



System Erde – eine Einführung

S. Hlawatsch, H. Bayrhuber, M. Euler, K.-H. Hansen, K. Hildebrandt, E. R.
Lucius, N. Raack, F. Siemer, M. Thiele



Autorinnen und Autoren dieser Einheit:

S. Hlawatsch (Gesamtkonzeption, Sachanalyse, Concept Mapping, Sphärenrallye-Drehbuch, Didaktische Information, Erprobung, Koordination), K. Hildebrandt (Systemtheorie und Darstellungsmethoden), H. Bayrhuber (Sachanalyse, Systemtheorie, Sphärenrallye-Drehbuch), M. Euler (Didaktische Information), K.-H. Hansen (Concept Mapping), E. Lucius (Sphärenrallye-Drehbuch), F. Siemer (Sphärenrallye-Drehbuch), M. Thiele (Genese des Wissens, Interpretation der Concept Maps), N. Raack (Familie als System)

Fachwissenschaftliche Beratung

Prof. Dr. U. Kull (Universität Stuttgart)

Multimediaumsetzung, Grafik und Layout:

MMCD GmbH interactive in science (Düsseldorf),
A. Heidrich (IPN)

Herausgeber der Reihe:

H. Bayrhuber (IPN), M. Euler (IPN), W. Hassenpflug (Institut für Geographie, Universität Kiel), S. Hlawatsch (IPN), E. Lucius (IPN), F. Siemer (IPN)



Forschungsdialog: System Erde



(gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung)
Leibniz Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften
Olshausenstr. 62
24098 Kiel
Tel.: 0431-880-3129
E-mail: SysErde_Verwaltung@ipn.uni-kiel.de
<http://systemerde.ipn.uni-kiel.de>



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.....	8
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	16
3	Didaktische Information.....	16
3.1	Lernziele.....	16
3.2	Lernvoraussetzungen.....	17
3.3	Hinweise zur horizontalen und vertikalen Verknüpfung der Inhalte.....	17
3.4	Erläuterung und Nutzungshinweise zu den Materialien.....	17
5	Literatur	18
6	Übersicht der Unterrichtsmaterialien der Bausteine	19

Anhang:

Unterrichtsmaterialien

Baustein 1: Einführung in das Systemkonzept

Baustein 2: Die Erde als System



1 Allgemeine Zielsetzung und Begründung

Die Unterrichtseinheit "System Erde – Eine Einführung" 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 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. Für diese Einführung in das Systemkonzept stehen zwei Unterrichtsbausteine und Begleittext zur Verfügung. Der Unterricht ist zyklisch angelegt, so dass Phasen der Wiederholung, Erläuterung, Vertiefung und Anwendung grundlegender Konzepte aneinander anschließen.

Basis der geowissenschaftlichen Erforschung des Planeten Erde ist das interdisziplinäre Arbeiten. Deshalb greift die Einführungseinheit im Fachunterricht erworbenes Vorwissen der Schüler/innen auf und stellt dieses am Beispiel des Systems Erde in einen interdisziplinären Zusammenhang. Mit dem Systemkonzept lernen die Schüler/innen ein Hilfsmittel zur Strukturierung komplexer, stark vernetzter Inhalte kennen, das sie auch in anderen Wissensdomänen anwenden können.

2 Sachinformation

Das Kapitel "System Erde - Eine Einführung" 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 Energie aus dem Erdinneren und durch die Sonnenenergie.

Basis der geowissenschaftlichen Erforschung des Planeten Erde ist das interdisziplinäre Arbeiten. Deshalb werden Inhalte des Fachunterrichtes am Beispiel des Systems Erde in einen interdisziplinären Zusammenhang gestellt. Mit dem Systemkonzept erhalten die Schüler/innen ein Hilfsmittel zur Strukturierung von komplexen, stark vernetzten Inhalten, das auch in anderen Wissensdomänen angewendet werden kann.

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 Mrd. Jahren - die Sonne und etwas später die Planeten des Sonnensystems (Abb. 1) **[Modul Sonnensystem]**. 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

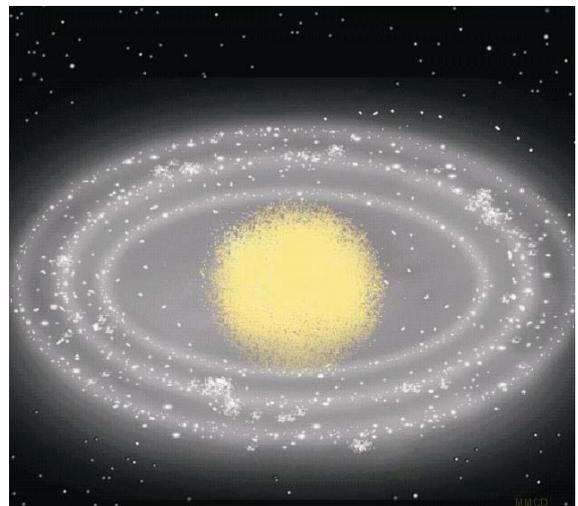


Abbildung 1: Das frühe Sonnensystem

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 weiteren 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 (Abb. 2). Eisen sank in den zentralen Bereich ab, und spezifisch leichteres Material stieg an die Oberfläche. Dadurch entstand ein Ozean aus Magma, der vermutlich die ganze Erde bedeckte.

