes Systemverständnis gegenseitig hoch. Lokale Messungen werden durch geophysikalische Fernerkundung (z. B. Georadar) ergänzt, die gemeinsam mit verbesserten Modellen die Überwindung großer Skalenunterschiede von mikroskopischen Eigenschaften poröser Medien auf die Feldskala bis hin zur Parametrisierung der Prozesse an der Grenze zwischen terrestrischen Systemen und der Atmosphäre in globalen Modellen erleichtern. Enorm wichtig sind modernste und ständig weiterentwickelte Methoden auch in der Untersuchung des Austausches an der Wasser-Luft-Grenzfläche. Hier haben sich neben spektroskopischen Analysetechniken insbesondere numerisch aufwändige Methoden der Bildverarbeitung bewährt.

Die Entwicklung globaler Klimamodelle – getrieben vom Wunsch, den Effekt anthropogener Eingriffe in die Umwelt auf globalem Maßstab verstehen und prognostizieren zu können – befördert die Integration des Verständnisses der Prozesse in den verschiedenen Kompartimenten (Atmosphäre, Ozean, Eis, Böden, Feste Erde, Relief, Grundwasser, siehe unten) des Systems Erde. Modelle sind unabdingbar für die Fähigkeit, quantitative Prognosen für die zukünftige Entwicklung zu berechnen, sie dienen aber auch der Analyse gegenwärtiger und vergangener Systemzustände und ihrer Dynamik. Die Physik untersucht sehr oft die zeitliche Entwicklung von Vorgängen vom Labor bis zu den komplexen Systemen der Umwelt.

Zeitliche Dimension umweltphysikalischer Forschung

Was die zeitliche Entwicklung angeht, so unterscheiden wir (scheinbar trivialerweise) Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft, die aber mit völlig verschiedenen Methoden untersucht werden.

Die Erforschung der Vergangenheit des Erdsystems

Ein wichtiges Forschungsgebiet ist die Entwicklung des Erdsystems in der historischen und prähistorischen Zeit. Parameter des Erdsystems können in geschichtlicher Zeit zum Teil aus schriftlichen Überlieferungen (→Umweltgeschichte), etwa die Temperatur aus dem Datum der Pflanzenblüte, oder – für die letzten ca. 200 Jahre – aus Messungen mit Instrumenten gewonnen beziehungsweise rekonstruiert werden. Für die Zeit davor wurden Methoden zum

„Auslesen“ von natürlichen „Archiven“ entwickelt. Hierfür werden an geordnet gewachsenen Strukturen („Archiven“) Messgrößen ermittelt, die als Stellvertreter („Proxies“) für Werte von physikalischen Erdsystem-Parametern (z. B. Temperatur, Feuchte, Salzgehalt, etc.) dienen (→Geowissenschaften; →Klimawandel). Weitere physikalische Methoden, etwa die Messung radioaktiver Isotope, dienen der Datierung der so gewonnenen Zeitreihen vergangener Umweltzustände.

Beispiele für natürliche Archive (jeweils mit den wichtigsten daraus rekonstruierbaren Umweltparametern) sind:

Meeres- und See-Sedimente (Temperatur, Ozean-Salzgehalt, Eisvolumen der Erde, Vegetationsänderung)

Eisbohrkerne (Chem. Zusammensetzung der Atmosphäre, Temperatur)

Baumringe (Temperatur, Niederschlag, etc.)

Stalagmiten (Temperatur, Niederschlagsmenge)

Manganknollen (Temperatur, Tiefsee-Sauerstoffgehalt)

Korallen, Muscheln (Ozeanzirkulation, Temperatur, Meeresspiegel)

Löss-Paläoboden-Sequenzen (globale und vor allem regionale quartäre Klima- und Umweltänderungen)

Die Erforschung der Gegenwart

Messungen im Erdsystem geben den Zustand in der Gegenwart wieder. Dazu dienen u. a. zahlreiche Messnetze etwa zur Bestimmung der Atmosphärenzusammensetzung (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change, NDACC, bzw. Stratosphere-Troposphere Processes And their Role in Climate, SPARC, Global Atmosphere Watch, GAW; Globale Überwachung der Atmosphäre, etc.), Meteorologische Messnetze (die Temperatur, Luftfeuchte, Niederschlag, Strahlung, Winddaten, etc. messen), Seismometernetze (Vibrationen der Erdkruste), driftende Bojen zur Bestimmung der kritischen Parameter der Ozeane (Temperatur, Salzgehalt, ...) durch das Argo-Netzwerk. Neuerdings werden bodengebundene Messnetze zunehmend durch Satelliten ergänzt beziehungsweise in Zukunft möglicherweise auch ersetzt werden.

