



Modul 1

System Erde – Die Grundlagen

Begleittext für Lehrkräfte

**Sylke Hlawatsch, Horst Bayrhuber, Klaus-Henning Hansen,
Kristin Hildebrandt und Marco Thiele**

Dieser Text steht zusammen mit den Texten der 10 weiteren Module des Projektes „Forschungsdialog: System Erde“ auf der CD-ROM „System Erde“ als Hypertext bzw. die Materialien als pdf-Dateien, Videos, Interaktionen, Animationen usw. über ein komfortables Navigationssystem mit Suchfunktion zur Verfügung.

Mit der CD-ROM können auch eigene Materialien erstellt werden. Außerdem kann aus der CD-ROM eine Schülerversion, die für das selbst organisierte Lernen vorgesehen ist - und keine didaktischen Informationen enthält - erstellt werden.



Das Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN) ist eine interdisziplinär arbeitende Forschungseinrichtung mit überregionaler, gesamtstaatlicher Aufgabenstellung. Auftrag des Instituts ist es, durch seine Forschungen die Pädagogik der Naturwissenschaften weiter zu entwickeln und zu fördern. Das IPN gliedert sich in die vier Fachabteilungen Biologie-, Chemie-, Physikdidaktik und Erziehungswissenschaften (mit Pädagogisch-Psychologischer Methodenlehre). Das IPN ist Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft. Enge Beziehungen bestehen zur Kieler Universität.

Weitere Informationen: <http://www.ipn.uni-kiel.de>

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte IPN-Projekt „Forschungsdialog: System Erde“ dient dem Ziel, das Verständnis des Planeten Erde zu fördern. Auf der Basis soliden Wissens soll die Beschäftigung und Auseinandersetzung mit der nachhaltigen Entwicklung der Erde angeregt werden. Die Materialien zum Thema „System Erde“ wurden vom IPN in enger Kooperation mit Geowissenschaftlerinnen und Geowissenschaftlern sowie Lehrkräften entwickelt und anschließend im Schulunterricht erprobt und evaluiert. Für den Unterricht in der Sekundarstufe II steht eine umfangreiche CD-ROM zur Verfügung, die u. a. Animationen, Simulationen, Informationstexte und Arbeitsblätter zu insgesamt 11 Modulen des Themas System Erde enthält. Der vorliegende Text ist Teil dieser CD-ROM, die beim IPN erhältlich ist. Für den Unterricht in der Grundschule wurde ein Sachbuch und eine beiliegende CD-ROM mit Computerspielen entwickelt. Unterrichtsmaterialien für die Hand der Lehrkräfte sind im Internet erhältlich (<http://Systemerde.ipn.uni-kiel.de>).

© 2005
Alle Rechte beim
Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN)
Olshausenstraße 62, D-24098 Kiel.



Forschungsdialog: System Erde

Kontakt:

Ulrike Gessner
Leibniz-Institut für die Pädagogik der
Naturwissenschaften an der Universität Kiel
Olshausenstr. 62
24098 Kiel

Tel: ++49 (0431) 880-3121
E-Mail: gessner@ipn.uni-kiel.de
<http://systemerde.ipn.uni-kiel.de>

Auf verschiedenen Seiten befinden sich Verweise (Links) auf Internet-Adressen. Haftungshinweis: Trotz sorgfältiger inhaltlicher Kontrolle wird die Haftung für die Inhalte der externen Seiten ausgeschlossen. Für den Inhalt dieser externen Seiten sind ausschließlich deren Betreiber verantwortlich. Sollten Sie bei dem angegebenen Inhalt des Anbieters dieser Seite auf kostenpflichtige, illegale oder anstößige Inhalte treffen, so bedauern wir dies ausdrücklich und bitten Sie, uns umgehend per E-Mail davon in Kenntnis zu setzen, damit beim Nachdruck der Verweis gelöscht wird.

Autoren dieses Moduls:

Dr. Sylke Hlawatsch (Gesamtkonzeption, Sachanalyse, Concept Mapping, Sphärenrallye-Drehbuch, Didaktische Information, Erprobung, Koordination), Kristin Hildebrandt (Systemtheorie und Darstellungsmethoden), Prof. Dr. Horst Bayrhuber (Sachanalyse, Systemtheorie, Sphärenrallye-Drehbuch), Dr. Klaus-Henning Hansen (Concept Mapping), Marco Thiele (Genese des Wissens)

Beratung:

Schulpraxis: Dieter Zielinsky (Toni-Jensen-Schule, Kiel), Dr. Thönnies (Hebbelschule, Kiel)

Multimediaumsetzung, Grafik und Layout:

CD-ROM, Rahmenlayout, Grafiken: MMCD GmbH interactive in science (Düsseldorf)

Texte: Anke Heidrich und Päivi Taskinen (IPN)

Herausgeber:

Prof. Dr. Horst Bayrhuber, Prof. Dr. Manfred Euler,
Dr. Sylke Hlawatsch,



Inhaltsverzeichnis

1 Allgemeine Zielsetzung und Begründung	4
2 Sachinformation	4
2.1 Meilensteine der Erdentwicklung	4
2.2 Systemdenken als neuer Ansatz in den Naturwissenschaften.....	7
2.3 Das Systemkonzept	7
2.3.1 Systemanalyse	10
2.3.2 Beispiel: System Erde	11
2.3.3 Wie kann man Systeme darstellen?	13
2.3.4 Zustand eines Systems	14
3 Didaktische Information.....	15
3.1 Lernziele	15
3.2 Lernvoraussetzungen	16
3.3 Hinweise zur horizontalen und vertikalen Verknüpfung der Inhalte	16
3.4 Erläuterung und Nutzungshinweise zu den Materialien	17
4 Vorschläge für den Unterrichtsverlauf.....	18
5 Literatur	19
6 Unterrichtsmaterialien	20

Anhang:

Unterrichtsmaterialien

Baustein 1: Einführung in das Systemkonzept

Baustein 2: Die Erde als System



1 Allgemeine Zielsetzung und Begründung

Das Modul „System Erde – Die Grundlagen“ ermöglicht eine kurze, phänomenologische Einführung in das komplexe System Erde. Die Teilsysteme Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre, deren Wechselbeziehungen die Entwicklung des Systems Erde bestimmen, werden als übergeordnetes Kategorienschema eingeführt. Angetrieben werden die vier Teilsysteme (Sphären) durch die Energie aus dem Erdinneren und durch die Sonnenenergie.

Die Schüler/innen wiederholen und ergänzen eigenständig Grundkenntnisse zum Aufbau und zu stofflichen Aspekten der Bestandteile der vier Sphären der Erde. Insbesondere lernen sie, Wechselbeziehungen zwischen den Sphären und innerhalb der Sphären zu identifizieren. Dies geschieht auf der Grundlage einer Einführung in das Systemkonzept, für das zwei Unterrichtsbausteine und ein Begleittext zur Verfügung stehen. Der Unterricht ist zyklisch angelegt, sodass Phasen der Wiederholung, Erläuterung, Vertiefung und Anwendung grundlegender Konzepte aneinander anschließen.

Basis der geowissenschaftlichen Erforschung des Planeten Erde ist das interdisziplinäre Arbeiten. Deshalb greift das Modul „System Erde – Die Grundlagen“ im Fachunterricht erworbenes Vorwissen der Schüler/innen auf und stellt dieses am Beispiel des Systems Erde in einen interdisziplinären Zusammenhang. Die Schüler/innen lernen außerdem die Methode Systemanalyse kennen. Dies ist ein Hilfsmittel zur Strukturierung komplexer, stark vernetzter Inhalte, das sie auch in anderen Wissensdomänen anwenden können.

2 Sachinformation

Das Modul „System Erde – Die Grundlagen“ führt in das komplexe System Erde mit den Teilsystemen Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre ein. Die Wechselbeziehungen zwischen den Teilsystemen bestimmen die Entwicklung des Systems Erde. Angetrieben werden die vier Teilsysteme (Sphären) durch die Energie aus dem Erdinneren und durch die Sonnenenergie.

2.1 Meilensteine der Erdentwicklung

Eine langsam rotierende Wolke aus Staub und Gas - das war vermutlich der Ursprung unseres Planetensystems. Der Staub konzentrierte sich zu Materiewolken, die weit in den Weltraum hinausreichten. Indem sich Materie zusammenballte, entwickelten sich zunächst - vor etwa 5 Milliarden Jahren - die Sonne und etwas später die Planeten des Sonnensystems (s. Abb. 1). Unser Heimatplanet, die Erde, entstand vor 4,6 Milliarden Jahren. Wie entwickelte sich die Erde von damals weiter?

Aufgrund ihrer Schwerkraft zog die Erde nach ihrer Entstehung zunächst eine sehr große Zahl von Meteoriten an, die sich frei im Sonnensystem bewegten. Diese gingen in dem unvorstellbar langen Zeitraum von 800 Millionen Jahren wie ein Hagelschauer auf die Erde nieder. Jeder Meteorit setzte beim Aufprall Wärmeenergie frei. Auch führte der radioaktive Zerfall von Elementen im Erdinneren wie in einem riesigen Kernkraftwerk zu einer Erwärmung. Die Erde wurde aus diesen Gründen immer heißer.

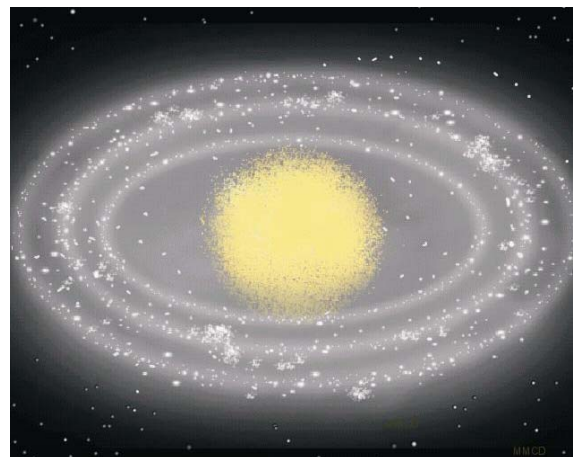


Abbildung 1: Das frühe Sonnensystem.

beim Aufprall Wärmeenergie frei. Auch führte der radioaktive Zerfall von Elementen im Erdinneren wie in einem riesigen Kernkraftwerk zu einer Erwärmung. Die Erde wurde aus diesen Gründen immer heißer.

Die frühe Erde war vermutlich homogen und hatte noch keine Kontinente und Ozeane (s. Modul „Plattentektonik und Vulkanismus“). Mit zunehmender Erwärmung des Erdinneren schmolz die Erde teilweise auf, und es kam zu einer Trennung der verschiedenen Bestandteile (s. Abb. 2). Eisen sank in den zentralen Bereich ab, und spezifisch leichteres Material stieg an die Oberfläche. Dadurch entstand vermutlich ein Ozean aus Magma, der die ganze Erde bedeckte.

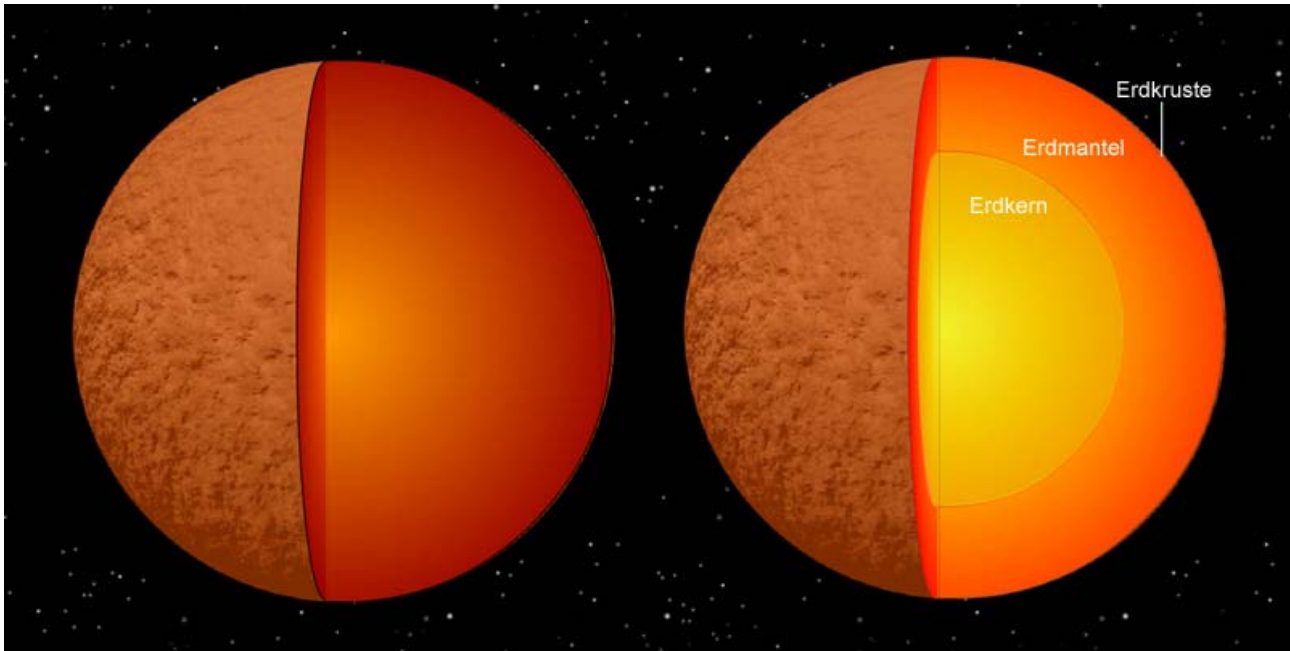


Abbildung 2: Die Erde bildete ihren Aufbau erst im Laufe der Erdgeschichte aus. Die linke Abbildung stellt die homogene Erde dar, während die rechte die spätere Erde mit Erdkern, Erdmantel und Erdkruste zeigt.

Die Erde war nahezu von Anfang an von einer Gashölle, der Atmosphäre, umgeben. Soweit heute bekannt ist, bestand die Uratmosphäre hauptsächlich aus Stickstoff, Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf. Als der Meteoritenschauer vor etwa 3,8 Milliarden Jahren versiegte, kühlte die Erde wieder ab. Mit der Zeit bildeten sich die ersten Gesteine, und die Oberfläche erstarrte schließlich zu einer festen Kruste, Lithosphäre genannt. Der älteste Stein, den man bisher gefunden hat, stammt von der Südküste Grönlands. Er ist 3,75 Milliarden Jahre alt (LAMB und SINGTON 1998).

Nachdem die Erde weiter abgekühlt war, kondensierte Wasserdampf in der Atmosphäre. Die Wassertropfen fielen zu Boden und sammelten sich in den Senken der Erdkruste. Damals gingen sehr große Mengen Wasser in Wolkenbrüchen nieder. Die Wassermassen, welche heute die Hydrosphäre der Erde bilden, also die Ozeane, Flüsse, Seen, das Grundwasser und die Wolken, waren seinerzeit zum großen Teil als Wasserdampf in der Atmosphäre verteilt. Auch aus Gesteinen wurde Wasser freigesetzt.

So haben sich nacheinander mit der Atmosphäre, der Hydrosphäre und der Lithosphäre drei der vier übergeordneten Teilsysteme des Systems Erde entwickelt (s. Abb. 3). Als Lithosphäre bezeichnen wir die Erdkruste und einen Teil des oberen Erdmantels, die aus Gesteinen bestehen (s. Modul „Gesteinskreislauf: Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte“ und „Plattentektonik und Vulkanismus“). Der Begriff Hydrosphäre beschreibt alle mit Wasser bedeckten Regionen wie Ozeane, Flüsse, Seen und auch das Grundwasser im Boden (s. Modul „Wasserkreislauf und Trinkwasserschutz“).



Die Gase der Atmosphäre lösten sich im Wasser. Deshalb entzogen die Ozeane der Atmosphäre von Anfang an auch Kohlenstoffdioxid. Im flachen Meer bildeten sich organische Verbindungen, z. B. Aminosäuren, kurze Eiweißketten und erste Molekülbau- steine, die denjenigen heutiger Erbsubstanz ähneln (s. Abb. 4). Aus diesen bildeten sich Urzellen, die sich mit Membranen von der Umwelt abgrenzten. So entwi- ckelte sich aus dem Zusammenspiel der Atmosphäre, der Hydrosphäre und der Lithosphäre die Biosphäre, die aus den bakterienartigen Archaea, Bakterien, Ein- zellern, Pilzen, Pflanzen und Tieren besteht (s. Modul „Entstehung und Entwicklung des Lebens“).