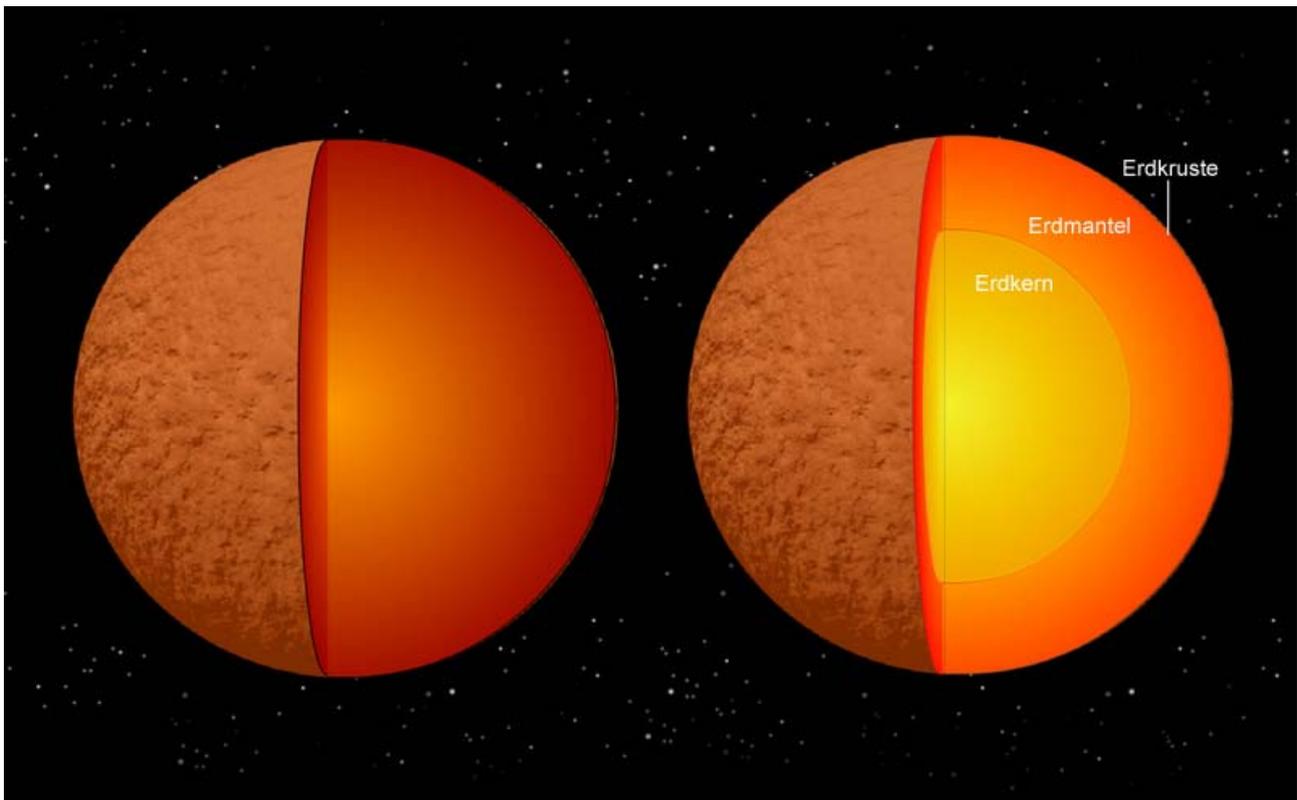


Abbildung 2: Die Erde bildete ihren Aufbau erst im Laufe der Erdgeschichte aus. Die linke Abbildung stellt die homogene Erde dar, während die rechte die Erde mit Erdkern, Erdmantel und Erdkruste zeigt.

Die Erde war nahezu von Anfang an von einer Gashölle umgeben. Soweit heute bekannt ist, bestand diese Uratmosphäre hauptsächlich aus Stickstoff, Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf. Als der Meteoritenschauer vor etwa 3,8 Milliarden Jahren versiegt, 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)¹.

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

¹ Aus der aktuellen Forschung an der Universität Münster gibt es Hinweise darauf, dass die ältesten Gesteine 4,4 Milliarden Jahre alt sein könnten (Metzger, 2001).



Wasser in Wolkenbrüchen nieder. Die Wassermassen, die 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. Als Lithosphäre bezeichnen wir die Erdkruste, die aus Gesteinen besteht [**Modul Gesteinskreislauf: Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte**]. Der Begriff Hydrosphäre beschreibt alle mit Wasser bedeckten Regionen wie Meere, Flüsse, Seen und auch das Grundwasser im Boden [**Modul Wasserkreislauf**]. Die Atmosphäre schließlich ist die gasförmige äußere Hülle der Erde [**Modul Chemie und Physik der Atmosphäre**].