Langjährige Messreihen (so genanntes Monitoring) haben sich als enorm wichtig erwiesen, um die modernen Veränderungen in der Umwelt quantitativ nachverfolgen zu können. Insbesondere stellen weit zurückreichende Messreihen von Treibhausgas- und anderen Spurengaskonzentrationen eine direkte Grundlage für das Verständnis und letztlich die Prognose klimatischer und atmosphärenchemischer (z. B. Ozonloch) Veränderungen dar. Die 1958 von Charles Keeling (1928–2005) begonnene Zeitreihe von Messwerten des atmosphärischen Gehalts an CO₂ in der Erdatmosphäre am Mauna Loa auf Hawaii, die so genannte Keeling-Kurve, ist zu einer ikonischen Abbildung für den anthropogenen →Klimawandel geworden.

Die Prognose der Zukunft

Fragen zur zukünftigen Entwicklung bestimmter Erdsystemparameter sind von großem Interesse, man denke nur an die Wettervorhersage, Vorhersage von Vulkanausbrüchen, von Erdbeben (→Geowissenschaften) oder an Klimaprognosen (→Klimawandel).

Hier kommen völlig andere Methoden, nämlich (in der Regel numerische) „Modelle“ zum Einsatz, also Systeme von Gleichungen, die das betrachtete Erdsystem möglichst gut abbilden und die sich auf der Basis der gegenwärtigen Verhältnisse in die Zukunft extrapolieren lassen. Alternativ können auf der Basis von vorgegebenen Bedingungen („Szenarien“) dazugehörige Gleichgewichtszustände des Erdsystems berechnet werden. Der letztere Zugang wird meist bei Klimamodellen gewählt. Den Kern von Modellen bildet das quantitative Verständnis der relevanten Prozesse, das wiederum mit den Methoden der Physik aus Beobachtungen des Erdsystems gewonnen wird (siehe unten).

Ein Problem, das im Zusammenhang mit der Modellierung beziehungsweise Prognostizierung zukünftiger Zustände des Erdsystems (bzw. seiner Teilsysteme) genannt werden muss, ist die zum Teil prinzipielle Nicht-Vorhersagbarkeit dieser Entwicklungen. Zwar sind die Gleichungen im Modellsystem deterministisch, d. h. sie geben den zukünftigen Zustand auf der Basis des heutigen Zustandes (den so genannten Anfangsbedingungen) genau an. Allerdings sind manche Systeme so beschaffen, dass selbst sehr kleine Änderungen der Anfangsbedingungen zu extrem großen Änderungen im Ergebnis führen. Dies wurde von dem Meteorologen Edward Norton Lorenz (1917–2008) in den 1960er-Jahren entdeckt (Lorenz 1963), auf den der „Schmetterlings-Effekt“ zurückgeht: der Flügelschlag eines Schmetterlings (Lorenz sprach von einer Möwe) kann das Wetter in der Zukunft entscheidend beeinflussen. Vorhersagen für solche „chaotischen“ Systeme, die über einen gewissen Zeitraum hinausgehen (der durch die Ljapunow-Zeit gegeben ist), sind prinzipiell möglich, aber jede Verlängerung des Vorhersage-Zeitraumes verlangt eine wesentliche Steigerung der Genauigkeit in der Bestimmung der Anfangsbedingungen, was natürlich stets an praktische Grenzen stößt. Natürlich sind nicht alle Systeme in unserer Umwelt chaotisch, aber zum Beispiel das Wettersystem, weswegen Wettervorhersagen über einen Zeitraum von wesentlich mehr als zwei Wochen vermutlich prinzipiell unmöglich sind. Dagegen kann die zukünftige Entwicklung unseres Sonnensystems für etwa fünf Millionen Jahre vorhergesagt werden.

Die Kompartimente des Erdsystems

Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, das Erdsystem in Untersysteme, Sphären (→Geowissenschaften) oder „Kompartimente“ aufzuteilen (siehe auch Abb. 1). Viele Prozesse lassen sich als Vorgänge innerhalb eines Kompartiments beschreiben, häufig haben sich auch Fachdisziplinen herausgebildet, die speziell ein Kompartiment bearbeiten. Beispiele sind die Ozeanographie, Meteorologie beziehungsweise Atmosphärenforschung oder die →Geowissenschaften. Diese Fachdisziplinen stützen sich natürlich auf die physikalischen

Grundlagen beziehungsweise auch auf die Ergebnisse anderer Querschnittsdisziplinen wie Biologie und Chemie.