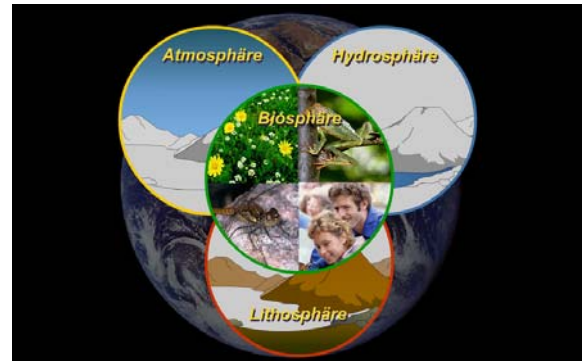


Abbildung 3: Die Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre sind die vier übergeordneten Teilsysteme des Systems Erde.

Die wohl ältesten Versteinerungen von Organismen sind möglicherweise 3,5¹ Milliarden Jahre alt (STANLEY 1994). Diese Fossilien wurden von Lebewesen gebildet, die den heutigen Cyanobakterien in ihrer äußeren Erscheinung ähneln. Sie lebten im Meer und bildeten Strukturen, die Stromatolithe genannt werden. Fossilien und andere Gesteine dienen in der Gegenwart als Schlüssel zum Verständnis dieser frühen Zeit (s. Mo- dul „Entstehung und Entwicklung des Lebens“).

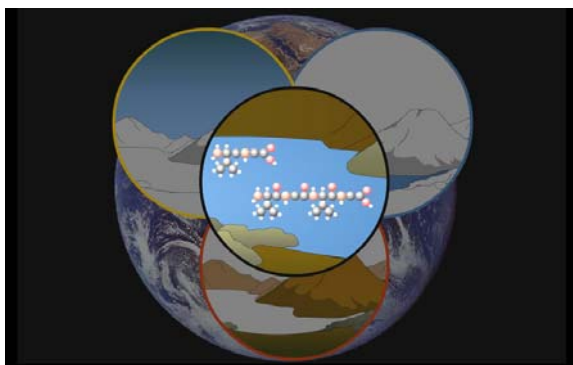


Abbildung 4: Die Biosphäre entstand aus dem Zusammenspiel von Atmosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre.

Die wohl ältesten Versteinerungen von Organismen sind möglicherweise 3,5¹ Milliarden Jahre alt (STANLEY 1994). Diese Fossilien wurden von Lebewesen gebildet, die den heutigen Cyanobakterien in ihrer äußeren Erscheinung ähneln. Sie lebten im Meer und bildeten Strukturen, die Stromatolithe genannt werden. Fossilien und andere Gesteine dienen in der Gegenwart als Schlüssel zum Verständnis dieser frühen Zeit (s. Mo- dul „Entstehung und Entwicklung des Lebens“). Noch 1,5 Milliarden Jahre später, also vor gut 2 Milliarden Jahren, existierten auf der Erde ausschließlich ver- schiedene Arten von Prokaryoten, die noch allesamt im Meer lebten. Es handelte sich um Archaea, bakte- rienartige Lebewesen.

Von Bakterien wurde schließlich die Fotosynthese entwickelt, bei der Sauerstoff frei wird und die heute im Pflanzenreich weit verbreitet ist. Der Sauerstoff aus der Fotosynthese reagierte im Meerwasser sofort mit Eisenverbindungen zu rotem Eisenoxid. Zunächst gelangte er daher nicht in nennenswerten Mengen in die Atmosphäre. Da die meisten Eisenverbindungen

bereits nach einiger Zeit im Meerwasser oxidiert waren, konnte sich Sauerstoff dort anreichern. Somit war die Voraussetzung für die Entwicklung der Zellatmung bei Lebewesen gegeben. Bei der **Zellatmung** wird durch Oxidation organischer Stoffe mit Sauerstoff Energie gewonnen. Einige Millionen Jahre lang wurde je- doch stets mehr Sauerstoff freigesetzt als durch Atmung oder andere Sauerstoff zehrende Prozesse gebun- den wurde. Der Sauerstoffgehalt der Atmosphäre nahm daher von etwa 0,2 % auf 21 % zu. Der Wert von 21 % stellte sich erst im Anschluss an das Auftreten der Landpflanzen vor gut 400 Millionen Jahren nach und nach ein.

Nachdem die Erde ihren schaligen Aufbau ausgebildet hatte, bestand sie aus dem Erdkern, dem Erdmantel und der Erdkruste (s. Modul „Gesteinskreislauf: Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte“). Vermutlich erst nach etwa 2 Milliarden Jahren setzten sich die Lithosphärenplatten in Bewegung. Sie drifteten ausein- ander, sodass riesige Ozeanbecken entstanden. Im weiteren Verlauf stießen Platten zusammen und an den

¹ Diese Zahl wird auch angezweifelt (siehe u. a. ENGELN 2000). Es wird aber als sicher angenommen, dass es vor 2,7 Milliarden Jahren Leben auf der Erde gab.



Plattenrändern wurden hohe Gebirge aufgefaltet. Die Energie für diesen Prozess, der Plattentektonik genannt wird, liefert auch heute noch der Zerfall radioaktiver Elemente im Erdkern und im tiefen Erdmantel (s. Modul „Plattentektonik und Vulkanismus“). Durch den Temperaturunterschied zwischen Erdinnerem und Erdoberfläche werden Konvektionsströme im Erdmantel und im Erdkern in Gang gesetzt (s. Modul „Konvektion in Erdmantel, Ozean und Atmosphäre“). Auch die Atmosphäre ist in ständiger Bewegung, und Winde sowie Temperaturunterschiede im Ozean führen zu gewaltigen Meeresströmungen. Die Energie der Bewegungen in der Atmosphäre und Hydrosphäre stammt von der Sonne.

2.2 Systemdenken als neuer Ansatz in den Naturwissenschaften

Seit Jahrhunderten liefern die Naturwissenschaften durch ihre Forschung Erkenntnisse über unsere Welt. Sie unterteilten ihr Forschungsobjekt in kleine und einfach zu überschauende Bereiche. Diese Beschränkung auf die Erforschung von Details wird als reduktionistisches Vorgehen bezeichnet. Es war so erfolgreich, dass damit sowohl große technische Herausforderungen, wie z. B. die Reise zum Mond als auch die Erforschung des Innersten der Materie gemeistert wurden. Lange ging man davon aus, dass alle natürlichen Prozesse auf diese Weise analysiert werden können. Erst Anfang des 20. Jahrhunderts zeigte sich jedoch, dass dieser Methode bei einer Vielzahl von Phänomenen Grenzen gesetzt sind. An folgenden Beispielen wurde dies deutlich:

- **Quantenmechanik:** Für das Verhalten von Elementarteilchen lassen sich nur Wahrscheinlichkeitsaussagen machen. Insbesondere kann man z. B. die Geschwindigkeit und die jeweilige Position eines Elektrons nicht beliebig genau messen. Informationen über beide Größen wären aber für die genaue Vorhersage der zukünftigen Bewegung dieses Elektrons notwendig.
- **Chaostheorie:** Im Jahre 1961 entdeckte Edward LORENZ bei der Untersuchung von Strömungsgleichungen, die bei der Wettervorhersage wichtig sind, ein einfaches System, das sich deterministisch verhält und auf das sich aber kleinste Veränderungen von Einflussgrößen stark auswirken können. Aus diesem Grund ist das Verhalten solcher Systeme praktisch nicht vorhersagbar. Bekannt wurde in diesem Zusammenhang die Hypothese des **Schmetterlingseffekts**, wonach der Flügelschlag eines Schmetterlings eine Kette von Ereignissen in Gang setzt und damit im Prinzip Verursacher für einen Wirbelsturm sein kann.
- **Erdsystemforschung:** Neben dem Verhalten von Elementarteilchen und von Störungen in der Atmosphäre gibt es eine Vielzahl weiterer Phänomene, die sich nicht durch einen reduktionistischen Ansatz erforschen lassen. Dazu gehören z. B. die Entstehung des Lebens, Klimaänderungen, Strukturbildungen auf der Oberfläche der Sonne oder Schwankungen von Populationen.

Als tragfähig für die Erforschung dieser Aspekte hat sich das Systemkonzept erwiesen.

2.3 Das Systemkonzept

Ein **System** besteht aus Elementen, die miteinander in Beziehungen stehen (s. Abb. 5). Systeme sind veränderlich. Blicken wir aus dem Fenster, sehen wir einen Ausschnitt des Systems Erde zu einem bestimmten Zeitpunkt, z. B. Bäume, Wolken und Gewässer. Es handelt sich um Elemente dieses Systems, die miteinander in Beziehung stehen: Bäume tauschen mit der Luft über Atmung und Fotosynthese Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid aus. Mit den Wurzeln nehmen sie Wasser auf, und über die Blätter geben sie Wasserdampf ab. Der Blick zeigt eine Momentaufnahme aus einem Prozess der laufenden Änderungen des Systems: Bäume wachsen, die Luftbewegungen und die Wasserverfügbarkeit ändern sich ständig.



Bei Systemen ist es häufig sinnvoll, die Makro- und die Mikroebene zu unterscheiden: Unter der **Makroebene** versteht man das System als Ganzes (z. B. die ganze Erde), während als **Mikroebene** einzelne Systemelemente (z. B. die Sphären) bezeichnet werden. Die Zuordnung eines Systems zu einer solchen Ebene ist abhängig von der Fragestellung. So können z. B. die Wurzeln eines Baumes eine sinnvolle Makroebene bei der Betrachtung des Zusammenwirkens von Zellen bei der Wasser- bzw. Nährstoffaufnahme darstellen. Wurzeln müssen aber zur Mikroebene gezählt werden, wenn man den Wasserhaushalt des ganzen Baumes untersucht.

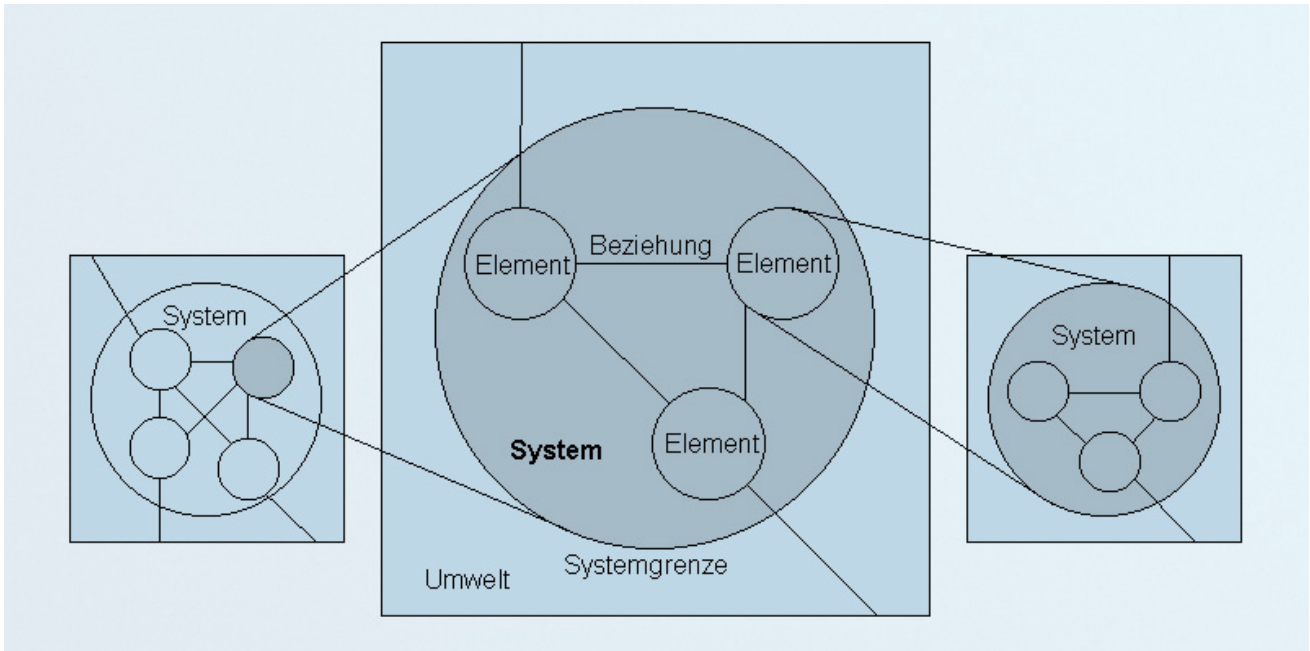


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Systems. Ein System existiert in einer Systemumwelt. Es besteht aus Elementen, die in bestimmten Beziehungen zueinander stehen. Eine Systemgrenze trennt das System von der Systemumwelt. Es gibt Beziehungen zwischen Elementen des Systems und Elementen der Systemumwelt (Input bzw. Output). Das in der Mitte dargestellte System liegt bezogen auf das links Dargestellte auf der Mikroebene, bezogen auf das System rechts aber auf der Makroebene.

Phänomene der **Selbstorganisation** zählen zu den möglichen unerwarteten Beobachtungen auf der Makroebene. So entstehen z. B. bei der Erwärmung einer Flüssigkeitsschicht auf dem Herd unter bestimmten Bedingungen spontan sechseckige Konvektionszellen (s. Modul „Konvektion in Erdmantel, Ozean und Atmosphäre“). Dieses Phänomen kann man nicht über das Verhalten von einzelnen Molekülen der Flüssigkeit erklären. Man nimmt an, dass auch die Entstehung des Lebens ein solches Phänomen der Selbstorganisation ist. Ein weiteres Beispiel stellt das Verhalten einer Kugel dar (s. Abb. 6).

Typen von Systemen

- Systeme können **einfach** oder **komplex** sein. Ein einfaches System besitzt eine relativ geringe Anzahl und wenig verschiedenartige Elemente. Auch die Menge und die Dichte der Beziehungen sind relativ gering. Das Gegenteil gilt für komplexe Systeme. Die Komplexität steigt mit dem Grad der Vernetzung der Elemente. In diesem Sinne besitzen das System Erde und seine Teilsysteme einen hohen Grad an Komplexität. Aus den Eigenschaften (einfach bzw. komplex) kann man jedoch nicht auf das Verhalten von Systemen oder ihre Vorhersagbarkeit schließen. Es gibt ganz einfache Systeme, die ein unvorhersagba-



res Verhalten zeigen (s. Abb. 6) und komplexe Systeme mit vorhersagbarem Verhalten (z. B. die Funktion der Chloroplasten bei der Fotosynthese).

- Systeme können **statisch** oder **dynamisch** sein. Statische und dynamische Systeme unterscheiden sich in Bezug auf ihr zeitliches Verhalten. Dynamische Systeme unterliegen einer dauernden Wandlung, wobei jedoch ein bestimmter Zustand zeitweise aufrecht erhalten werden kann. So führen Nährstoffaufnahme, Atmung und Fotosynthese dazu, dass bei einem Baum ständig Stoffe in den Organismus eingebaut und andere Stoffe an die Umgebung abgegeben werden. Trotz dieses laufenden Stoffflusses durch den Körper bleiben die Gestalt, die Struktur und die chemische Zusammensetzung des Baumes weitgehend gleich. Der Zustand des dauernden Stoffflusses und -abflusses wird als Fließgleichgewicht bezeichnet. Dieses bleibt auf Grund von Regelmechanismen erhalten. Lebewesen sind dynamische Systeme, auch das ganze System Erde und seine Teilsysteme sind in der Regel dynamisch. Ein Kirchturm kann als Beispiel eines weitgehend statischen Systems angesehen werden.