Die Gase der Luft 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 (Abb. 3). 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 [**Modul Entstehung und Entwicklung des Lebens**].

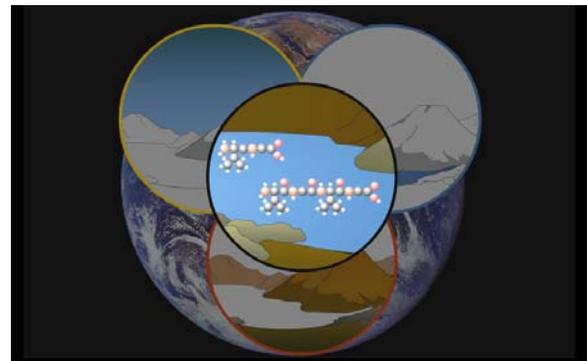


Abbildung 3: Die Biosphäre entstand aus dem Zusammenspiel von Atmosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre.

Die wohl ältesten Versteinerungen von Organismen sind möglicherweise 3,5² Milliarden Jahre alt (Stanley, 1994). Diese Fossilien waren von Lebewesen gebildet worden, 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

[**Modul Geowissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen**]. 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 lebten. Es handelte sich um Archaea, bakterienartige 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 schwarzen Eisenverbindungen zu rotem Eisenoxid. Zunächst gelangte er daher nicht in nennenswerten Mengen in die Atmosphäre. Da die meisten schwarzen

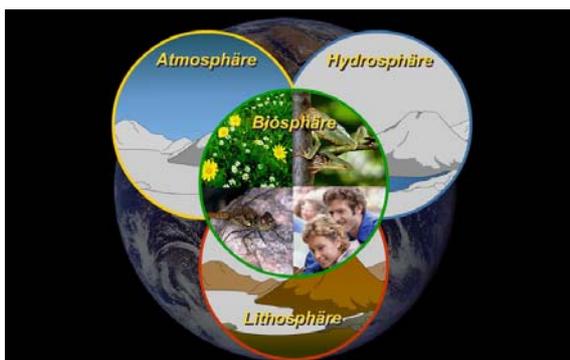


Abbildung 4: Die Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre sind die vier übergeordneten Teilsysteme des Systems Erde.

Eisenverbindungen bereits nach einiger Zeit oxidiert waren, konnte sich Sauerstoff im Meerwasser anreichern. Somit war die Voraussetzung für die Entwicklung der Zellatmung bei Lebewesen gegeben.

² Diese Zahl wird zur Zeit angezweifelt (siehe u.a. Engeln, H.: Erste Zellen – echt oder vorgetäuscht. In: Spektrum der Wissenschaften 8/2000), es wird aber als sicher angenommen, dass es vor 2,7 Milliarden Jahren Leben auf der Erde gab.



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 sauerstoffzehrende 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 [**Modul Gesteinskreislauf: Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte**]. Vermutlich erst nach etwa 2 Milliarden Jahren setzen sich die Erdkrustenplatten in Bewegung. Sie drifteten auseinander, so dass 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 [**Modul Plattentektonik und Vulkanismus**]. Durch den Temperaturunterschied zwischen Erdinnerem und Erdoberfläche werden Konvektionsströme im Erdmantel und im Erdkern in Gang gesetzt.

Auch die Luft 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 [**Modul Geowissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen**]. 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 Teilchens 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 setzen 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 der Systemansatz erwiesen.

2.3 Das Systemkonzept

Ein System besteht aus Elementen, die miteinander in Beziehungen stehen (Abb. 5). Systeme sind veränderlich. Blicken wir aus dem Fenster, sehen wir einen Ausschnitt des Systems Erde zu einem bestimmten Zeitpunkt, z. B. Bäume, Luft und Wasser. 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 Änderung 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.