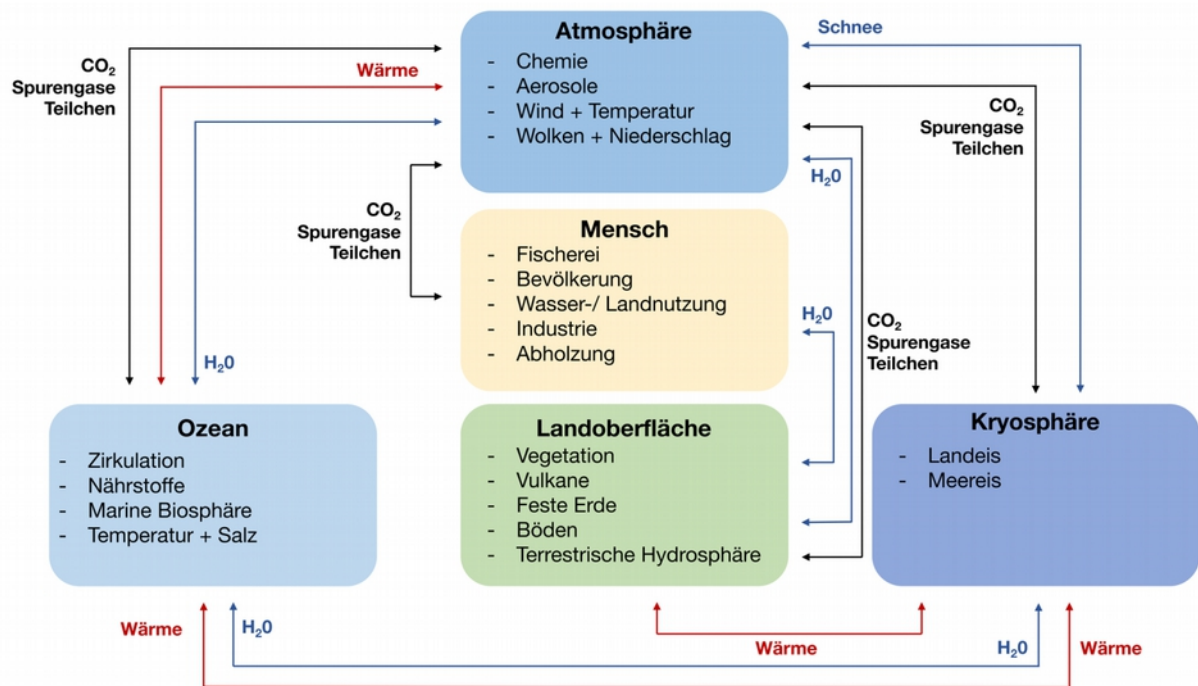


Abb. 1: Die Kompartimente des Erdsystems und deren wichtigste Wechselwirkungen

Die Atmosphäre

Die Atmosphäre (siehe auch Platt und von Savigny 2017; Roedel und Wagner 2017) ist eines der beiden großen fluiden Systeme der Erde (siehe Abb. 2), ihre Gesamtmasse entspricht einer ca. 10 m dicken Wasserschicht, die die gesamte Erdoberfläche bedeckt. Abb. 2 veranschaulicht das Volumen der Atmosphäre: Die gesamte Atmosphäre ergäbe – falls sie unter Normalbedingungen (also 1 Bar Druck und 0°C) gebracht würde, eine Kugel von ca. 1000 km Radius. Die Atmosphäre versorgt tierisches und menschliches Leben mit Sauerstoff und pflanzliches Leben mit CO₂, damit übernimmt sie die globale Verteilung dieser Gase und den Transport von den jeweiligen Quellen zu den Senken. Die Atmosphäre schirmt zudem für das Leben gefährliche Strahlung ab, dies betrifft sowohl elektromagnetische Strahlung im ultravioletten Bereich (Abschirmung durch Sauerstoff und Ozon) als auch Partikelstrahlung (z. B. von Sonneneruptionen, Abschirmung durch die Masse der Atmosphäre bzw. das Erdmagnetfeld). Darüber hinaus ist eine wesentliche Funktion der Atmosphäre der Transport von Wärme und Wasser innerhalb des Erdsystems. Zudem wärmt die Atmosphäre durch den natürlichen Treibhauseffekt die Erde um ca. 33 Grad gegenüber einer hypothetischen atmosphärenlosen Erde. Änderungen der Spurenstoffzusammensetzung der Atmosphäre (insbesondere die Zunahme von CO₂) bewirken eine Verstärkung des Treibhauseffektes, der die voranschreitende anthropogene Klimaänderung hervorruft (siehe oben und →Klimawandel).