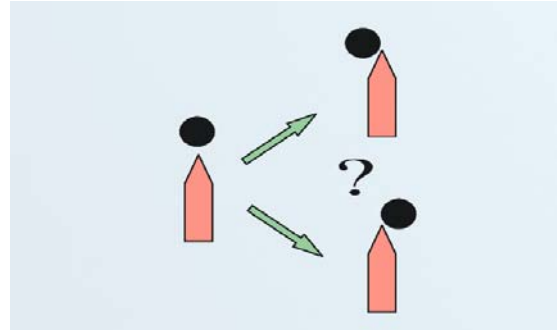


Abbildung 6: Ein einfaches nicht vorhersagbares System - es ist nicht zu entscheiden, in welcher Richtung die Kugel von der Spitze herunterfällt.

- Systeme können **abgeschlossen** oder **offen** sein. Abgeschlossene Systeme tauschen mit ihrer Umwelt weder Energie noch Stoffe aus und können daher nur theoretisch postuliert werden. Offene Systeme sind demgegenüber durch einen Austausch von Energie und Stoffen mit der Umgebung gekennzeichnet. Reale Systeme, wie zum Beispiel ein Baum oder die Erde mit ihren Teilsystemen, sind offen.
- Systeme können **deterministisch** oder **stochastisch** sein. Nach dem Grad der Vorbestimmtheit ihres Verhaltens wird zwischen deterministischen und stochastischen Systemen unterschieden. Deterministische Systeme verhalten sich in vorbestimmter Weise, der Zustand eines deterministischen Systems ist mit Hilfe von Gleichungen aus einem vorigen Zustand ableitbar. So schlägt das gesunde Herz des Menschen, der sich in Ruhe befindet, in vorhersagbarer Weise. Dies zeigt das EKG. Das Verhalten eines deterministischen Systems muss allerdings nicht immer klar und eindeutig vorhersagbar sein. Zum Beispiel gibt es chaotische Systeme, deren Dynamik deterministisch, deren Entwicklung jedoch nicht vorhersagbar ist (s. Abschnitt 2.2 „Systemdenken als neuer Ansatz in den Naturwissenschaften“, Schmetterlingseffekt). Stochastische Systeme verhalten sich demgegenüber stets in nicht vorbestimmter Weise, das heißt, der Zustand eines stochastischen Systems ist nicht mit Hilfe von Gleichungen aus einem vorigen Zustand ableitbar. Ihre Entwicklung kann nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit vorhergesagt werden. Eine Roulette kann als Beispiel eines stochastischen Systems angesehen werden.
- Ein System kann **stabil** oder **instabil** sein. Stabilität und Instabilität sind Unterscheidungskriterien, welche die Veränderungsmöglichkeiten eines Systems charakterisieren. Ein System ist stabil, wenn es Umweltereignisse in einem gewissen Umfang abpuffern beziehungsweise kompensieren kann. In stabilen Systemen wird der Einfluss von Störungen durch Regulationsmechanismen verringert. Stabile Systeme kehren nach einer Störung wieder in ihren Ausgangszustand zurück. So verringert ein Baum bei Wassermangel die Wasserdampfabgabe über die Blätter, er reguliert die Weite der Spaltöffnungen. Instabile Systeme verlassen demgegenüber bei Störungen den ursprünglichen Zustand. Sie können sich dabei grundlegend verändern. Ein Gletscher ist ein Beispiel für ein instabiles System: Wenn die Temperatur der Atmosphäre über den Schmelzpunkt des Eises steigt, schmilzt er und wird dabei immer kleiner.



2.3.1 Systemanalyse

Bei der **Systemanalyse** konstruiert der Systembetrachter ein Modell. Dieses bildet eine Auswahl von Elementen und Beziehungen des Systems ab, die für eine bestimmte Fragestellung relevant sind. Beispielsweise lässt ein **Plastikmodell** des Holzes eines Baumes nur Aussagen über die Struktur verschiedener Gewebe des Baumes und deren Lagebeziehungen zu, nicht aber über die Zellen, aus denen die Gewebe aufgebaut sind. Ein **Systemmodell** stellt damit ein begrenztes Abbild eines Originals dar. Es ist eine idealisierte und abstrahierte Darstellung, die Struktureigenschaften oder Funktionsweisen des Systems verständlich macht. Mit Hilfe eines Systemmodells lassen sich auch hypothetische Aussagen über Elemente und Beziehungen eines real vorhandenen Systems machen, die einer unmittelbaren Erforschung nicht oder noch nicht zugänglich sind. Dies galt z. B. für die Modellvorstellung der Plattentektonik, als es von ALFRED WEGENER (s. Modul „Plattentektonik und Vulkanismus“) entwickelt wurde. Die Aussagen dieser Modellvorstellung konnten später anhand von geologischen Befunden überprüft werden. Kommt es zu guten Übereinstimmungen mit empirischen Befunden, kann ein Modell zu Prognosen über die zukünftige Entwicklung von Systemen eingesetzt werden.

Eine Systemanalyse umfasst folgende Arbeitsschritte:

- Abgrenzung des Systems von der Systemumwelt;
- Identifizierung der (relevanten) Systemelemente;
- Identifizierung der (relevanten) Beziehungen (Wirkungen und Flüsse) zwischen den Elementen;
- Identifizierung der Systemeigenschaften;
- Identifizierung der Beziehungen des Systems zu anderen Systemen.

Die Ergebnisse der Analyse können in grafischer Form z. B. durch Concept Maps und / oder Stofffluss- bzw. Wirkungsdiagramme dargestellt werden (s. Abschnitt 2.3.3 „Wie kann man Systeme darstellen?“).

Diese Ergebnisse sind die Basis für eine Modellierung des Systems und für die Erarbeitung von Szenarien der zukünftigen Entwicklung. Bestimmte Modelle, z. B. der Klimaentwicklung, dienen als Basis für politische Entscheidungen.

Beispiel: Familie als System

Am Beispiel des Systems Familie sollen die Schritte einer Systemanalyse verdeutlicht werden. Ein erster Schritt zur Analyse des Systems „Familie“ ist die Identifikation der Systemgrenze und der relevanten Systemelemente. Der Blickwinkel, unter dem man dieses System betrachtet, bestimmt den Verlauf der Systemgrenze. Er legt weiterhin fest, welche Elemente als relevant angesehen werden. Steht beispielsweise die Kommunikation innerhalb der Familie im Mittelpunkt der Betrachtung, kommen alle Personen der Familie in Betracht, die miteinander reden. Dabei ist die Frage der verwandtschaftlichen Nähe nicht allein ausschlaggebend. So ist z. B. auch eine seit Jahren angestellte Haushälterin, die jeden Tag mit der Familie verbringt, hinsichtlich des Kriteriums Kommunikation ein relevantes Element des Systems Familie. Und sogar Haustiere können unter diesem Blickwinkel für die Funktion des Systems Familie als Kommunikationssystem wichtig sein. Unter der Fragestellung „Erbschaft“ ist die Haushälterin normalerweise jedoch kein relevantes Element des Systems „Familie“. Umgekehrt gibt es vielleicht Familienmitglieder, die unter dem Aspekt der Kommunikation keine Rolle im System spielen, aber bei Fragen der Erbschaft zu relevanten Systemelementen werden. In einem weiteren Schritt der Systemanalyse geht es um die Identifikation relevanter Bezie-



hungen. Zwischen den Elementen in dem komplexen und stark vernetzten System Familie gibt es eine Vielzahl von Wirkungsbeziehungen und sogar Stoffflussbeziehungen:

- Ein Beispiel für Wirkungsbeziehungen innerhalb des Systems Familie ist das Stressverhalten. Beruflicher Stress der Eltern kann sich negativ auf das Wohlbefinden anderer Familienmitglieder auswirken. Andererseits kann die Gelassenheit der Kinder den Stress von Vater oder Mutter mindern, was wiederum das Wohlbefinden anderer Familienmitglieder steigern kann.
- Die Geldflüsse zwischen den Familienmitgliedern sind ein Beispiel für Stoffflüsse, die das System Familie kennzeichnen. Geld kann von den Eltern auf die Kinder in Form von Taschengeld übergehen, die Großeltern geben den Kindern zusätzlich von Zeit zu Zeit Geld. Kinder leihen sich untereinander oder auch den Eltern Geld. Am Beispiel der Geldflüsse in der Familie kann außerdem der Aspekt der Verbindung zwischen verschiedenen Systemen verdeutlicht werden: So wird das Geld, das innerhalb der Familien fließt, dem System beispielsweise von Seiten der Arbeitgeber der Eltern zugeführt. Die Betriebe, in denen die Eltern arbeiten, sind auf diese Weise mit dem System Familie verknüpft. Schließlich lassen sich verknüpfte Systeme z. T. in Hierarchien einordnen. So sind in unserem Beispiel die beiden Systeme Familie und Betrieb in ein Wirtschaftssystem eingeordnet, das hierarchisch den beiden Systemen übergeordnet ist.

2.3.2 Beispiel: System Erde

Die Erde ist ein komplexes System mit stark vernetzten Elementen. Der erste Schritt der Systemanalyse ist auch in diesem Fall die Bestimmung der Systemgrenze und die Identifikation der für eine bestimmte Fragestellung relevanten Elemente.

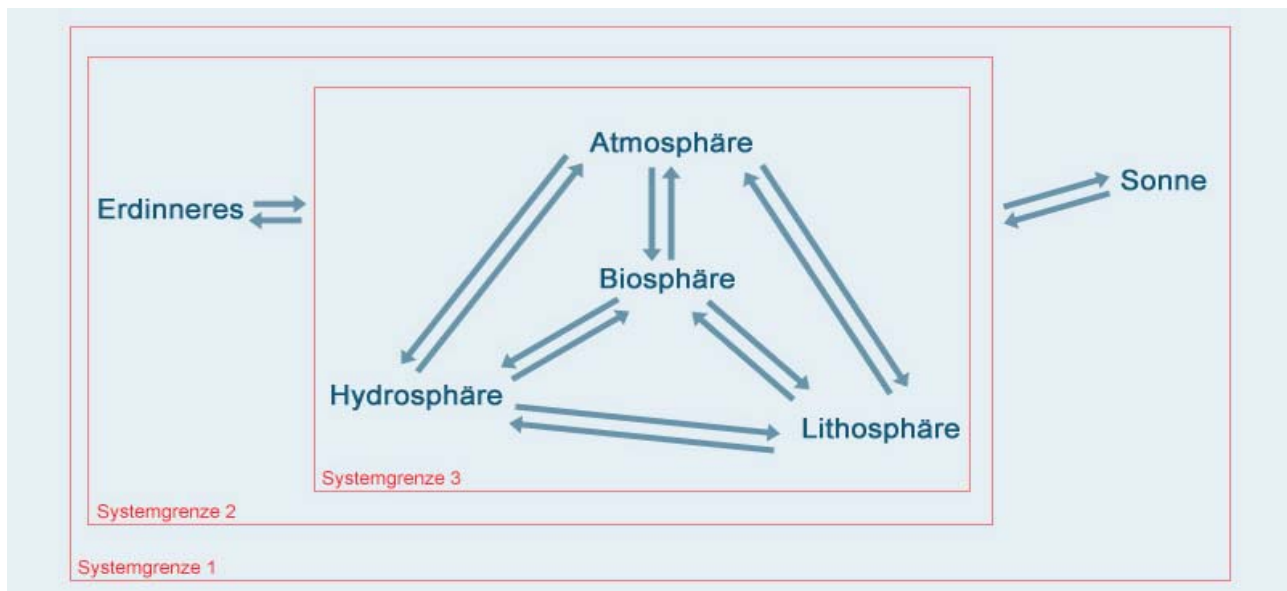


Abbildung 7: Unterschiedliche Systemgrenzen bei der Betrachtung der Erde. Die Pfeile repräsentieren die Beziehungen zwischen den Elementen Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre sowie Sonne und Erdinneres.

Beispielsweise kann man das System Erde selbst als Element des Sonnensystems betrachten. Dann wird als Systemgrenze die Grenze des Sonnensystems festgelegt (s. Abb. 7, Systemgrenze 1). Betrachtet man das System Erde ohne Bezug zur Sonne, so werden von der Systemgrenze Biosphäre, Hydrosphäre, Atmosphäre, Lithosphäre und Erdinneres eingeschlossen (s. Abb. 7, Systemgrenze 2). Beschränkt man sich in



der Betrachtung des Systems Erde allein auf das Zusammenspiel der vier genannten Sphären, so ergibt sich in Abbildung 7 die Systemgrenze 3.

Die Beziehungen zwischen den vier Sphären haben im Laufe der etwa 4,6 Milliarden Jahre andauernder Erdgeschichte das Erscheinungsbild der Erdoberfläche und die Bedingungen für das Leben permanent beeinflusst:

- In biogeochemischen Kreisläufen sind die Beziehungen u. a. durch Stoffflüsse gekennzeichnet. So werden im Kohlenstoffkreislauf die Wege von kohlenstoffhaltigen Molekülen bzw. Kohlenstoffatomen durch die verschiedenen Elemente des Systems Erde beschrieben (s. Modul „Kohlenstoffkreislauf“ und HLAWATSCH und VENKE 2002):
 - Im Meerwasser gelöste Kohlenstoffverbindungen werden durch Tiere aufgenommen und zu Kalkschalen verarbeitet.
 - Nach dem Absterben sinken die Schalen zu Boden und versteinern.
 - Durch die Plattentektonik gelangen diese Versteinerungen wieder an die Erdoberfläche,
 - gehen im Zuge der chemischen Verwitterung in Lösung,
 - und die gelösten Kohlenstoffverbindungen gelangen wieder über die Flüsse ins Meer.
- Von Flussbeziehungen lassen sich Wirkungsbeziehungen unterscheiden. Ein Beispiel für eine Wirkung ist die Verstärkung des (natürlichen) Treibhauseffektes durch Kohlenstoffdioxid.
- Die Plattentektonik und die Verwitterung werden durch Energieflüsse angetrieben, die nicht im Zusammenhang mit den vier Sphären stehen. Deshalb bezeichnet man das System Erde als offenes System. Zwei große Energieflüsse prägen es:
 - Im Erdinneren entstehen durch radioaktiven Zerfall und Kondensation flüssigen Materials am inneren Erdkern sehr große Mengen an Wärme (endogene Energie). Die Energie wird nach außen transportiert. Dabei fließt etwa gleich viel Energie in Richtung Erdoberfläche, wie im Erdinneren nachgebildet wird (Fließgleichgewicht). Durch den Energiefluss entstehen Wärmeausgleichs- oder Konvektionsströme im Erdmantel. Diese Konvektionsströme werden als Motor der Plattentektonik (endogene Prozesse) angesehen.
 - Der andere große Energiestrom kommt von der Sonne (exogene Energie). Die Erde erhält aber nicht nur eine große Menge Energie durch die Sonneneinstrahlung, sondern gibt selbst Strahlungsenergie ab. Durch die Sonneneinstrahlung, die an verschiedenen Orten unterschiedlich stark einfällt, werden starke Temperaturdifferenzen zwischen den warmen Tropen und den kalten polaren Regionen aufrechterhalten. Die Temperaturdifferenzen treiben wiederum Ausgleichströme in der Atmosphäre und im Ozean an, die man als gewaltige Windsysteme und Meeresströme kennt. Wind und Wasser formen die Erdoberfläche durch Erosion, Transport und Ablagerung (exogene Prozesse).

Dieser winzige Ausschnitt aus dem Beziehungsgeflecht im System Erde soll verdeutlichen, dass eine kleine Veränderung in einem Teilbereich einer Sphäre Auswirkungen auf alle anderen Sphären haben kann.



2.3.3 Wie kann man Systeme darstellen?

Darstellungen von Systemen geben die Struktur, d. h. die Elemente und die Beziehungen zwischen diesen Elementen, wieder. Systeme können z. B. durch Anschauungsobjekte, Grafiken oder mathematische Formeln dargestellt werden. Jede dieser Darstellungsformen stellt einen spezifischen Aspekt des Systems heraus. Die Wahl der geeigneten Darstellungsform hängt von dem Ziel ab, das mit der Analyse eines Systems verfolgt wird.

Eine wesentliche Rolle spielen grafische Systemdarstellungen (Fluss- und Wirkungsdiagramme). Diese Darstellungsformen sind in besonderer Weise geeignet, die spezifische Struktur komplexer Systeme wiederzugeben.