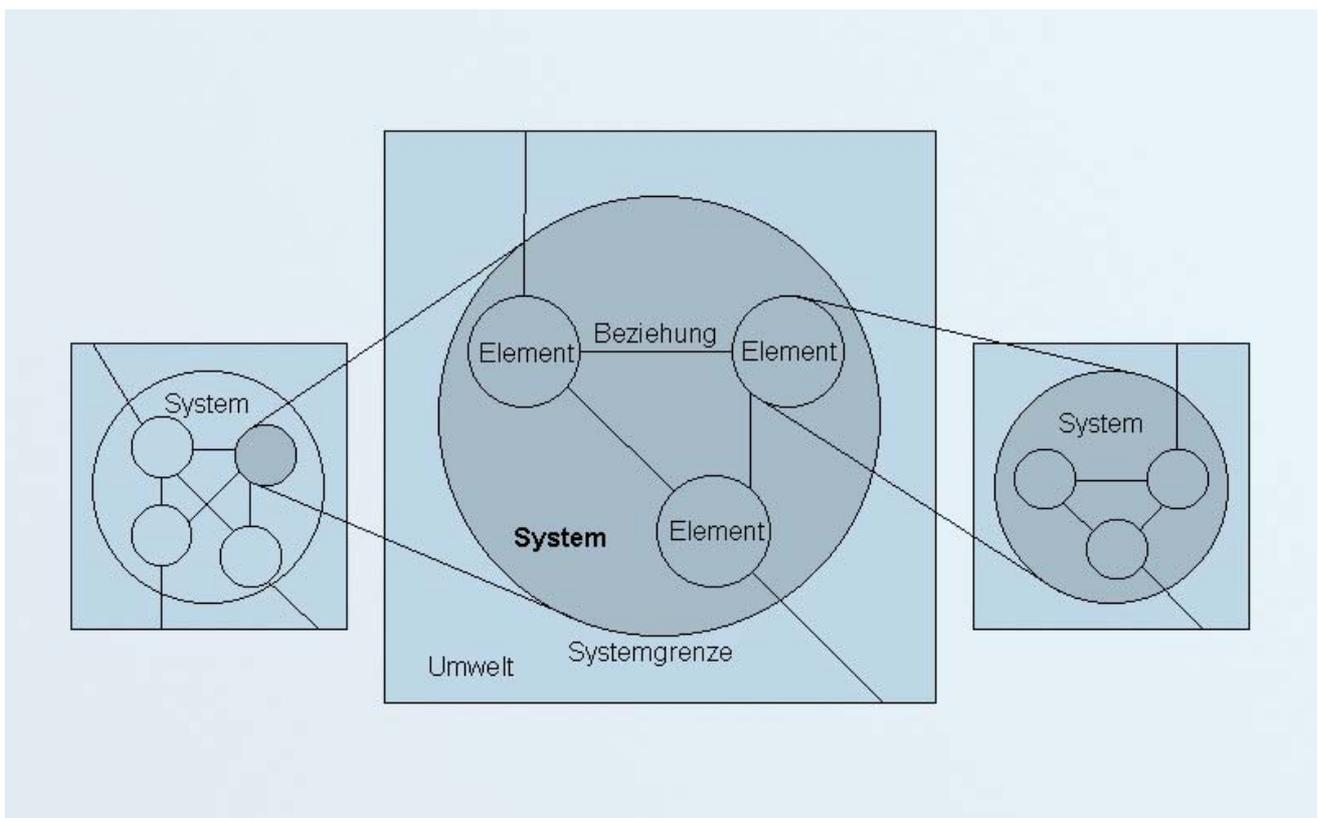


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Systems. Ein System existiert in einer Systemumwelt. Es besteht aus Elementen, die in bestimmten Beziehungen zueinander stehen. Eine Systemgrenze trennt das System von der Systemumwelt. Es gibt Beziehungen zwischen Elementen des Systems und Elementen der Systemumwelt (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 zum Beispiel bei Erwärmung einer Flüssigkeitsschicht auf dem Herd unter



bestimmten Bedingungen spontan sechseckige Konvektionszellen [Modul Konvektion in allen Sphären]. 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 ist das Verhalten einer Kugel (Abb. 6) dargestellt.

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

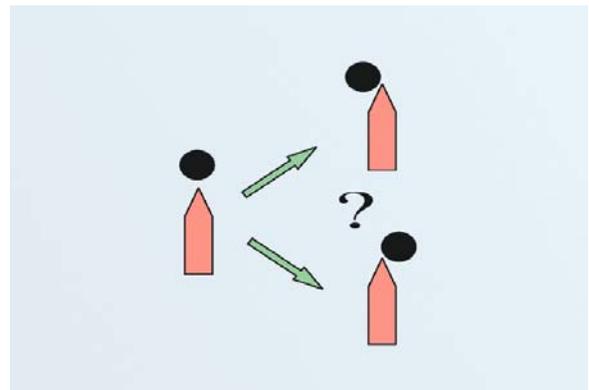


Abbildung 6: Ein einfaches nicht vorhersagbares System - es ist nicht zu entscheiden, ob die Kugel von der Spitze nach links oder rechts herunterfällt.

- 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 Stoffstromes durch den Körper, bleiben die Gestalt, die Struktur und die chemische Zusammensetzung des Baumes weitgehend gleich. Der Zustand des dauernden Stoffzuflusses 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.
- 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. 2.2, 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. Ein Roulett 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 das Modell der Plattentektonik, als es von Alfred Wegener entwickelt wurde. Die Aussagen des Modells 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 (relevanter) Systemelemente;
- Identifizierung (relevanter) Beziehungen (Wirkungen und Flüsse) zwischen den Elementen;
- Identifizieren der Systemeigenschaften;
- Identifizierung der Beziehungen des Systems zu anderen Systemen

Die Ergebnisse der Analyse können in graphischer Form z.B. durch Concept Maps und/oder Stofffluss- bzw. Wirkungsdiagramme dargestellt werden (siehe 2.3.3).

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 die 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.