Die Bewegung der Fluide der Erde (Luft, Wasser) wird mit den Methoden der Hydrodynamik kombiniert mit Energieerhaltung (\rightarrow Energie) beschrieben.

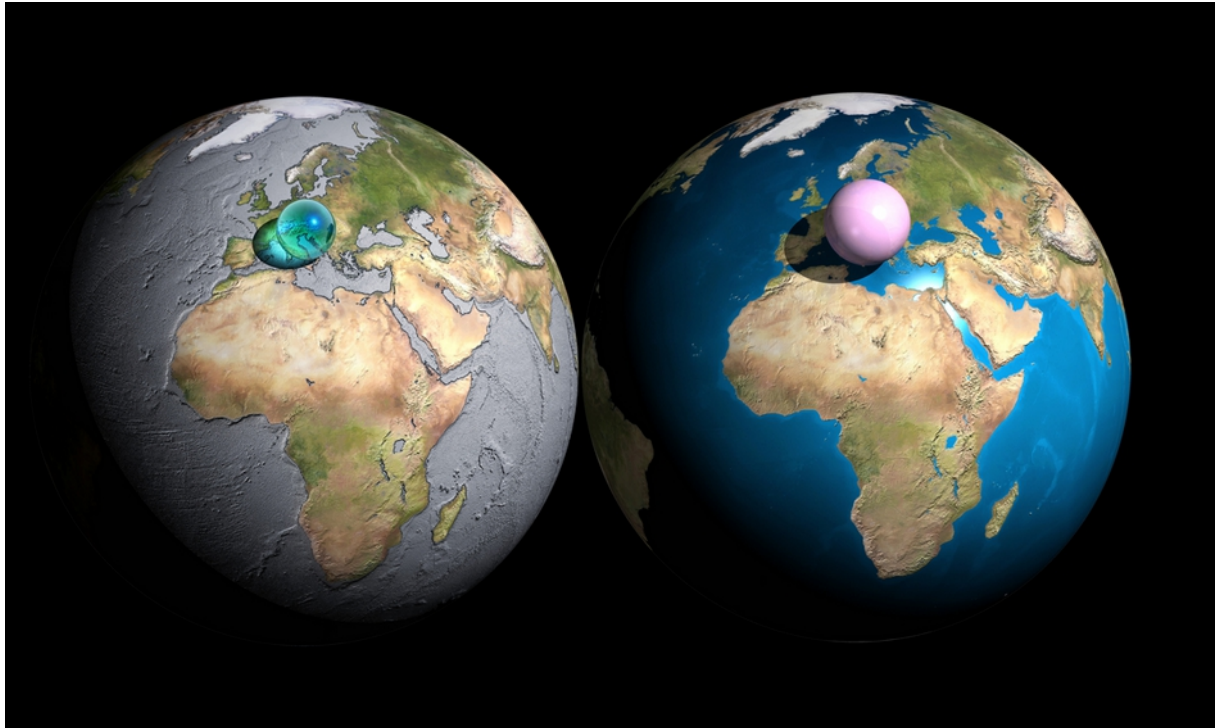


Abb. 2: Das gesamte Wasser der Erde würde in eine Kugel mit ca. 700 km Radius (links, blaue Kugel) passen, die gesamte Atmosphäre ergäbe (unter Normalbedingungen) eine Kugel von ca. 1000 km Radius (rechts, lila Kugel). Der Erdradius beträgt im Mittel 6371 km