Flussdiagramme geben an, wie Stoffe oder Energie in einem System fließen oder umgewandelt werden. Die Flüsse zwischen Systemelementen werden durch Pfeile dargestellt. Die Pfeile geben an, in welche Richtung die Flüsse oder Umwandlungen erfolgen. Diese können qualitativ oder quantitativ dargestellt werden. Von besonderem Interesse für die Geowissenschaften sind biogeochemische Stoffkreisläufe (s. Modul „Kohlenstoffkreislauf“ und „Wasserkreislauf und Trinkwasserschutz“).

- **In qualitativer Hinsicht** haben die Pfeile die Bedeutung „fließt in Richtung ...“, „wird umgewandelt zu ...“ (s. Abb. 8).
- **Bei einer quantitativen Darstellung** werden Systemelementen spezielle Systemgrößen, so genannte Zustandsgrößen (s. Abschnitt 2.3.4 „Zustand eines Systems“), zugeordnet. Sie dienen dazu, Aussagen über den Zustand des Systems zu treffen.

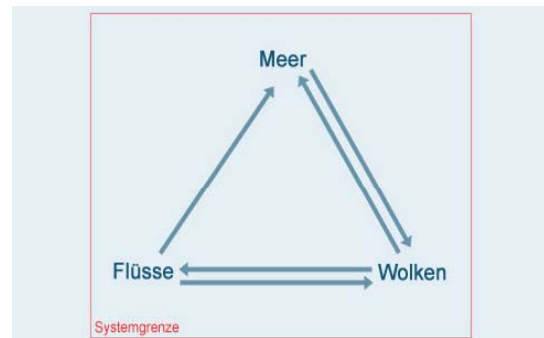


Abbildung 8: Dieser Ausschnitt aus dem Wasserkreislauf ist ein Beispiel für ein qualitatives Stoffflussdiagramm: Wassermoleküle aus dem Meer oder den Flüssen werden durch Verdunstung und Kondensation Bestandteil der Wolken und gelangen über den Niederschlag wieder in das Meer und in die Flüsse.

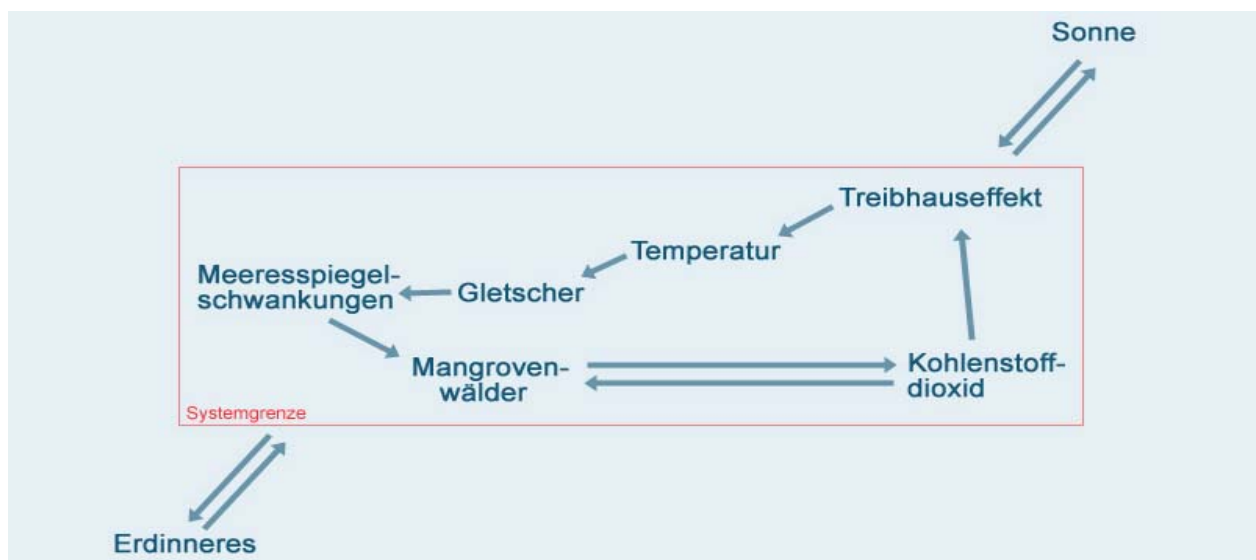
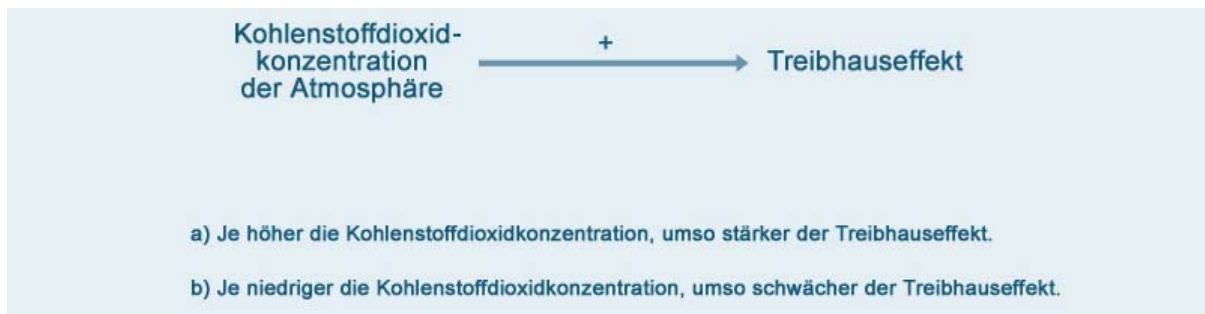


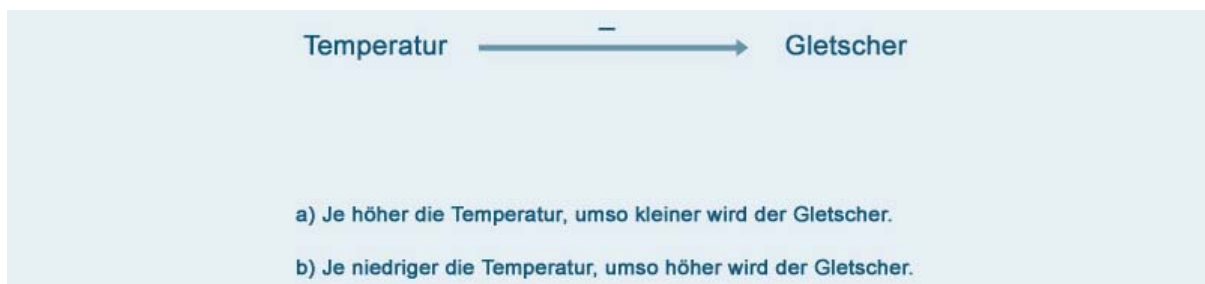
Abbildung 9: Dieser Ausschnitt des Klimasystems ist ein Beispiel für ein qualitatives Wirkungsdiagramm: Mangroven wirken auf die Kohlenstoffdioxidkonzentration in der Atmosphäre, welche den Treibhauseffekt und damit die Temperatur in der erdnahen Atmosphäre beeinflusst. Die Temperatur wirkt auf das Schmelzen bzw. Wachsen der Gletscher, was wiederum den Meeresspiegel beeinflusst.

Wirkungsdiagramme bilden die Wirkungsbeziehungen (kausale Beziehungen) zwischen Systemelementen durch Pfeile ab. Sie verlaufen in die Richtung der Wirkung und können ebenfalls qualitativ und quantitativ dargestellt werden:

- **In qualitativer Hinsicht** haben die Pfeile die Bedeutung „wirkt auf“. Von besonderem Interesse für die Geowissenschaften sind die Wirkungen der einzelnen Komponenten in den biogeochemischen Kreisläufen. Das Wirkungsdiagramm in Abbildung 9 zeigt qualitativ exemplarische Wirkungen einzelner Elemente aus dem Klimasystem.
- **Bei der quantitativen Darstellung** werden Systemelementen wieder Zustandsgrößen zugeordnet (siehe 2.3.4). Die Korrelationen zwischen zwei Systemgrößen können positiv oder negativ sein:
 - Positive Korrelationen werden durch Pfeile dargestellt, die mit einem „+“ versehen sind. Sie stehen für „je mehr ... , umso mehr ...“ und „je weniger ... , umso weniger ...“.



- Negative Korrelationen werden durch Pfeile dargestellt, die mit einem „-“ versehen sind. Sie stehen für „je mehr ..., desto weniger ...“ und „je weniger ..., desto mehr ...“. Sie werden daher auch als gegensinnige Korrelationen bezeichnet (zur Darstellung im Pfeildiagramm s. BAYRHUBER und SCHAEFER 1978).



Mathematische Darstellungsformen von Systemen erfolgen durch Gleichungen. Sie basieren auf Notationsregeln der mathematischen Fachsprache. Gleichungssysteme spiegeln die Prozesseigenschaften eines Systems wieder. Hierfür ist eine genaue Kenntnis der Zustandsgrößen notwendig, die oftmals nur aus der Forschung im Rahmen geowissenschaftlicher Großprojekte resultieren kann. Diese Darstellungsform stellt die Basis von computergestützten Modellen dar.

2.3.4 Zustand eines Systems

Der Zustand eines Systems wird durch Zustandsgrößen (z. B. Volumen, Masse, Energie) beschrieben. Eine einzelne Zustandsgröße beschreibt den Zustand eines Systemelements. Beispiel: Das System enthält 25 Liter Wasser. In diesem Fall wird das Element Wasser durch die Zustandsgröße Volumen beschrieben. Weil das Wasser ein gespeicherter Stoff ist, wird die Zustandsgröße Volumen auch Speichergröße genannt. Zu-

standsgrößen haben Mengeneinheiten, z. B. die Einheit Liter (l), Kilogramm (kg) oder Kilojoule (kJ). Zustandsgrößen beziehen sich auf einen bestimmten Zeitpunkt. Zum Beispiel enthält eine Badewanne (Speicher) zu verschiedenen Zeitpunkten unterschiedliche Volumina Wasser.

3 Didaktische Information

3.1 Lernziele

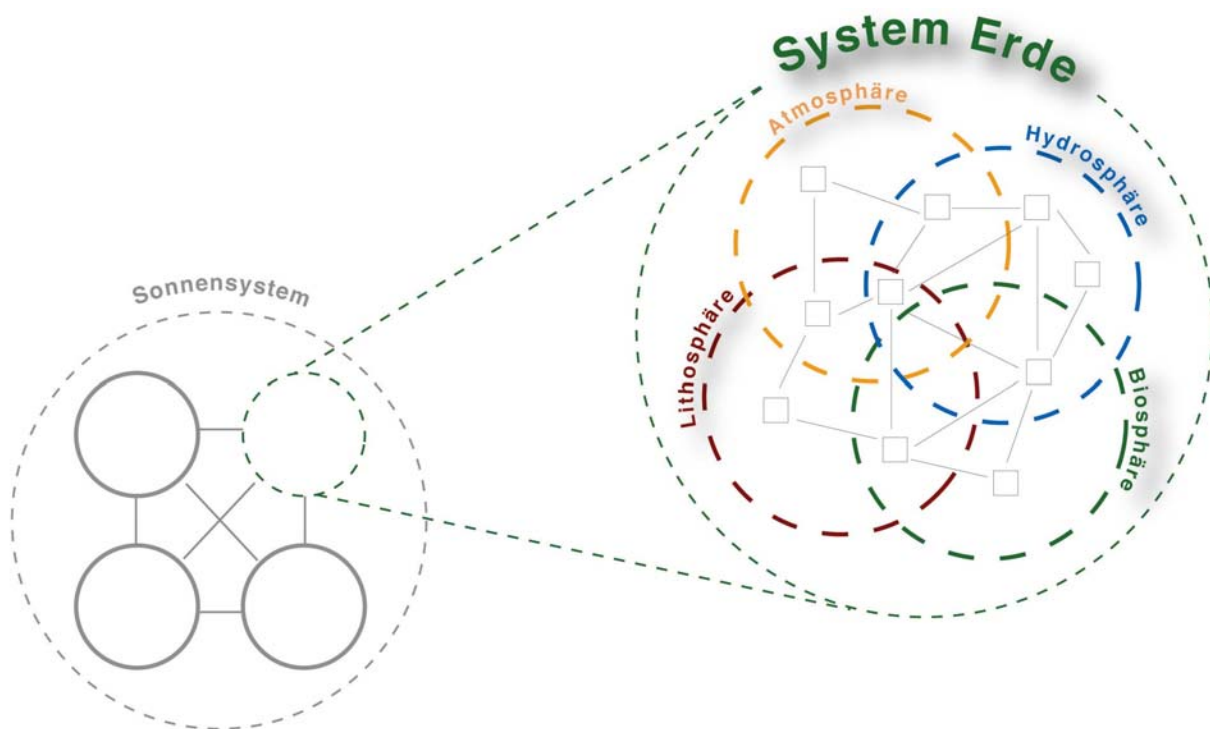


Abbildung 10: Das Modul „System Erde – Die Grundlagen“ liefert sowohl Informationen über das komplexe Gesamtsystem Erde mit den vier Sphären als übergeordnete Teilsysteme als auch über die systemtheoretischen Grundlagen des Konzeptes "Forschungsdialog: System Erde.

Das System Erde mit den Teilsystemen Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre soll in Grundzügen erarbeitet werden (s. Abb. 10). Die Schüler/innen sollen dabei auch ein grundlegendes Verständnis der Begriffe System und Modell erwerben, sodass sie diese Konzepte im weiteren Unterrichtsverlauf in verschiedenen inhaltlichen Zusammensetzungen anwenden können. Im Hinblick auf das System Erde sollen die Lernenden im Einzelnen erkennen, dass

- die vier Teilsysteme Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre Elemente dieses Systems darstellen, die sich stofflich voneinander unterscheiden, dynamischen Veränderungen unterliegen und sich gegenseitig beeinflussen;
- der Mensch Element des Systems Erde ist und dessen weitere Entwicklung beeinflusst.

Außerdem sollen sie

- einzelne Phänomene als dem größeren System Erde zugehörig erkennen;

- sinnvolle Teilsysteme des Gesamtsystems isolieren können, ohne den Gesamtzusammenhang außer Acht zu lassen;
- wissen, dass aufgrund der Kenntnis der Veränderungen einzelner Systemelemente die Entwicklung von Szenarien der weiteren Entwicklung des Systems Erde möglich ist;
- wissen, dass Systeme durch Modelle beschrieben werden;
- Systemmodelle durch Fluss- und Wirkungsdiagramme darstellen können;
- wissen, dass Systemgrenzen und die Entwicklung von Systemmodellen vom Betrachter abhängig sind.