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 Identifikation der Systemgrenze und der für eine bestimmte Fragestellung relevanten Elemente. Beispielsweise kann man das System Erde selbst als Element des Sonnensystems betrachten. Dann wird als Systemgrenze die Grenze des Sonnensystems festgelegt (Abb. 7, Systemgrenze 1). Betrachtet man das System Erde ohne Bezug zur Sonne, so werden vor der Systemgrenze Biosphäre, Hydrosphäre, Atmosphäre, Lithosphäre und Erdinneres eingeschlossen (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 Abb. 7 die Systemgrenze 3.

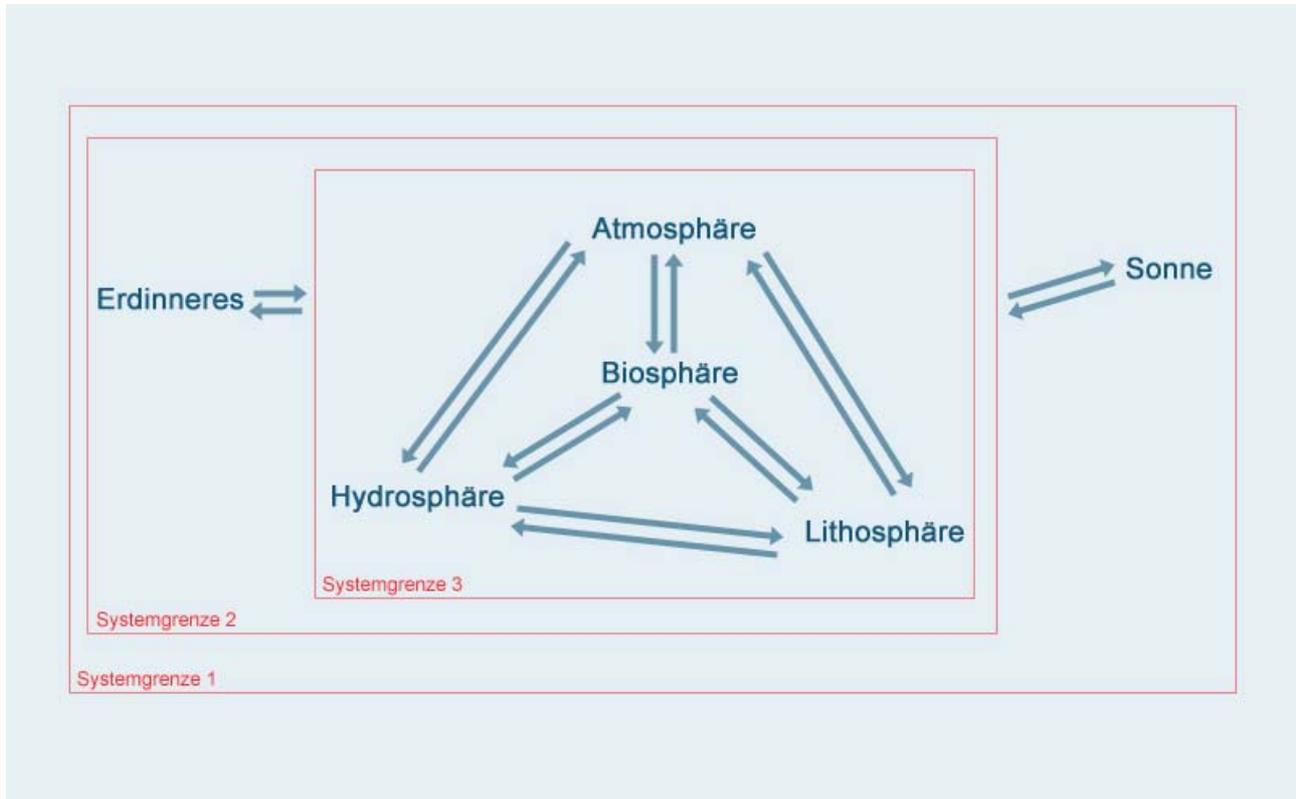


Abbildung 7: Unterschiedliche Systemgrenzen bei der Betrachtung der Erde. Die Pfeile repräsentieren die Beziehungen zwischen den Elementen Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre sowie Sonne und Erdinneres.

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

- In *biogeochemischen Kreisläufen* (siehe auch Hlawatsch und Venke, 2002) sind die Beziehungen u.a. durch Stoffflüsse gekennzeichnet. So werden im Kohlenstoffkreislauf die Wege von kohlenstoffhaltigen Molekülen bzw. Kohlenstoffatomen durch die verschiedenen Elemente (Sphären) des Systems Erde beschrieben [**Modul Kohlenstoffkreislauf**]:
 - 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 (Fließgewicht). Durch den Energiefluss entstehen Wärmeausgleichs- oder Konvektionsströme im inneren 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 verschieden 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 Meeresströme und Windsysteme 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, graphisch 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 graphische 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 [**Modul Kohlenstoffkreislauf, Modul Wasserkreislauf**].