Der Ozean

Der Ozean ist das zweite der beiden großen fluiden Systeme der Erde, er nimmt 71 % der Erdoberfläche ein und enthält 97,5 % der Wasservorräte der Erde. Seine Gesamtmasse entspricht einer 2800 m dicken Wasserschicht, die die gesamte Erde bedeckt. Abb. 2 veranschaulicht das Volumen des Wassers der Erde: Alles Wasser ergäbe eine Kugel von ca. 700 km Radius. Trotz der im Vergleich zur Atmosphäre deutlich größeren Masse nimmt der Ozean also ein etwas kleineres Volumen als die Atmosphäre ein. Beide Systeme sind groß, aber durchaus endlich, weshalb ihre chemische Zusammensetzung und (indirekt) ihr Energiegehalt durch menschliche Eingriffe verändert werden können. Entsprechend seiner Größe spielt der Ozean eine zentrale Rolle im Wasserkreislauf der Erde. Der Ozean enthält ca. 98 % des mobilen Kohlenstoffs der Erde (überwiegend als Hydrogenkarbonat gelöst), er nimmt derzeit ca. 1/4 der anthropogenen CO_2 -Emission auf, was zu einer zunehmenden Versauerung des Wassers führt. Dementsprechend ist ein wichtiges Thema die Quantifizierung des Gasaustausches zwischen Atmosphäre und Ozean. Ebenfalls durch Austauschprozesse sowie die Strahlungsbilanz an der Oberfläche nimmt der Ozean den überwiegenden Teil ($> 90\%$) der Wärme auf, welche das Erdsystem derzeit infolge des durch zunehmende Treibhausgase bedingten globalen Strahlungsungleichgewichts gewinnt.

Eis (Kryosphäre)

Als Kryosphäre bezeichnet man die Teile des Erdsystems, die permanent mit Eis bedeckt sind sowie die Permafrostböden (Periglazialgebiete). Von der Eismasse her dominiert der Antarktische Kontinent gefolgt vom grönländischen Eisschild. Beide zusammen enthalten etwa 2/3 des Süßwassers der Erde (das nur 2,5 % der gesamten Wasservorräte der Erde ausmacht). Geringere Eismengen finden sich im Meereis und in Gletschern mittlerer Breiten. Die Kryosphäre ist – wie der Ozean – Teil des Wasserkreislaufs der Erde. Die Ausdehnung der polaren Eismassen bestimmt den Meeresspiegel und hat durch ihre hohe Albedo (Rückstreuvermögen für Sonneneinstrahlung) großen Einfluss auf das Klima. Zudem stellt die Schmelzwärme des Eises einen wesentlichen Energiespeicher im Erdsystem dar (→Klima). Massive Änderungen in der Kryosphäre sind charakteristisch für die Klimazustände der Vergangenheit (glaziale und interglaziale Stadien). Sie spielen auch eine wichtige Rolle im aktuellen →Klimawandel: Abschmelzende Gletscher und Eisschilde führen zu Meeresspiegelanstieg, der Rückgang des Meereises verstärkt die arktische Erwärmung und auftauende Permafrostböden setzen Treibhausgase frei.

Böden und Grundwasser

Böden sind von zentraler Bedeutung für das pflanzliche Leben auf der Erde und damit auch für die Ernährung (fast) aller Landtiere und des Menschen. Eine wichtige Voraussetzung für Pflanzenwachstum ist das Boden- und Grundwasser. Der Boden wird eingeteilt in eine ungesättigte Zone, in der sich im Porenraum Luft und Wasser befinden (siehe Abb. 3). Darunter liegt die gesättigte Zone, in der der Porenraum vollständig mit Wasser gefüllt ist und sich in sogenannten Grundwasserleitern bewegt. Wichtige Fragestellungen der Umweltphysik sind die Untersuchung des Wassertransportes in der ungesättigten Zone, der Grundwasserströmung und des Grundwasseralters. Diese Prozesse und Größen sind von entscheidender Bedeutung für den Wasserhaushalt von Böden sowie die langfristige Wasserspeicherung in Grundwasserreservoirien, die vielerorts eine wichtige Quelle von Trinkwasser darstellen.