3.2 Lernvoraussetzungen

Keine

3.3 Hinweise zur horizontalen und vertikalen Verknüpfung der Inhalte

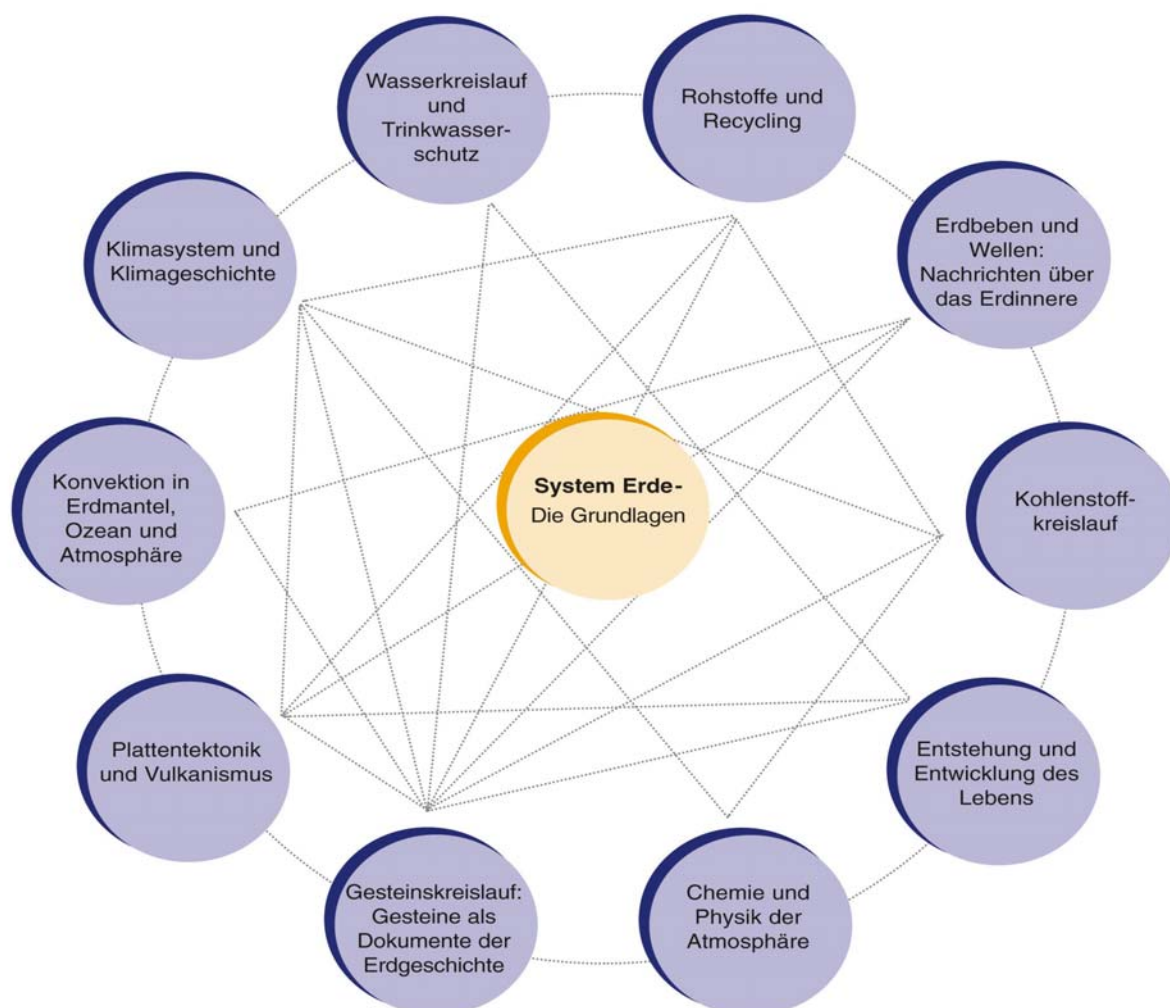


Abbildung 11: Modulübersicht des Projektes „Forschungsdialg System Erde“. Die Sachanalysen der Module sind auf der CD-ROM "System Erde" in Form von Hypertexten miteinander vernetzt, um die Beziehungen der Fachinhalte für den Biologie-, Chemie-, Geographie- und Physikunterricht im geowissenschaftlichen Kontext zu verdeutlichen.



Die **systemtheoretischen** und geowissenschaftlichen Grundlagen für das Verständnis des Systems Erde und seiner Erforschung werden in dem vorliegenden Modul dargestellt. Die Inhalte sind interdisziplinär und basal. Sie legen die Grundlage für eine Verknüpfung von Inhalten aus verschiedenen Fächern, u. a. der Biologie, Chemie, Geographie und Physik im darauf folgenden Unterricht (s. Abb. 11).

3.4 Erläuterung und Nutzungshinweise zu den Materialien

Die Materialien werden zwei Bausteinen zugeordnet. Diese Bausteine enthalten auch Lesetexte, die aus den Sachanalysen zusammengestellt wurden.

Der vollständige Begleittext steht auf der CD-ROM „System Erde“ zunächst nur Lehrkräften zur Verfügung. Für die Schüler/innen kann eine gesonderte CD-ROM gebrannt werden, sodass sie damit am Computer arbeiten können. Diese Schülerversion umfasst die gleichen Inhalte und den gleichen Funktionsumfang, enthält aber keine didaktischen Informationen und Lösungsbögen. Sie kann erstellt werden, indem Sie auf der Startseite der CD-ROM „System Erde“ auf „Version für Schülerinnen und Schüler erstellen“ klicken. Dort folgen Sie den Anweisungen. Alternativ können die Sachanalysen über die Funktionen „kopieren“ und „einfügen“ in einem Textverarbeitungsprogramm weiter verarbeitet werden.

Für die Bausteine stehen die im Kapitel 6 aufgeführten Materialien zur Verfügung. Bei dem Material 1 handelt es sich jeweils um Informationen für die Lehrkraft.

Anhand von **Baustein 1 „Einführung in das Systemkonzept“** (etwa 1 Unterrichtsstunde) (Material 1) soll mit Hilfe eines Foliensatzes (Modul 1, Baustein 1, Material 2) und durch Arbeitsbögen (Modul 1, Baustein 1, Materialien 3 und 4) in den Systembegriff eingeführt werden.

Mit dem **Baustein 2 „Die Erde als System“** (etwa 7 Unterrichtsstunden) (Material 1) sollen Lernende Begriffslandkarten (Concept-Maps) erstellen, die dazu dienen, ihre im Alltag und im Fachunterricht erworbenen Vorstellungen vom System Erde abzubilden. Die Schüler/innen sammeln Begriffe, die ihnen zu „System Erde“ einfallen und erstellen in Gruppenarbeit eine Begriffslandkarte. Hierfür steht eine Schülerinformation zur Verfügung (Modul 1, Baustein 2, Material 2). Ein Mitglied jeder Gruppe stellt das Ergebnis vor. Darauf aufbauend wird das Gesamtsystem Erde mit den wichtigsten Teilsystemen in den Blick der Schüler/innen gerückt: Eine Computeranimation (Modul 1, Baustein 2, Material 6) führt in die Erde als System ein und ein anschließendes computergestütztes Quiz veranschaulicht die Meilensteine der Erdgeschichte (Modul 1, Baustein 2, Material 4). Sie dient der Ergänzung, Überprüfung und Festigung des neu erlernten Wissens. Danach erhalten die Schüler/innen die Gelegenheit weitere Begriffe in ihren Begriffslandkarten zu ergänzen. Abschließend wird auf der Basis der Begriffslandkarten in die Methode der Systemanalyse eingeführt. Die Lernenden erhalten dazu einen Informationsbogen (Modul 1, Baustein 2, Material 3), ordnen die Assoziationen ihrer eigenen Begriffslandkarten den Teilsystemen (Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre) zu und identifizieren Wirkungen und Flüsse. Für die Ergebnissicherung stehen die in Material 5 (Modul 1, Baustein 2) aufgeführten Fragen zur Verfügung. Auf die Nutzung des Begleittextes in diesem Zusammenhang wurde bereits oben hingewiesen.

Für den hier geschilderten Einstieg in das Unterrichtskonzept „Forschungsdialo: System Erde“ sind je nach Lerngruppe 4 - 6 Unterrichtsstunden notwendig. Da von dieser Aufgabe sowohl der Geographie-, Biologie-, Chemie- und Physikunterricht als auch Fächer wie Wirtschaft oder Politik profitieren, empfiehlt es sich, diese Fächer in einer Woche zusammenzulegen oder einen Projekttag zu nutzen. Die Schüler/innen sollen anschließend die Gelegenheit erhalten, in Einzelarbeit ihr eigenes Systemmodell zu erstellen.



Jede/r Schüler/in soll einen „System Erde“ Ordner anlegen, in dem alle Unterlagen, die sie im Zusammenhang mit Unterricht nach dem Konzept „Forschungsdilog: System Erde“ in den beteiligten Fächern Biologie, Chemie, Geographie und Physik erhalten bzw. erarbeiten, gesammelt werden.

Für das selbstständige Arbeiten mit der CD-ROM „System Erde“ wurde die Interaktion „Zeichentool“ (Modul 1, Baustein 2, Material 8) entwickelt, mit der Stofffluss- und Wirkungsdiagramme erstellt werden können. Diese Interaktion befindet sich jeweils unten rechts unter den Vorschau Bildern und wurde auch in alle anderen Interaktionen integriert. Insbesondere Schüler/innen, die bereits Vorwissen zum Thema „System Erde“ aufweisen, profitieren von der Nutzung dieses Tools.

4 Vorschläge für den Unterrichtsverlauf

Der Unterricht nach dem Konzept „Forschungsdilog: System Erde“ kann in drei Phasen erfolgen, die sich über mehrere Schuljahre erstrecken und die im Folgenden beschrieben werden.

Das Modul „System Erde – Die Grundlagen“ (insbesondere der Baustein 2) umfasst die **erste Phase**. Die Schüler/innen werden grundlegend in die Systemanalyse und in die Meilensteine der Erdentwicklung eingeführt. Das neu erlernte Wissen kann danach durch die Materialien der anderen Module angewendet und vertieft werden. In dieser ersten Phase werden Wissens- und Verständnislücken aufgedeckt, die anhand der in den weiteren Modulen enthaltenen Materialien geschlossen werden können.

In der **zweiten Phase** werden vertiefte Kenntnisse z. B. über den Aufbau des Erdinneren oder der Erdatmosphäre, Prozesse des Material- und Energietransportes, die Plattentektonik und die Entstehung sowie Entwicklung des Lebens erworben.

Einige der Bausteine enthalten spezielle Materialien, mit denen die in der Einführungsphase erworbene Fähigkeit, Modelle vom System Erde bzw. den Teilsystemen zu erstellen, weiterentwickelt wird. Insbesondere werden die Schüler/innen angeleitet, Stofffluss- und Wirkungsdiagramme zu erarbeiten. Als Einstieg eignen sich die Themen „Wasserkreislauf“ und „Gesteinskreislauf“. Hierzu sollen Stoffflussdiagramme erstellt werden. Die Schüler/innen können ihre Kenntnisse am Beispiel des Themas „Kohlenstoffkreislauf“ vertiefen, indem sie erst ein Stoffflussdiagramm und anschließend ein Wirkungsdiagramm erstellen. So festigen die Schüler/innen ihre Kenntnisse über die Systemanalyse an zunehmend komplexer werdenden Wissensdomänen.

Um die Selbsttätigkeit der Schüler/innen anzuregen, ste-

Tabelle 1: Arbeitsformen des Moduls "System Erde – Die Grundlagen.

Arbeitsformen	Baustein	
	1	2
Mind Mapping		
Concept Mapping		•
Systemanalyse durchführen		•
Stoffflussdiagramm entwickeln		
Wirkungsdiagramm entwickeln		
beschreibendes Beobachten	•	•
kriterienbezogenes Vergleichen	•	•
Demonstrationsexperiment		
Schülerexperiment		
Recherche/ Informationsbeschaffung		
Texte erfassen und bearbeiten	•	•
Interviews mit Expert/innen		
an Exkursionen teilnehmen		
Gruppenarbeit		•
Stationsarbeit		
Gruppenpuzzle (Expertensystem)		
Projektarbeit		
Filme/ Animationen ansehen		•
Computerinteraktionen bearbeiten		•
Modellsimulationen bearbeiten		
Internet nutzen		
Texte verfassen		
Referate halten		•
Poster erstellen		•
Tabelle, Diagramm, Grafik etc. aus Daten erstellen bzw. interpretieren		
bewerten	•	



hen auch Materialien für eine arbeitsteilige Gruppenarbeit (Gruppenpuzzlemethode) zur Verfügung (Modul 3, Baustein 6; Modul 6, Baustein 3; Modul 8, Baustein 4; Modul 9, Baustein 1). Mithilfe der Gruppenpuzzlemethode soll ein Einstieg in die Projektmethode, die in der dritten Unterrichtsphase im Zentrum steht, erleichtert werden.

Zur Integration des neu erlernten Wissens sollen die Schüler/innen regelmäßig die Gelegenheit bekommen, sich zu vergegenwärtigen, welche Bedeutung die jeweils bearbeiteten Systeme für die Funktionsweise des Systems Erde haben. Die Schüler/innen lernen dadurch systematisch, aktiv und selbstständig im Fachunterricht erworbenes Wissen in ihr eigenes Systemmodell zu integrieren und dadurch für eine tiefergehende Erkenntnisgewinnung nutzbar zu machen.

Der Unterricht nach dem Konzept „Forschungsdialoq: System Erde“ sollte mit Schüler/innenprojekten abgeschlossen werden (**Phase 3**), durch die ein Modell vom Klimasystem (Wirkungsdiagramm) erstellt wird (Modul 10, Baustein 9). In Einzelarbeit befassen sich die Schüler/innen zunächst durch Literaturrecherche, Experteninterviews und anderen Methoden der Informationsbeschaffung intensiv mit einem Element des Klimasystems (u. a. Ozeane, Wasserstoffautos, regenerative Energien, Ökosteuer) unter den Gesichtspunkten einer nachhaltigen Entwicklung. Dabei werden ökologische, ökonomische und soziale Aspekte recherchiert und in einem etwa dreiseitigen Text zusammengefasst. Jeder Text soll auch Schlussfolgerungen zu Aspekten enthalten, die eine nachhaltige Entwicklung fördern. Auf der Basis dieser Texte soll die Klasse gemeinsam ein Wirkungsdiagramm erstellen. Dieses wird dann genutzt, um möglichst wirkungsvolle Maßnahmen für eine nachhaltige Entwicklung im Sinne der Agenda 21 zu identifizieren bzw. zu entwickeln. Dabei soll auch thematisiert werden, dass Modelle je nach Fragestellung ganz unterschiedlich aussehen können.

Diese Wirkungsdiagramme sind die Basis computergestützter Klimasystemmodelle. Ihre Kenntnis setzt die Schüler/innen schließlich in die Lage, Ergebnisse von Modellberechnungen zur Entwicklung des Planeten Erde nachzuvollziehen und zu bewerten.

5 Literatur

BAYRHUBER, H. und SCHÄFER, G. (1978): Kybernetische Biologie. Aulis Verlag, Köln

BOSEL, H. (1999): Allgemeine Systemtheorie und Kybernetik: Systemtheorie Dynamischer Systeme. In: Fränze, Müller & Schröder: Handbuch der Umweltwissenschaften. ecomed, München

ENGELN, H. (2000): Erste Zellen – echt oder vorgetäuscht. In: Spektrum der Wissenschaften, Band 8, S. 16 – 22

GEE, H. (2002): That's life? In: Nature, Band 416, S. 28

GEORGE, U. (1982): Geburt eines Ozeanes. Geo im Verlag Gruner und Jahr, Hamburg

HARJES, H.-P. und WALTER, R. (1999): Die Erde im Visier – Geowissenschaften an der Schwelle des 21. Jahrhundert. Springer, Berlin

HLAWATSCH, S. und VENKE, S. (2002): Schwermetalle in der Ostsee: Kupfer und Zink. In: Unterricht Chemie, 13, 2002, Nr. 72, S. 41 - 43

LAMB, S. und SINGTON, D. (2000): Die Erdgeschichte – Eine Spurensuche durch Jahrmillionen. Könenmann, Köln

O'CONNOR, J. und McDERMOTT, I. (2000): Systemisches Denken verstehen und nutzen - Die Lösung lauert überall. VAK Verlags GmbH, Freiburg



PRESS, F. und SIEVER, R. (1994): Allgemeine Geologie. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg

SCHERER, E., MÜNKER, C. und METZGER, K. (2001): Calibration of the Lutetium-Hafnium Clock. In: Science, Band 293, S. 683 – 687

STANLEY, S. M. (1994): Historische Geologie – eine Einführung in die Geschichte der Erde und des Lebens. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg

6 Unterrichtsmaterialien

Baustein 1: Einführung in das Systemkonzept



Material 1: Einführung in das Systemkonzept (Information)



Material 2: Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile (Foliensatz)



Material 3: Parabel von Robert O'NEILL und Mitarbeitern (1986) (Arbeitsbogen)



Material 4: Karikatur (Arbeitsbogen)

Baustein 2: Die Erde als System



Material 1: Die Erde als System (Information)



Material 2: Concept Mapping zum Begriff „System Erde“ (Information)



Material 3: Interpretation der Concept Maps im Hinblick auf die Systemtheorie (Information)



Material 4: Sphärenrallye (Interaktion, s. CD-ROM „System Erde“)



Material 5: Lernkontrolle: Systemkonzept (Arbeitsbogen)



Material 6: Sphären der Erde (Animation, s. CD-ROM „System Erde“)



Material 7: Meilensteine der Erdentwicklung (Information)



Material 8: Zeichentool (Interaktion, s. CD-ROM "System Erde")

Weitere Materialien

RIEDELSCHEIMER, T. (2001): **Andy Goldsworthy working with time: Rivers and Tides. Dokumentarfilm auf DVD oder VHS.** Der Land-Art-Künstler Andy Goldsworthy wurde weltweit bekannt durch seine faszinierenden Arbeiten mit Naturmaterialien – Eis, Steine, Blätter, Zweige, Wasser. Der Film dokumentiert seine Arbeit über einen längeren Zeitraum, das Entstehen und Vergehen seiner einzigartigen, oft kurzlebigen Werke. Der Film bietet einen künstlerischen Zugang zum System Erde. Dabei veranschaulicht er Wechselbeziehungen der übergeordneten Teilsysteme (Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre) aus einer – erdgeschichtlich gesehen – kurzfristigen Zeitskala.