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

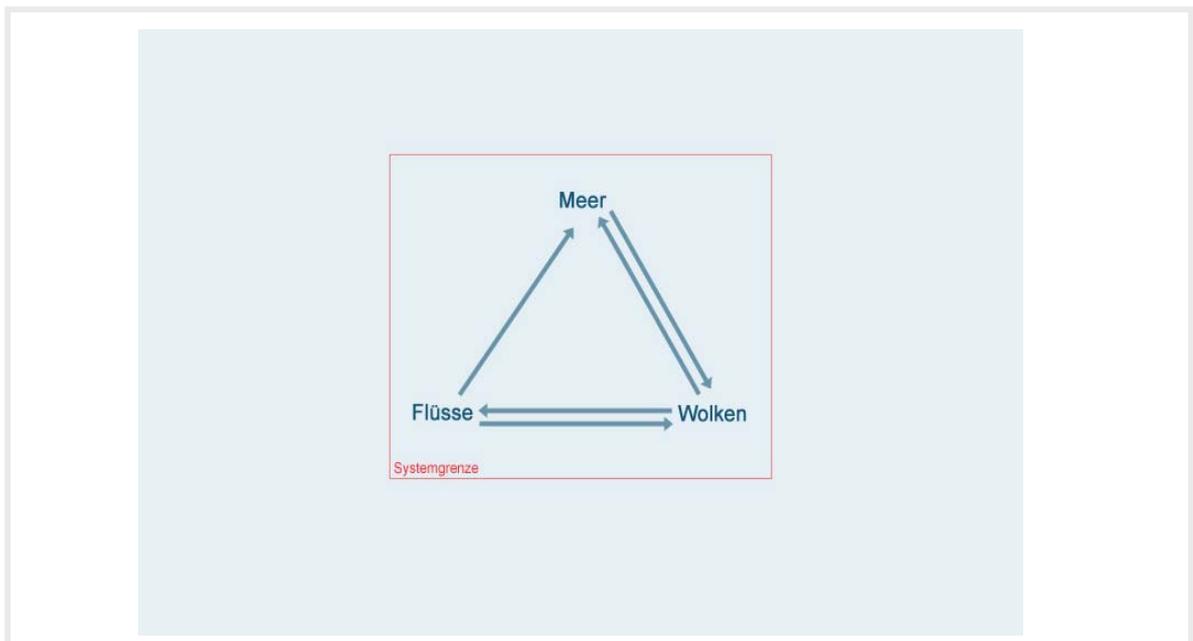


Abbildung 8: Dieser Ausschnitt aus dem Wasserkreislauf ist ein Beispiel für ein qualitatives Stoffflussdiagramm: Wassermoleküle aus dem Meer oder Flüssen werden durch Verdunstung und Kondensation Bestandteil der Wolken und gelangen über den Niederschlag wieder in das Meer und in die Flüsse.

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 Komponenten aus dem Klimasystem.