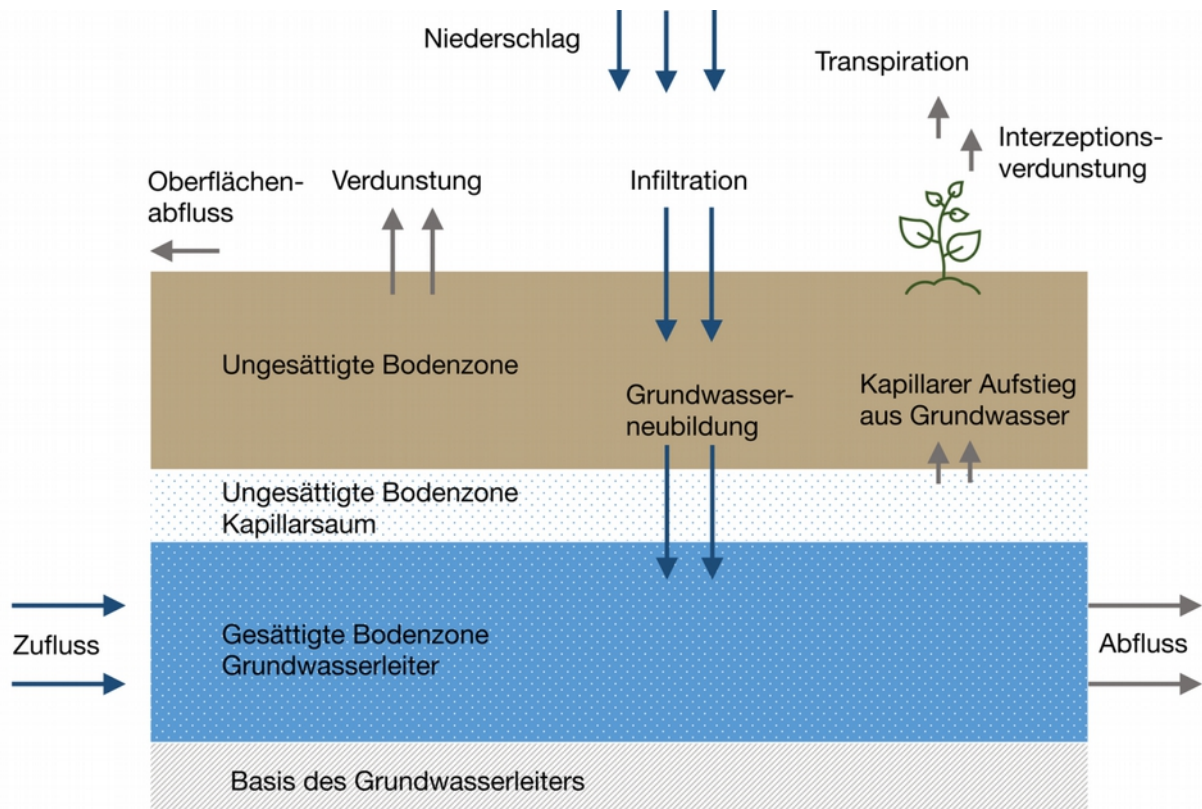


Abb. 3: Der Boden wird eingeteilt in eine ungesättigte Zone, in der sich im Porenraum Luft und Wasser befinden. Darunter liegt die gesättigte Zone, in der der gesamte Porenraum mit Wasser gefüllt ist, die wiederum von der Kruste der festen Erde nach unten begrenzt wird. Der Bodenwasserhaushalt wird bestimmt durch die Prozesse Niederschlag, Infiltration, Grundwasserneubildung sowie Verdunstung und Transpiration durch die Pflanzen

Feste Erde (Kruste und Erdinneres)

Die Untersuchung des Erdinneren wird im deutschen Sprachgebrauch überwiegend der Geophysik statt der Umweltphysik zugeordnet. Die Prozesse im Erdinneren beeinflussen unser Leben entscheidend. Erdbeben und Vulkanismus sind Bedrohungen, die aus dem Erdinneren kommen (→Geowissenschaften). Ebenso rührt das Magnetfeld, das uns vor kosmischer Strahlung schützt, von Strömen im Erdinneren (dem äußeren, flüssigen Erdkern, siehe Abb. 4) her, die dort aufgrund komplexer Vorgänge fließen.

Der Aufbau des Erdinneren kann nur indirekt aus akustischen Daten (Seismik) und aus dem Magnetfeld und dem Schwerefeld der Erde bestimmt werden. Der „Zwiebelschalen“-Aufbau des Erdinneren (Abb. 4) aus innerem beziehungsweise äußerem Kern und unterem beziehungsweise oberem Mantel wird überwiegend aus dem Durchgang von akustischen Wellen erschlossen. Ein interessanter Punkt ist dabei die Unterscheidung zwischen festen und flüssigen Schalen des Erdinneren. Die Unterscheidung kann aufgrund des Verhaltens von akustischen Wellen getroffen werden, diese können sich als Transversalwellen (Scherwellen, die Auslenkung ist senkrecht zur Ausbreitungsrichtung) beziehungsweise Longitudinalwellen (Dichtewellen, die Auslenkung ist parallel zur Ausbreitungsrichtung) ausbreiten.