Bezugsquelle: absolut MEDIEN, Boxhagener Straße 18, 10245 Berlin, Tel. 030-28539870. Internet: <http://www.absolutMedien.de>.

CASSEL-GINTZ, M. und HARENBERG, D. (2002): **Nr. 1 Syndrome des Globalen Wandels als Ansatz interdisziplinären Lernens in der Sekundarstufe. Ein Handbuch mit Basis und Hintergrundmaterial für Lehrerinnen und Lehrer.** Syndrome des Globalen Wandels – hinter dem etwas sperrigen Titel verbirgt sich ein interdisziplinäres Konzept, das den Anspruch erhebt, so unterschiedliche Phänomene wie beispielsweise Bodendegradation, Klimawandel, Technologietransfer, Migration oder auch steigendes Umweltbewusstsein in der Bevölkerung aufeinander zu beziehen und zu strukturieren. Ziel ist es typische Muster des globalen Wandels zu erkennen, neue Ergebnisse einzuordnen und unterschiedliche Handlungsmöglichkeiten besser beurteilen zu können. **Nr. 24 Unterricht zu den Syndromen des Globalen Wandels – Umsetzungsbeispiele für die Sekundarstufe I und II.** Veröffentlichungen aus der Reihe „Werkstattmaterialien“ des BLK-Programms "21" – Bildung für eine nachhaltige Entwicklung zum downloaden aus dem Internet.

Bezugsquelle: <http://www.blk21.de/index.php>

(Werkstattmaterialien: <http://www.blk21.de/index.php?page=42>).

BLK-Modellversuch „**Steigerung der Effizienz des mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts (SINUS und SINU-Transfer)**“. Das BLK-Modellversuchsprogramm startete im Schuljahr 1998/1999. Unter wissenschaftlicher Begleitung entwickelten Lehrerinnen und Lehrer ihre Unterrichtsmethodik eigenverantwortlich weiter. Vom Programmträger erhielten die Arbeitsgruppen vielfältige Unterstützungsangebote in Form von Fortbildungen, didaktischen Materialien, Handreichungen und unterrichtsbezogenen Anregungen. Diese Maßnahmen dienen in erster Linie dazu, didaktisches Problembewusstsein und die Wahrnehmung von Unterricht zu schärfen, und dazu, neue Vorgehensweisen auszuprobieren zu können. Auf einem zentralen Projektserver stehen **Materialien und Artikel** zum downloaden zur Verfügung.

Bezugsquelle: <http://www.sinus-transfer.de/> (Von der Startseite ausgehend auf Materialien/Naturwissenschaften/Artikel klicken – dort kann eine Gesamtliste abgerufen werden).

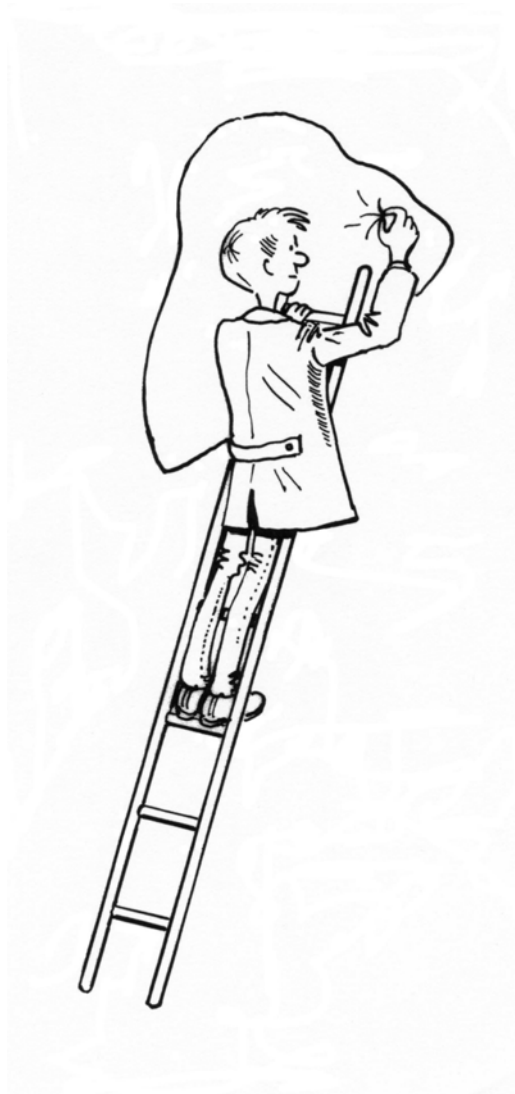
BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT, BMU (1997): Umweltpolitik: Agenda 21. **Dokumente der Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung im Juni 1992 in Rio de Janeiro.** Kann kostenlos – auch als Klassensatz – beim BMU bestellt werden.

Bezugsquelle: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Referat Öffentlichkeitsarbeit, 11055 Berlin, Tel. 01888-305-0, E-Mail: -oea-1000@BMU.de, Internet: www.bmu.de.

SCHÄTZING, Frank. (2004): Der Schwarm. **Roman**, der die Vorstellung von der Erde als Gesamtsystem anschaulich macht und dabei Einblicke in das Leben von Geowissenschaftler/innen bietet. Ein peruanischer Fischer verschwindet spurlos im Meer. Ein norwegisches Öl-Erschließungsteam stößt in 700 m Tiefe auf Milliarden unbekannter Würmer, die sich ins Methanhydrat fressen. Vor der kanadischen Pazifikküste wird ein Frachter durch massiven Muschelbefall manövrierunfähig, und Wale greifen die Schlepper an, die ihm zu Hilfe kommen. Bahnt sich eine Katastrophe an?

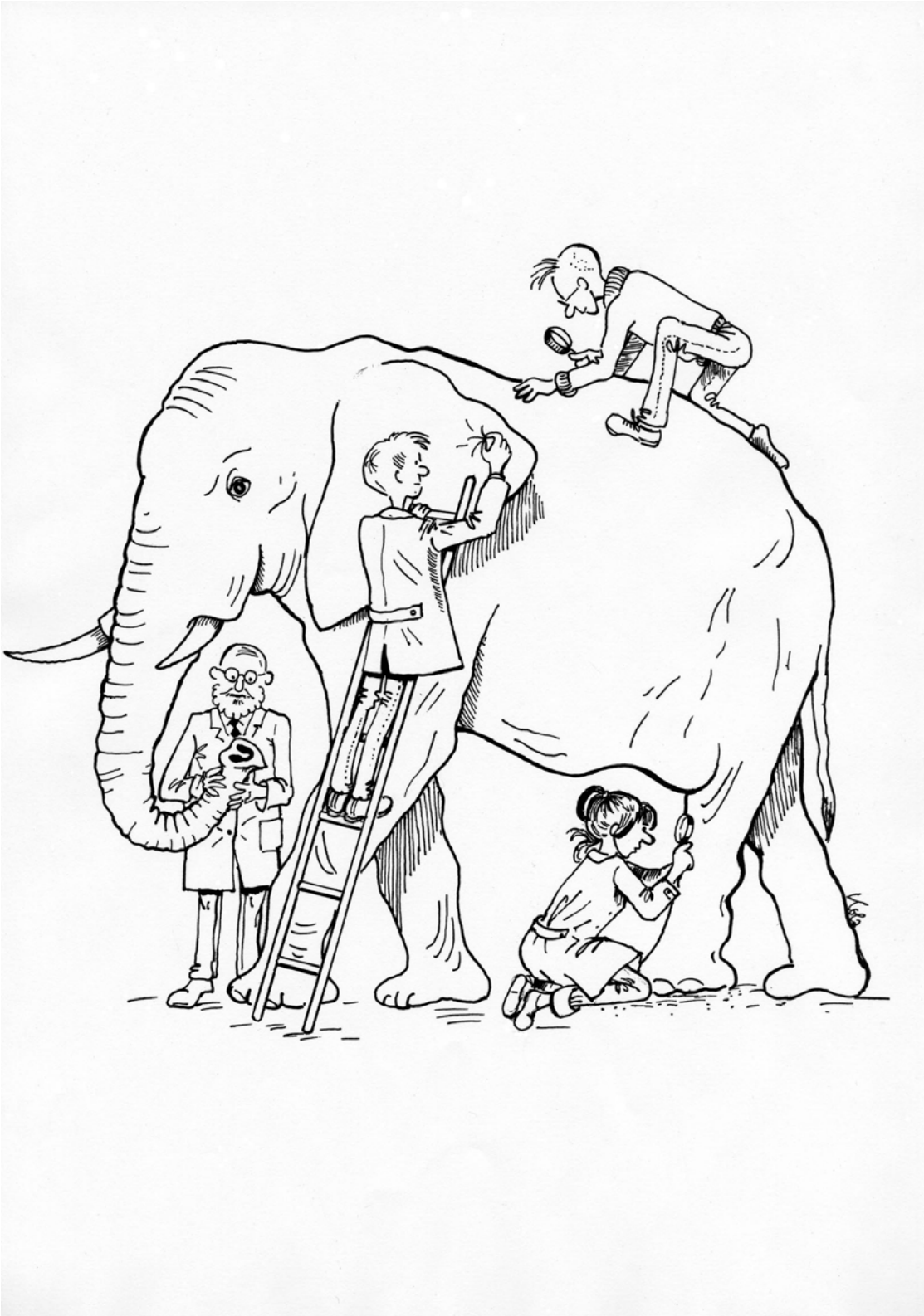
Bezugsquelle: Kiepenheuer & Witsch, Köln











Baustein 1: Einführung in das Systemkonzept

Parabel von Robert O'NEILL und Mitarbeiter (1986)

Im Jahre 1986 veröffentlichten Robert O'NEILL und Mitarbeiter folgende Parabel, um eine neue Herangehensweise an komplexe Systeme zu fordern:

„Man stelle sich vier Wissenschaftler vor, die sich die Aufgabe gestellt haben, anhand fein ausgeklügelter Instrumentarien bestimmte Forschungsobjekte sehr intensiv zu untersuchen: Sie bearbeiten verschiedene Körperteile eines Elefanten. Allerdings sind sie so sehr in die Einzelheiten ihres jeweiligen Forschungsgegenstandes vertieft, dass nur noch dieser Teil für sie interessant ist. Wenn wir nun zusätzlich davon ausgehen, dass ihnen der Elefant als Ganzheit nicht vorgestellt wurde, so werden sie nach einer langen Untersuchungszeit zu völlig verschiedenen Aussagen gelangen. Wissenschaftler A wird möglicherweise vermuten, es sich bei seinem Forschungsgegenstand um einen Feuerwehrschauch handelt, Wissenschaftler B, der sich dem rechten Ohr des Tieres gewidmet hat, wird es unter Umständen als einen Teppich interpretieren, und Wissenschaftler C verfasst einen Bericht über die Strukturen breiter Wände, während der letzte Kollege schließlich das Elefantenbein als typisches Beispiel für eine Säule interpretiert. Wenn sie nun ihre isolierten, reduktionistisch gewonnenen Einzelergebnisse auf das Gesamtsystem lediglich übertragen (extrapolieren), werden sie also zu völlig unterschiedlichen und widersprüchlichen Schlussfolgerungen gelangen. Aus den aufsummierten Einzelergebnissen kann keiner der beteiligten Forscher erkennen, dass es sich um einen Elefanten handelt.“

🕒 Aufgaben:

- 1) Interpretieren Sie die Parabel und formulieren Sie die Kernaussage!

- 2) Welche Forschungsansätze werden in der Parabel angesprochen? Beschreiben Sie die Methoden und diskutieren Sie ihre wissenschaftliche Bedeutung!

Baustein 1: Einführung in das Systemkonzept

Karikatur



Aufgaben:

- 1) Geben Sie Interpretationsmöglichkeiten für die Karikatur an!



- 2) Welche Forschungsansätze werden in der Karikatur angesprochen? Beschreiben Sie die Methoden und diskutieren Sie ihre wissenschaftliche Bedeutung!

Baustein 2: Die Erde als System

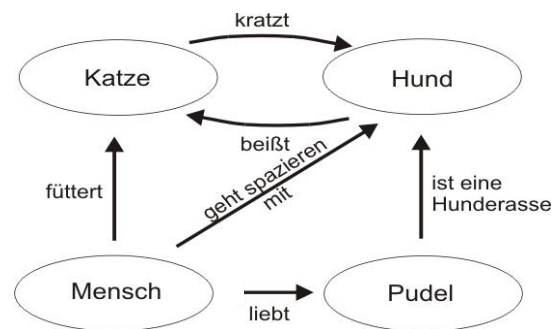
Concept Mapping zum Begriff „System Erde“

❶ Materialien:

- DIN-A5 Zettel und Schreibgerät
- Tafel und Kreide, alternativ Flip Chart
- gelbe Klebezettel und Edding

❷ Durchführung:

Zeichnen Sie, wie nach Ihrer Meinung Vorstellungen und Begriffe zu „System Erde“ in Beziehung zueinander stehen. Orientieren Sie sich an dem Beispiel der Beziehungen zwischen den Begriffen Katze, Hund, Pudel und Mensch. Berücksichtigen Sie, dass es verschiedene Möglichkeiten der Begriffszusammengehörigkeit gibt, die gleichzeitig „richtig“ sein können. So lassen sich mit den Begriffslandkarten die unterschiedlichen Vorstellungen der befragten Personen oder Personengruppen erfassen und miteinander vergleichen.



❸ Aufgabe:

1) Zeichnen Sie die Landkarte zum Begriff „System Erde“ in folgenden Schritten:

- Notieren Sie „System Erde“ als Leitbegriff auf der Mitte des Arbeitsbogens;
- Verteilen Sie Begriffe, die Sie zu "System Erde" notiert haben, auf diesem Arbeitsbogen um „System Erde“ herum. Legen Sie diejenigen enger zusammen, zwischen denen ein Zusammenhang besteht;
- Zeichnen Sie Linien mit Pfeilspitzen zwischen den Begriffen, um zu zeigen, wie diese miteinander in Beziehung stehen;
- Erläutern Sie durch eine kurze Notiz an den Verbindungslinien, worin die Beziehung zwischen den Begriffen besteht.

Hinweis: Es gibt nicht eine allein richtige Begriffslandkarte. Je nach Begriffsauswahl kommt es zu verschiedenen Ergebnissen.

Baustein 2: Die Erde als System

Interpretation der Concept Maps im Hinblick auf die Systemtheorie

❶ Was ist ein System?

Ein **System** besteht aus Elementen, die miteinander in Beziehungen stehen (Abb. 1). Systeme sind veränderlich. Blicken wir aus dem Fenster, sehen wir einen Ausschnitt des Systems Erde zu einem bestimmten Zeitpunkt, z. B. Bäume, Wolken und Gewässer. Es handelt sich um Elemente dieses Systems, die miteinander in Beziehung stehen: Bäume tauschen mit der Luft über Atmung und Fotosynthese Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid aus. Mit den Wurzeln nehmen sie Wasser auf und über die Blätter geben sie Wasserdampf ab. Der Blick zeigt eine Momentaufnahme aus einem Prozess der laufenden Änderungen des Systems: Bäume wachsen, die Luftbewegungen und die Wasserverfügbarkeit ändern sich ständig.