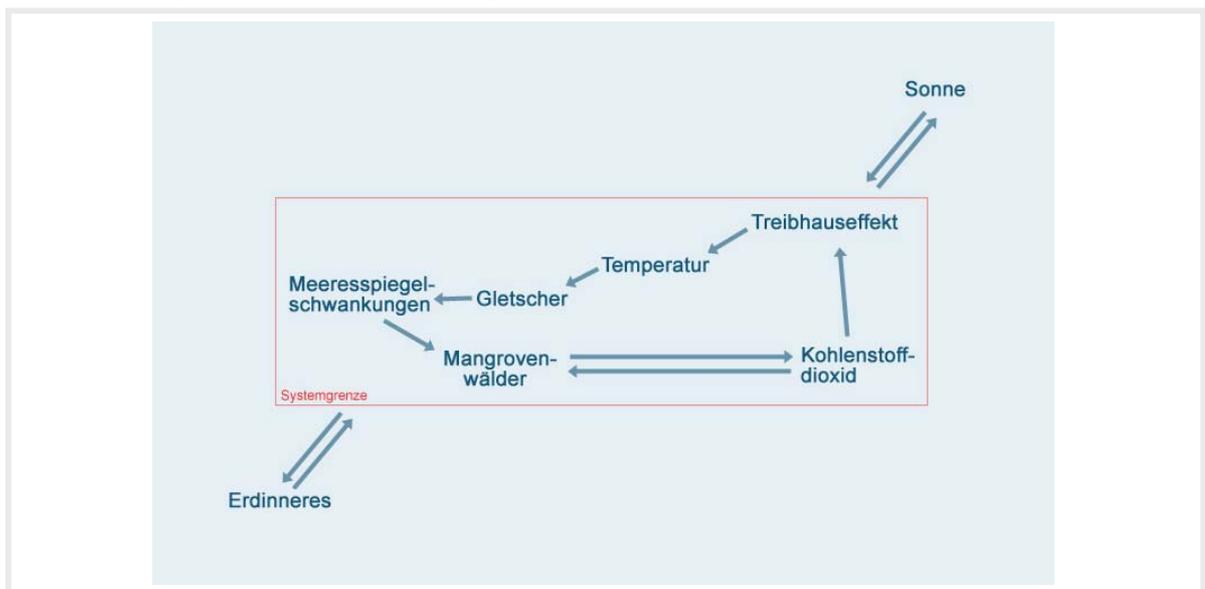
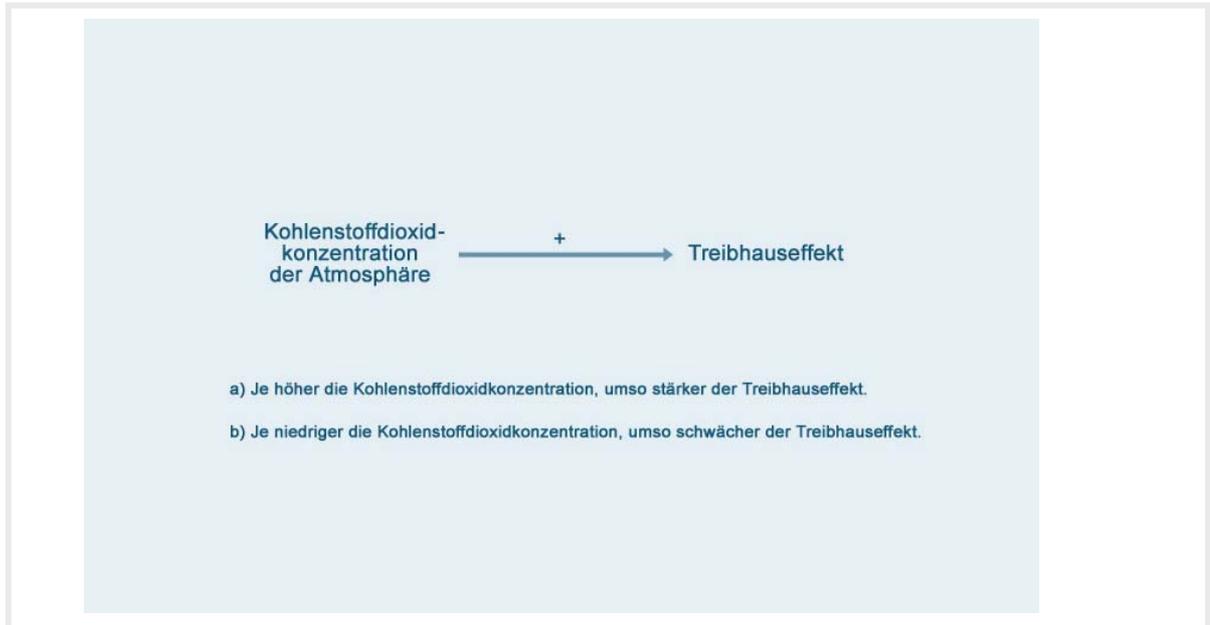


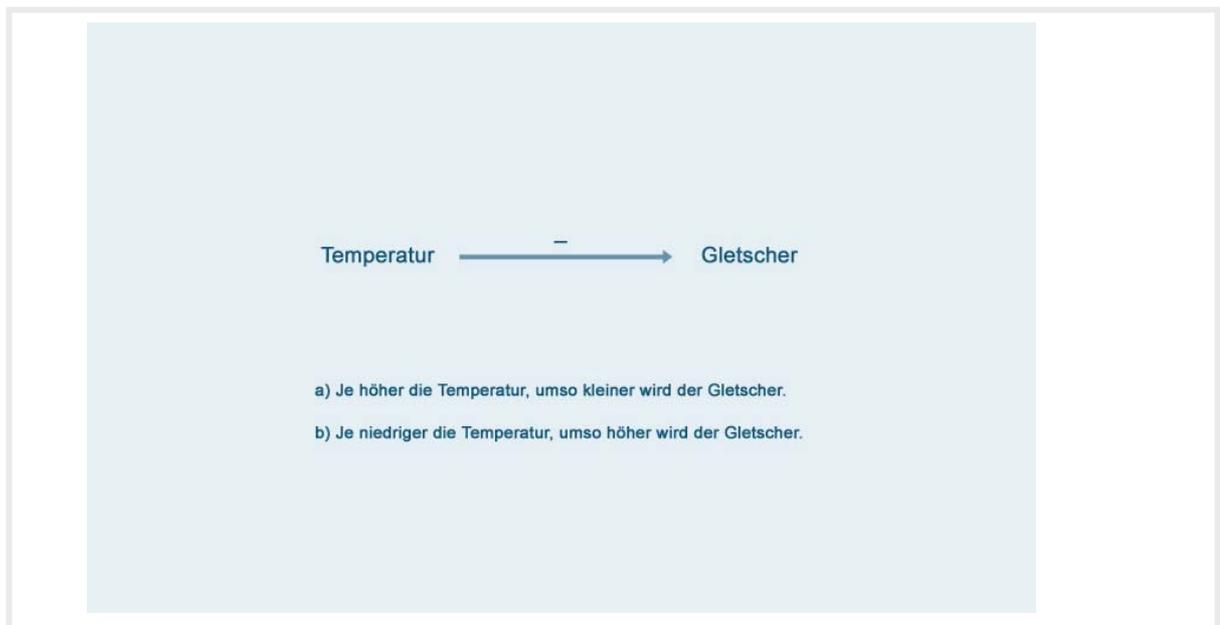
Abbildung 9: Dieser Ausschnitt des Klimasystems ist ein Beispiel für ein qualitatives Wirkungsdiagramm: Mangroven wirken auf die Kohlenstoffdioxidkonzentration in der Atmosphäre, welche den Treibhauseffekt und damit die Temperatur in der erdnahen Atmosphäre beeinflusst. Die Temperatur wirkt auf das Schmelzen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