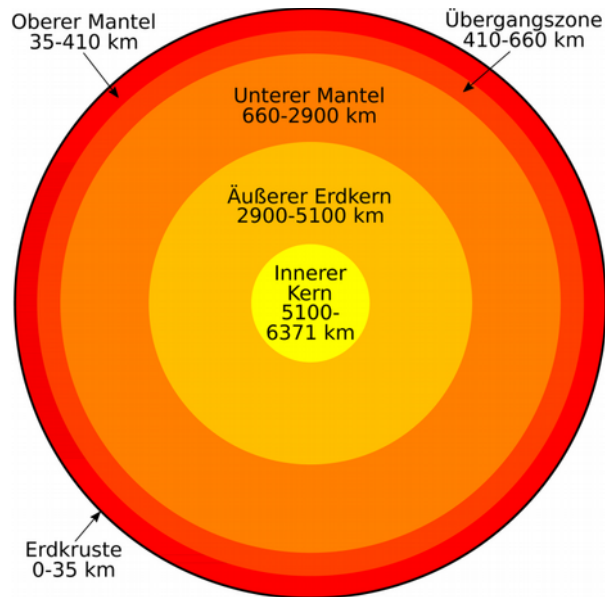


Abb. 4: Der Schalen-Aufbau der festen Erde

Bezüge zu anderen Handlungsfeldern

Viele Fragestellungen und Forschungsgebiete der Physik und insbesondere der Umweltphysik haben Bezüge zu Handlungsfeldern, von denen einige in diesem Handbuch behandelt werden:

Luft- und Wasserqualität als Fragestellung mit Bezug zum Handlungsfeld
→Verschmutzung.

Ozon, Aerosol (Feinstaub) und andere Luftschadstoffe mit Bezug zum Handlungsfeld
Gesundheit

Wasser und Bodenforschung mit Bezug zu den Handlungsfeldern Ernährung und
Ressourcen

Viele Fragen der Umweltphysik (Treibhausgaskreisläufe, Strahlungseigenschaften der Atmosphäre, Atmosphärenzirkulation, Ozeanzirkulation) betreffen das Handlungsfeld Klima (→Klimawandel) bzw. verschränken sich mit den Konzepten des →Anthropozäns und von →Wachstum und Wohlstand.

Zahlreiche Themen der Umweltphysik haben Bezug zu Umweltgefahren und damit zu Risiken (→Risiko).

Methoden und Bezüge zu den Konzepten:

Ein sehr wesentliches Konzept der Umweltphysik ist die Modellierung (siehe Abschnitt Modellierung). Nun ist – wie oben dargelegt – Modellbildung ein wichtiger Teil der Methodik in fast allen Sparten der Physik, wobei die Herausforderungen in der Umweltphysik oft größer sind, da häufig sehr komplexe Systeme modelliert werden müssen. Ein populäres Beispiel ist das Klimasystem der Erde. Die Untersuchung des zukünftigen Verhaltens dieses Systems ist für die Gesellschaft von großer Bedeutung. Sie gehört daher (wie auch die Kernenergie oder

die Atomrüstung) zu den Gebieten der Physik, die auch Gegenstand politischer Kontroversen sind (siehe z. B. Morgan und McCrystal 2009).

Umweltbezogene, interdisziplinäre Ansätze der (Umwelt)Physik:

Geowissenschaften: Hier gibt es zahlreiche Bezüge und auch eine gewisse Überlappung der Forschungsbereiche, wie etwa in der Geodynamik, bei den Stoffkreisläufen, den Umweltarchiven und im Klimawandel.

Im Wasserbereich: Physik und Biologie (physikalische und biologische Limnologie), sowie die Fachdisziplinen der Ozeanographie.

Im Atmosphärenbereich: Meteorologie, Chemie, Physik der Atmosphäre, Aeronomie (Physik der Hochatmosphäre), Extraterrestrische Physik und Astrophysik.