Bei Systemen ist es häufig sinnvoll, die Makro- und die Mikroebene zu unterscheiden: Unter der **Makroebene** versteht man das System als Ganzes (z. B. die ganze Erde), während als **Mikroebene** einzelne Systemelemente (z. B. die Sphären) bezeichnet werden. Die Zuordnung eines Systems zu einer solchen Ebene ist abhängig von der Fragestellung. So können z. B. die Wurzeln eines Baumes eine sinnvolle Makroebene bei der Betrachtung des Zusammenwirkens von Zellen bei der Wasser- bzw. Nährstoffaufnahme darstellen. Wurzeln müssen aber zur Mikroebene gezählt werden, wenn man den Wasserhaushalt des ganzen Baumes untersucht.

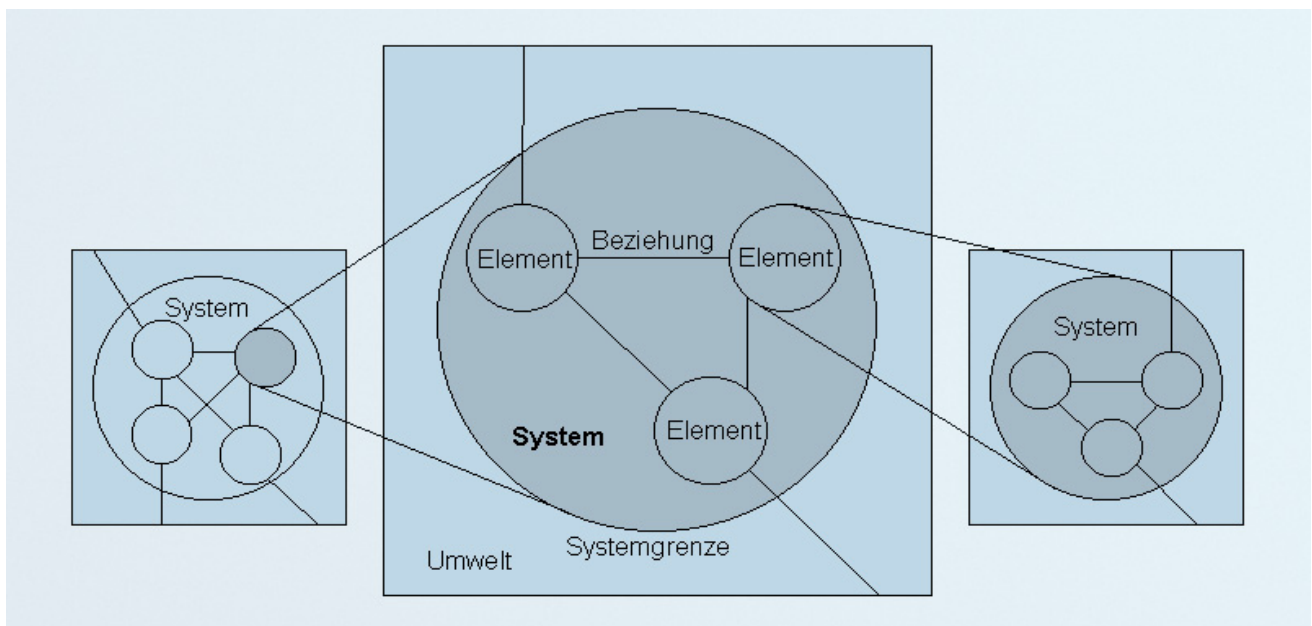


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Systems. Ein System existiert in einer Systemumwelt. Es besteht aus Elementen, die in bestimmten Beziehungen zueinander stehen. Eine Systemgrenze trennt das System von der Systemumwelt. Es gibt Beziehungen zwischen Elementen des Systems und Elementen der Systemumwelt (Input bzw. Output). Das in der Mitte dargestellte System liegt bezogen auf das links Dargestellte auf der Mikroebene, bezogen auf das System rechts aber auf der Makroebene.

Phänomene der **Selbstorganisation** zählen zu den möglichen unerwarteten Beobachtungen auf der Makroebene. So entstehen z. B. bei der Erwärmung einer Flüssigkeitsschicht auf dem Herd unter bestimmten Bedingungen spontan sechseckige Konvektionszellen (s. Modul „Konvektion in Erdmantel, Ozean und Atmo-

sphäre“). Dieses Phänomen kann man nicht über das Verhalten von einzelnen Molekülen der Flüssigkeit erklären. Man nimmt an, dass auch die Entstehung des Lebens ein solches Phänomen der Selbstorganisation ist.

② Systemanalyse:

Bei der **Systemanalyse** konstruiert der Systembetrachter ein Modell. Dieses bildet eine Auswahl von Elementen und Beziehungen des Systems ab, die für eine bestimmte Fragestellung relevant sind. Beispielsweise lässt ein **Plastikmodell** des Holzes eines Baumes nur Aussagen über die Struktur verschiedener Gewebe des Baumes und deren Lagebeziehungen zu, nicht aber über die Zellen, aus denen die Gewebe aufgebaut sind. Ein **Systemmodell** stellt damit ein begrenztes Abbild eines Originals dar. Es ist eine idealisierte und abstrahierte Darstellung, die Struktureigenschaften oder Funktionsweisen des Systems verständlich macht. Mit Hilfe eines Systemmodells lassen sich auch hypothetische Aussagen über Elemente und Beziehungen eines real vorhandenen Systems machen, die einer unmittelbaren Erforschung nicht oder noch nicht zugänglich sind. Dies galt z. B. für die Modellvorstellung der Plattentektonik, als es von ALFRED WEGENER entwickelt wurde. Die Aussagen dieser Modellvorstellung konnten später anhand von geologischen Befunden überprüft werden. Kommt es zu guten Übereinstimmungen mit empirischen Befunden, kann ein Modell zu Prognosen über die zukünftige Entwicklung von Systemen eingesetzt werden.

Eine Systemanalyse umfasst folgende Arbeitsschritte:

- Abgrenzung des Systems von der Systemumwelt;
- Identifizierung der (relevanten) Systemelemente;
- Identifizierung der (relevanten) Beziehungen (Wirkungen und Flüsse) zwischen den Elementen;
- Identifizierung der Systemeigenschaften;
- Identifizierung der Beziehungen des Systems zu anderen Systemen.

Die Ergebnisse der Analyse können in grafischer Form z. B. durch Concept Maps und/ oder Stofffluss- bzw. Wirkungsdiagramme dargestellt werden.

Diese Ergebnisse sind die Basis für eine Modellierung des Systems und für die Erarbeitung von Szenarien der zukünftigen Entwicklung. Bestimmte Modelle, z. B. der Klimaentwicklung, dienen als Basis für politische Entscheidungen.

③ Beispiel: Familie als System:

Am Beispiel des Systems Familie sollen die Schritte einer Systemanalyse verdeutlicht werden. Ein erster Schritt zur Analyse des Systems "Familie" ist die Identifikation der Systemgrenze und der relevanten Systemelemente. Der Blickwinkel, unter dem man dieses System betrachtet, bestimmt den Verlauf der Systemgrenze. Er legt weiterhin fest, welche Elemente als relevant angesehen werden. Steht beispielsweise die Kommunikation innerhalb der Familie im Mittelpunkt der Betrachtung, kommen alle Personen der Familie in Betracht, die miteinander reden. Dabei ist die Frage der verwandtschaftlichen Nähe nicht allein ausschlaggebend. So ist z. B. auch eine seit Jahren angestellte Haushälterin, die jeden Tag mit der Familie verbringt, hinsichtlich des Kriteriums Kommunikation ein relevantes Element des Systems Familie. Und sogar Haustiere können unter diesem Blickwinkel für die Funktion des Systems Familie als Kommunikationssystem



wichtig sein. Unter der Fragestellung „Erbschaft“ ist die Haushälterin normalerweise jedoch kein relevantes Element des Systems „Familie“. Umgekehrt gibt es vielleicht Familienmitglieder, die unter dem Aspekt der Kommunikation keine Rolle im System spielen, aber bei Fragen der Erbschaft zu relevanten Systemelementen werden. In einem weiteren Schritt der Systemanalyse geht es um die Identifikation relevanter Beziehungen. Zwischen den Elementen in dem komplexen und stark vernetzten System Familie gibt es eine Vielzahl von Wirkungsbeziehungen und sogar Stoffflussbeziehungen:

- Ein Beispiel für Wirkungsbeziehungen innerhalb des Systems „Familie“ ist das Stressverhalten. Beruflicher Stress der Eltern kann sich negativ auf das Wohlbefinden anderer Familienmitglieder auswirken. Andererseits kann die Gelassenheit der Kinder den Stress von Vater oder Mutter mindern, was wiederum das Wohlbefinden anderer Familienmitglieder steigern kann.
- Die Geldflüsse zwischen den Familienmitgliedern sind ein Beispiel für Stoffflüsse, die das System „Familie“ kennzeichnen. Geld kann von den Eltern auf die Kinder in Form von Taschengeld übergehen, die Großeltern geben den Kindern zusätzlich von Zeit zu Zeit Geld. Kinder leihen sich untereinander oder auch den Eltern Geld. Am Beispiel der Geldflüsse in der Familie kann außerdem der Aspekt der Verbindung zwischen verschiedenen Systemen verdeutlicht werden: So wird das Geld, das innerhalb der Familien fließt, dem System beispielsweise von Seiten der Arbeitgeber der Eltern zugeführt. Die Betriebe, in denen die Eltern arbeiten, sind auf diese Weise mit dem System Familie verknüpft. Schließlich lassen sich verknüpfte Systeme z. T. in Hierarchien einordnen. So sind in unserem Beispiel die beiden Systeme Familie und Betrieb in ein Wirtschaftssystem eingeordnet, das hierarchisch den beiden Systemen übergeordnet ist.

4 Wie kann man Systeme darstellen?

Darstellungen von Systemen geben die Struktur, d. h. die Elemente und die Beziehungen zwischen diesen Elementen, wieder. Systeme können z. B. durch Anschauungsobjekte, grafisch oder mathematisch dargestellt werden. Jede dieser Darstellungsformen stellt einen spezifischen Aspekt des Systems heraus. Die Wahl der geeigneten Darstellungsform hängt von dem Ziel ab, das mit der Analyse eines Systems verfolgt wird.

Eine wesentliche Rolle spielen grafische Systemdarstellungen (Fluss- und Wirkungsdiagramme). Diese Darstellungsformen sind in besonderer Weise geeignet, die spezifische Struktur komplexer Systeme wiederzugeben.

Flussdiagramme geben an, wie Stoffe oder Energie in einem System fließen oder umgewandelt werden. Die Flüsse zwischen Systemelementen werden durch Pfeile dargestellt. Die Pfeile geben an, in welche Richtung die Flüsse oder Umwandlungen erfolgen. Diese können qualitativ oder quantitativ dargestellt werden. Von besonderem Interesse für die Geowissenschaften sind biogeochemische Stoffkreisläufe.

- **In qualitativer Hinsicht** haben die Pfeile die Bedeutung „fließt in Richtung ...“, „wird umgewandelt zu ...“ (s. Abb. 2).

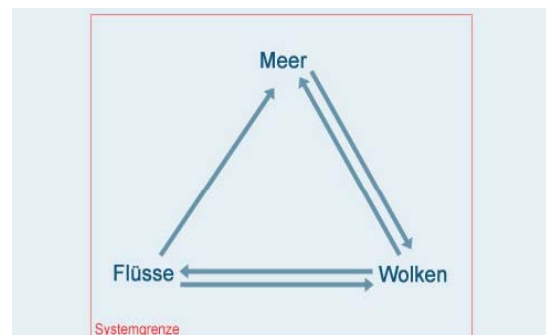


Abbildung 2: Dieser Ausschnitt aus dem Wasserkreislauf ist ein Beispiel für ein qualitatives Stoffflussdiagramm: Wassermoleküle aus dem Meer oder den Flüssen werden durch Verdunstung und Kondensation Bestandteil der Wolken und gelangen über den Niederschlag wieder in das Meer und in die Flüsse.

- Bei einer **quantitativen Darstellung** werden Systemelementen spezielle Systemgrößen, so genannte Zustandsgrößen, zugeordnet. Sie dienen dazu, Aussagen über den Zustand des Systems zu treffen.

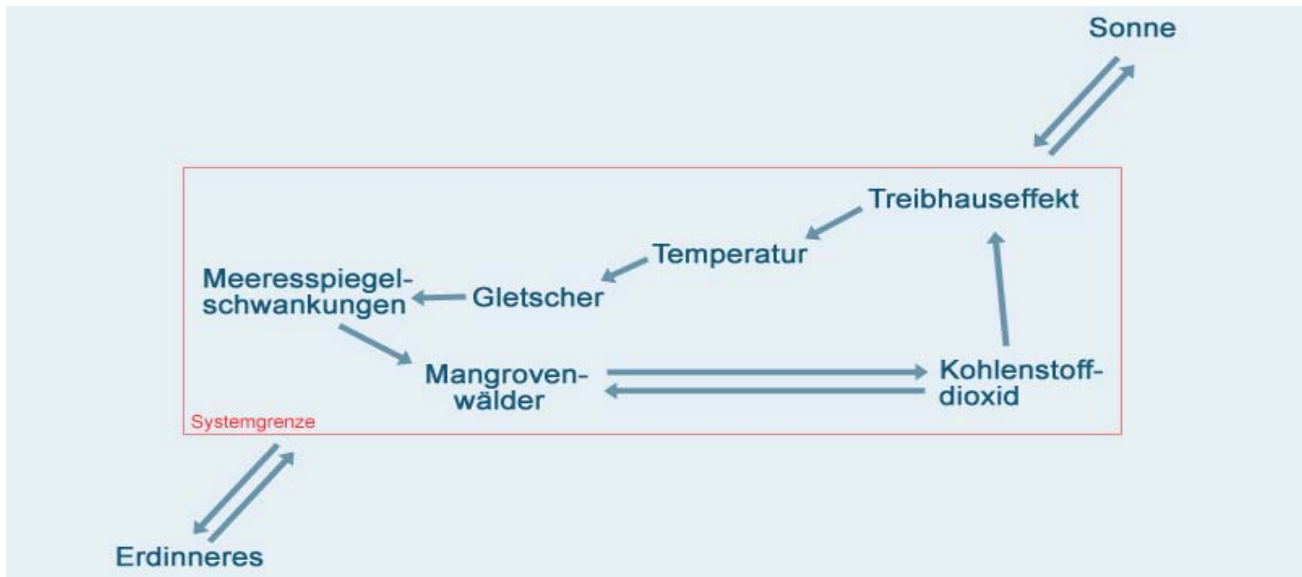
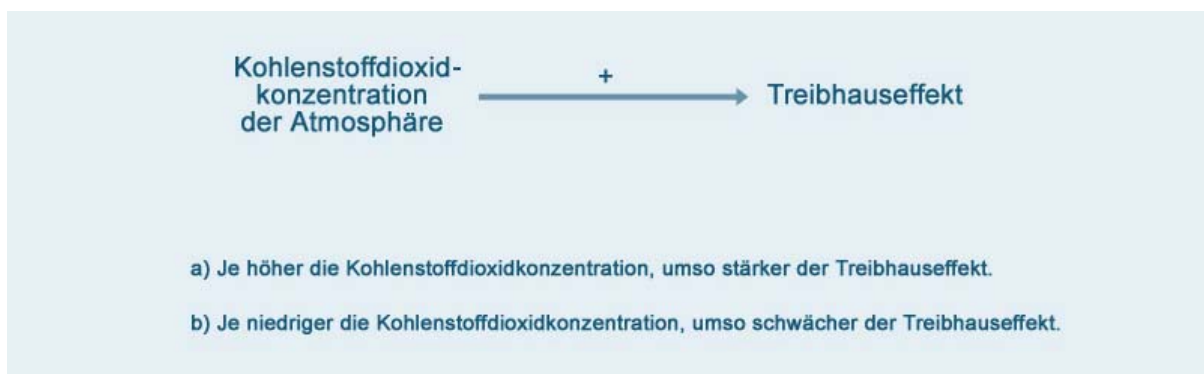


Abbildung 3: Dieser Ausschnitt des Klimasystems ist ein Beispiel für ein qualitatives Wirkungsdiagramm: Mangroven wirken auf die Kohlenstoffdioxidkonzentration in der Atmosphäre, welche den Treibhauseffekt und damit die Temperatur in der erdnahen Atmosphäre beeinflusst. Die Temperatur wirkt auf das Schmelzen bzw. Wachsen der Gletscher, was wiederum den Meeresspiegel beeinflusst.

Wirkungsdiagramme bilden die Wirkungsbeziehungen (kausale Beziehungen) zwischen Systemelementen durch Pfeile ab. Sie verlaufen in die Richtung der Wirkung und können ebenfalls qualitativ und quantitativ dargestellt werden:

- In **qualitativer Hinsicht** haben die Pfeile die Bedeutung „wirkt auf“. Von besonderem Interesse für die Geowissenschaften sind die Wirkungen der einzelnen Komponenten in den biogeochemischen Kreisläufen. Das Wirkungsdiagramm in Abbildung 3 zeigt qualitativ exemplarische Wirkungen einzelner Elemente aus dem Klimasystem.
- Bei der **quantitativen Darstellung** werden Systemelementen wieder Zustandsgrößen zugeordnet. Die Korrelationen zwischen zwei Systemgrößen können positiv oder negativ sein:
 - Positive Korrelationen werden durch Pfeile dargestellt, die mit einem „+“ versehen sind. Sie stehen für „je mehr ... , umso mehr ...“ und „je weniger ... , umso weniger ...“.



- Negative Korrelationen werden durch Pfeile dargestellt, die mit einem “-“ versehen sind, Sie stehen für „je mehr ..., desto weniger ...“ und „je weniger ..., desto mehr ...“. Sie werden daher auch als gegenseitige Korrelationen bezeichnet.

Temperatur $\xrightarrow{-}$ Gletscher

a) Je höher die Temperatur, umso kleiner wird der Gletscher.

b) Je niedriger die Temperatur, umso höher wird der Gletscher.

Mathematische Darstellungsformen von Systemen erfolgen durch Gleichungen. Sie basieren auf Notationsregeln der mathematischen Fachsprache. Gleichungssysteme spiegeln die Prozesseigenschaften eines Systems wieder. Hierfür ist eine genaue Kenntnis der Zustandsgrößen notwendig, die oftmals nur aus der Forschung im Rahmen geowissenschaftlicher Großprojekte resultieren kann. Diese Darstellungsform stellt die Basis von computergestützten Modellen dar.

5 Aufgaben:

- 1) Kennzeichnen Sie alle Begriffe in Ihrer Begriffslandkarte nach Zugehörigkeit zu den entsprechenden Sphären farblich.
- 2) Identifizieren Sie in Ihrer Begriffslandkarte je ein Beispiel für einen Stofffluss und für eine Wirkung, und erstellen Sie je ein Stofffluss- und ein Wirkungsdiagramm.

Baustein 2: Die Erde als System

Meilensteine der Erdentwicklung

① Meilensteine der Erdentwicklung

Eine langsam rotierende Wolke aus Staub und Gas - das war vermutlich der Ursprung unseres Planetensystems. Der Staub konzentrierte sich zu Materiewolken, die weit in den Weltraum hinausreichten. Indem sich Materie zusammenballte, entwickelten sich zunächst - vor etwa 5 Milliarden Jahren - die Sonne und etwas später die Planeten des Sonnensystems (s. Abb. 1). Unser Heimatplanet, die Erde, entstand vor 4,6 Milliarden Jahren. Wie entwickelte sich die Erde von damals weiter?

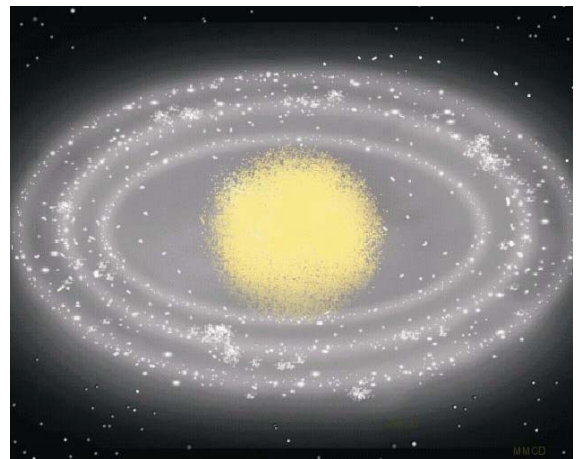


Abbildung 1: Das frühe Sonnensystem

Aufgrund ihrer Schwerkraft zog die Erde nach ihrer Entstehung zunächst eine sehr große Zahl von Meteoriten an, die sich frei im Sonnensystem bewegten. Diese gingen in dem unvorstellbar langen Zeitraum von 800 Millionen Jahren wie ein Hagelschauer auf die Erde nieder. Jeder Meteorit setzte beim Aufprall Wärmeenergie frei. Auch führte der radioaktive Zerfall von Elementen im Erdinneren wie in einem riesigen Kernkraftwerk zu einer Erwärmung. Die Erde wurde aus diesen Gründen immer heißer.

Aufgrund ihrer Schwerkraft zog die Erde nach ihrer Entstehung zunächst eine sehr große Zahl von Meteoriten an, die sich frei im Sonnensystem bewegten. Diese gingen in dem unvorstellbar langen Zeitraum von 800 Millionen Jahren wie ein Hagelschauer auf die Erde nieder. Jeder Meteorit setzte beim Aufprall Wärmeenergie frei. Auch führte der radioaktive Zerfall von Elementen im Erdinneren wie in einem riesigen Kernkraftwerk zu einer Erwärmung. Die Erde wurde aus diesen Gründen immer heißer.

Die frühe Erde war vermutlich homogen und hatte noch keine Kontinente und Ozeane. Mit zunehmender Erwärmung des Erdinneren schmolz die Erde teilweise auf und es kam zu einer Trennung der verschiedenen Bestandteile (s. Abb. 2). Eisen sank in den zentralen Bereich ab, und spezifisch leichteres Material stieg an die Oberfläche. Dadurch entstand vermutlich ein Ozean aus Magma, der die ganze Erde bedeckte.

Die Erde war nahezu von Anfang an von einer Gashölle, der Atmosphäre, umgeben. Soweit heute bekannt ist, bestand die **Uratmosphäre** hauptsächlich aus Stickstoff, Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf. Als der Meteoritenschauer vor etwa 3,8 Milliarden Jahren versiegte, kühlte die Erde wieder ab. Mit der Zeit bildeten sich die ersten Gesteine, und die Oberfläche erstarrte schließlich zu einer festen Kruste, Lithosphäre genannt. Der älteste Stein, den man bisher gefunden hat, stammt von der Südküste Grönlands. Er ist 3,75 Milliarden Jahre alt (LAMB und SINGTON 1998¹).

Nachdem die Erde weiter abgekühlt war, kondensierte Wasserdampf in der Atmosphäre. Die Wassertropfen fielen zu Boden und sammelten sich in den Senken der Erdkruste. Damals gingen sehr große Mengen Wasser in Wolkenbrüchen nieder. Die Wassermassen, welche heute die Hydrosphäre der Erde bilden, also die Ozeane, Flüsse, Seen, das Grundwasser und die Wolken, waren seinerzeit zum großen Teil als Wasserdampf in der Atmosphäre verteilt. Auch aus Gesteinen wurde Wasser freigesetzt.

So haben sich nacheinander mit der Atmosphäre, der Hydrosphäre und der Lithosphäre drei der vier übergeordneten Teilsysteme des Systems Erde entwickelt (s. Abb. 3). Als Lithosphäre bezeichnen wir die Erdkruste

¹ Die Quellen finden Sie im Literaturverzeichnis des Moduls „System Erde – Die Grundlagen“ auf der CD-ROM „System Erde“.

und einen Teil des oberen Erdmantels, die aus Gesteinen bestehen. Der Begriff Hydrosphäre beschreibt alle mit Wasser bedeckten Regionen wie Ozeane, Flüsse, Seen und auch das Grundwasser im Boden.

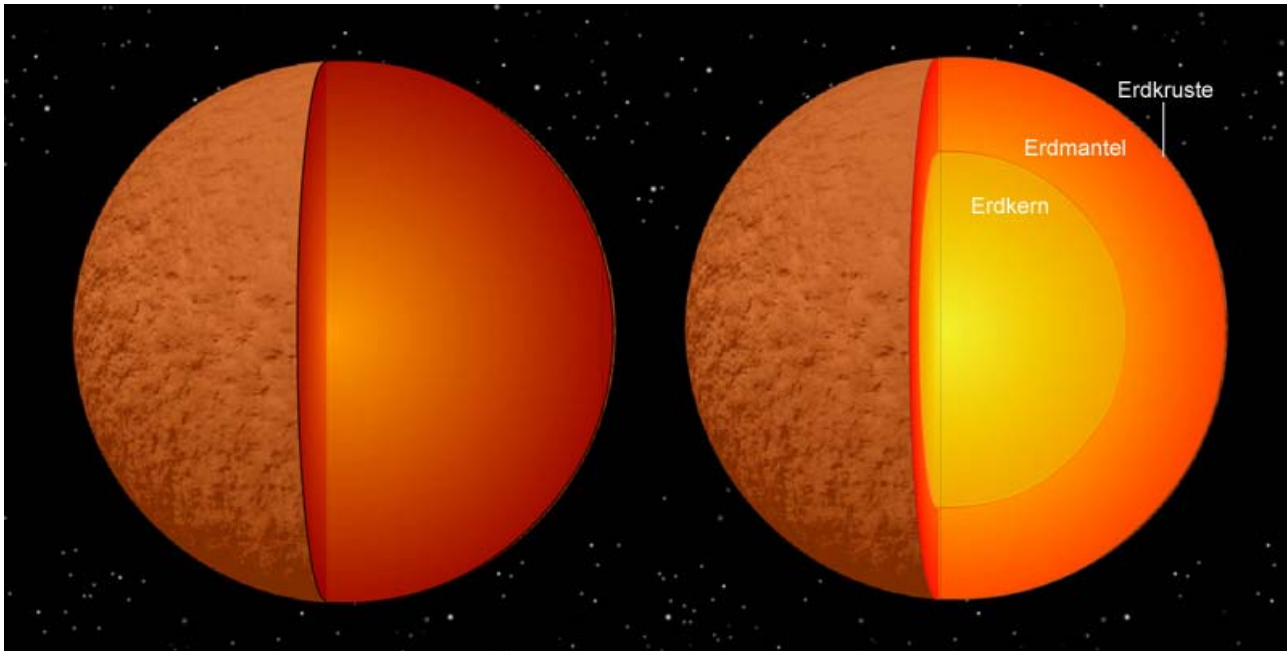


Abbildung 2: Die Erde bildete ihren Aufbau erst im Laufe der Erdgeschichte aus. Die linke Abbildung stellt die homogene Erde dar, während die rechte die spätere Erde mit Erdkern, Erdmantel und Erdkruste zeigt.

Die Gase der Atmosphäre lösten sich im Wasser. Deshalb entzogen die Ozeane der Atmosphäre von Anfang an auch Kohlenstoffdioxid. Im flachen Meer bildeten sich organische Verbindungen, z. B. Aminosäuren, kurze Eiweißketten und erste Molekülbausteine, die denjenigen heutiger Erbsubstanz ähneln (s. Abb. 4). Aus diesen bildeten sich Urzellen, die sich mit Membranen von der Umwelt abgrenzten. So entwickelte sich aus dem Zusammenspiel der Atmosphäre, der Hydrosphäre und der Lithosphäre die Biosphäre, die aus den bakterienartigen Archaea, Bakterien, Einzellern, Pilzen, Pflanzen und Tieren besteht.

Die wohl ältesten Versteinerungen von Organismen sind möglicherweise 3,5² Milliarden Jahre alt (STANLEY 1994). Diese Fossilien wurden von Lebewesen gebildet, die den heutigen Cyanobakterien in ihrer äußeren Erscheinung ähneln. Sie lebten im Meer und bildeten Strukturen, die Stromatolithe genannt werden.

Fossilien und andere Gesteine dienen in der Gegenwart als Schlüssel zum Verständnis dieser frühen Zeit. Noch 1,5 Milliarden Jahre später, also vor gut 2 Milliarden Jahren, existierten auf der Erde ausschließlich verschiedene Arten von Prokaryoten, die noch allesamt im Meer

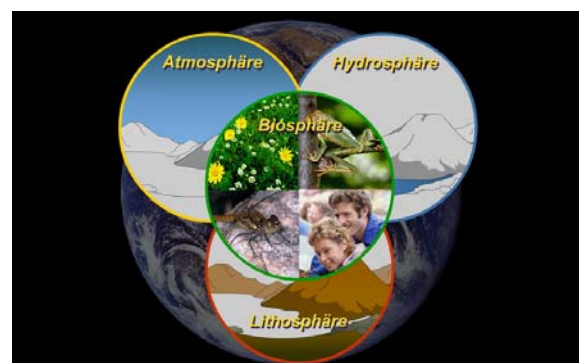


Abbildung 3: Die Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre sind die vier übergeordneten Teilsysteme des Systems Erde.

² Diese Zahl wird auch angezweifelt (siehe u. a. ENGELN 2000). Es wird aber als sicher angenommen, dass es vor 2,7 Milliarden Jahren Leben auf der Erde gab.

lebten. Es handelte sich um Archaea, bakterienartige Lebewesen.

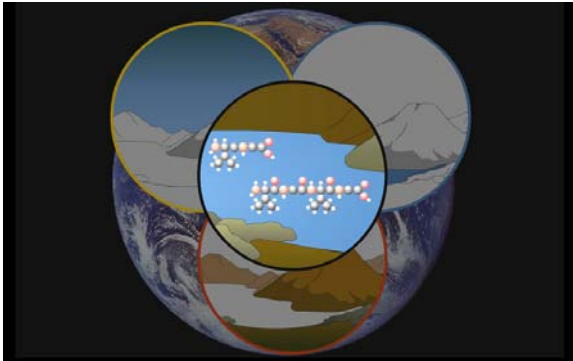


Abbildung 4: Die Biosphäre entstand aus dem Zusammenspiel von Atmosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre.

Von Bakterien wurde schließlich die Fotosynthese entwickelt, bei der Sauerstoff frei wird und die heute im Pflanzenreich weit verbreitet ist. Der Sauerstoff aus der Fotosynthese reagierte im Meerwasser sofort mit Eisenverbindungen zu rotem Eisenoxid. Zunächst gelangte er daher nicht in nennenswerten Mengen in die Atmosphäre. Da die meisten Eisenverbindungen bereits nach einiger Zeit im Meerwasser oxidiert waren, konnte sich Sauerstoff dort anreichern. Somit war die Voraussetzung für die Entwicklung der Zellatmung bei Lebewesen gegeben. Dabei wird durch Oxidation organischer Stoffe mit Sauerstoff Energie gewonnen. Einige Millionen Jahre lang wurde jedoch stets mehr Sauerstoff freigesetzt als durch Atmung oder andere

Sauerstoff zehrende Prozesse gebunden wurde. Der Sauerstoffgehalt der Atmosphäre nahm daher von etwa 0,2 % auf 21 % zu. Der Wert von 21 % stellte sich erst im Anschluss an das Auftreten der Landpflanzen vor gut 400 Millionen Jahren nach und nach ein.

Nachdem die Erde ihren schaligen Aufbau ausgebildet hatte, bestand sie aus dem Erdkern, dem Erdmantel und der Erdkruste. Vermutlich erst nach etwa 2 Milliarden Jahren setzten sich die Lithosphärenplatten in Bewegung. Sie drifteten auseinander, sodass riesige Ozeanbecken entstanden. Im weiteren Verlauf stießen Platten zusammen, und es falteten sich hohe Gebirge auf. Die Energie für diesen Prozess, der Plattentektonik genannt wird, liefert auch heute noch der Zerfall radioaktiver Elemente im Erdkern und im tiefen Erdmantel. Durch den Temperaturunterschied zwischen Erdinnerem und Erdoberfläche werden Konvektionsströme im Erdmantel und im Erdkern in Gang gesetzt.

Auch die Atmosphäre ist in ständiger Bewegung und Winde sowie Temperaturunterschiede im Ozean führen zu gewaltigen Meeresströmungen. Die Energie der Bewegungen in der Atmosphäre und Hydrosphäre stammt von der Sonne.