Literaturverzeichnis

- Arrhenius, Svante. 1866. „On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground.“ *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 41, Nr. 251: 237–76. Zugriff am 8. November 2021. https://www.rsc.org/images/Arrhenius1896_tcm18-173546.pdf.
- Burrows, John P., Ulrich Platt und Peter Borrell (Hrsg.). 2011. *The Remote Sensing of Tropospheric Composition from Space*. Heidelberg: Springer.
- Flügge, Siegfried (Hrsg.). 1956–1988. *Handbuch der Physik*. 55 Bände. Berlin: Springer.
- Ebser, Sven, Arne Kersting, Tim Stöven, Zhongyi Feng, Lisa Ringena, Maximilian Schmidt, Toste Tanhua, Werner Aeschbach und Markus K. Oberthaler. 2018. „³⁹Ar Dating with Small Samples Provides New Key Constraints on Ocean Ventilation.“ *Nature Communications* 9: 5046. <http://doi.org/10.1038/s41467-018-07465-7>.
- Fourier, Jean B. J. 1827. „Mémoire sur les températures du globe terrestre et les espaces planétaires.“ *Mémoires de l'Académie royale des Sciences de l'Institut de France* 7: 570–604. Zugriff am 8. November 2021. https://www.academie-sciences.fr/pdf/dossiers/Fourier/Fourier_pdf/Mem1827_p569_604.pdf.
- Greulich, Walter, Ulrich Kilian und Christine Weber (Hrsg.). 2003. *Lexikon der Physik*. 6 Bände. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Libby, Willard F. 1952. *Radiocarbon Dating*. Chicago: University of Chicago Press.
- Lorenz, Edward N. 1963. „Deterministic Nonperiodic Flow.“ *Journal of the Atmospheric Sciences* 20, Nr. 2: 130–41. [http://doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020<0130:DNF>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2).
- Maithani, Sanchi, und Manik Pradhan. 2020. „Cavity ring-down spectroscopy and its applications to environmental, chemical and biomedical systems.“ *Journal of Chemical Sciences* 132, Nr. 1: 114. <http://doi.org/10.1007/s12039-020-01817-x>.
- Meschede, Dieter (Hrsg.). 2015. *Gerthsen Physik*. 25. Auflage, Berlin: Springer Spektrum. Erstveröffentlichung 1948.
- Monteith, John L. 1973. *Grundzüge der Umweltphysik*. Darmstadt: Steinkopff.
- Morgan, Gareth, und John McCrystal. 2009. *Poles Apart: Beyond the Shouting, Who's Right About Climate Change?* Auckland, N.Z.: Random House New Zealand.

- Münnich, Karl Otto (2003). „Umweltphysik.“ In *Lexikon der Physik*, herausgegeben von Walter Greulich, Ulrich Kilian Ulrich und Christine Weber. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag
- Platt, Ulrich, und Christian von Savigny. 2017. „Hauchdünn aber lebenswichtig.“ *Physik Journal* 16, Nr. 7: 31–34. Zugriff am 8. November 2021. <https://www.pro-physik.de/restricted-files/82781>.
- Roedel, Walter, und Thomas Wagner. 2017. *Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre*. 4. Auflage, Berlin: Springer Spektrum, 222. Erstveröffentlichung 1992.
- Roether, Wolfgang. 2019. „Die Anfänge des Fachverbands Umweltphysik in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.“ *Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG)*. Zugriff am 11. August 2020. https://www.dpg-physik.de/vereinigungen/fachlich/ohne-sektion/fvup/mitglieder/anfaenge_fv-up_w-roether.pdf.
- Roether, Wolfgang, und Ulrich Platt. 1997. „Umweltphysik: Eine Bestandsaufnahme.“ *Physikalische Blätter* 53, Nr. 2: 106.
- Trenberth, Kevin E., Lesley Smith, Taotao Qian, Aiguo Dai und John Fasullo. 2007. „Estimates of the Global Water Budget and Its Annual Cycle Using Observational and Model Data.“ *Journal of Hydrometeorology* 8, Nr. 4: 758–69. <http://doi.org/10.1175/JHM600.1>.
- Tyndall, John. 1859. „Note on the Transmission of Radiant Heat through Gaseous Bodies.“ *Proceedings of the Royal Society of London* 10: 37–39. <https://doi.org/10.1098/rspl.1859.0017>.

Bildnachweis

Abb. 1: Autoren (Grafik: Anna Morlock) nach Max Planck Institut für Chemie, Mainz

Abb. 2: Adam Nieman, <https://www.sciencephoto.com/media/159214/view/global-water-and-air-volume>

Abb. 3: nach Jana Chmielecki: https://www.bodenkunde-projekte.huberlin.de/boku_online/pcboku10.agrar.huberlin.de/cocoon/boku/sco_6_wasserhaushalt_080af.html?section=N100CI

Abb. 4: Gemeinfrei (Chris828 via Wikimedia Commons)