- **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, 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 geowissenschaftlichen Großprojekten resultieren können. Diese Darstellungsform stellt die Basis von Computermodellen 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. Das System enthalte 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. Zustandsgrößen 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

Das System Erde mit den Teilsystemen Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre soll in Grundzügen erarbeitet werden. Die Schüler/innen sollen dabei auch ein grundlegendes Verständnis der Begriffe System und Modell erwerben, so dass 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 und
- 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 Systemkomponenten die Entwicklung von Szenarien der weiteren Entwicklung des Systems Erde möglich ist;
- wissen, dass Systeme durch Modelle beschrieben werden;
- Modelle durch Concept Maps, 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

Die systemtheoretischen und geowissenschaftlichen Grundlagen für das Verständnis des Systems Erde und seiner Erforschung werden in der vorliegenden Einführungseinheit 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 folgendem Unterricht.

3.4 Erläuterung und Nutzungshinweise zu den Materialien

Die Materialien der Einführungseinheit sind in den Begleittext und in Materialien, die zwei Bausteinen zugeordnet wurden, untergliedert. Der Begleittext steht zunächst nur den Lehrkräften zur Verfügung. Er kann für die Schüler/innen auf eine gesonderte CD-ROM gebrannt werden, so dass damit im Computerraum gearbeitet werden kann. Oder der Begleittext wird für die Schüler/innen auf Papier kopiert. Er eignet sich insbesondere für die Ergebnissicherung im Anschluss an die Bearbeitung der beiden Bausteine. Für diese Bausteine stehen die im Kapitel 6 aufgeführten Materialien zur Verfügung. Bei Material 1 des Bausteins 1 und des Baustein 2 handelt es sich um Informationen für die Lehrkraft.

Anhand von **Baustein 1 "Einführung in das Systemkonzept"** (etwa 1 Unterrichtsstunde) 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) sollen Lernende Concept-Maps erstellen, die dazu dienen, an die, im Alltag und im Fachunterricht erworbenen, Vorstellungen der Lernenden zum System Erde anzuknüpfen. 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) 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, 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.

4 Vorschläge für den Unterrichtsverlauf

Diese Einführungseinheit sollte zu Beginn eines Unterrichts zum System Erde durchgeführt werden. Die Schüler/innen werden grundlegend in die Systemanalyse und in die Meilensteine der Erdentwicklung



eingeführt. Das neuerlernte Wissen kann dann durch die Materialien der anderen Module angewendet und vertieft werden.

Falls die Schüler/innen nur geringe geowissenschaftliche Vorkenntnissen besitzen, empfiehlt es sich, anschließend das Modul "Gesteinskreislauf: Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte" einzusetzen. Es führt mit Experimenten, Texten und Animationen in das Thema Gesteinskreislauf ein. Als Abschluss können die Schüler/innen in Gruppenarbeit ein Poster mit einem Stoffflussdiagramm zum Gesteinskreislauf entwickeln. Wenn ausreichend Zeit vorhanden ist, kann dies auch mit der Methode "Gruppenpuzzle" geschehen, die das selbstorganisierte Lernen fördert (Modul 3, Baustein 6).

Nachdem auf diese Weise wichtige Grundlagen erworben wurden, kann am Beispiel des Kohlenstoffkreislaufes (Modul "Stoffkreisläufe") der Weg des Elementes Kohlenstoff durch die Sphären der Erde zu beschreiben (Stoffflussdiagramme) und anschließend die Wirkung von Kohlenstoff und seinen Verbindungen in den verschiedenen Teilsystemen zu erarbeiten (Wirkungsdiagramme).

Im weiteren Unterrichtsverlauf bietet das Modul "Klimasystem und Klimageschichte" die Möglichkeit, sich mit dem Klimawandel zu beschäftigen. Als Ergebnis können Wirkungsdiagramme zum Klimasystem erarbeitet werden, die als Grundlage für eine Unterrichtseinheit zur Modellierung genutzt werden können.

5 Literatur

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

HLAWATSCH, S. und S. VENKE (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 I. McDERMOTT (2000): Systemisches Denken verstehen und nutzen - Die Lösung lauert überall. VAK Verlags GmbH, Freiburg.

PRESS und SIEVER (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 Übersicht der Unterrichtsmaterialien der Bausteine

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 von ? (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 (Animation)



Material 5: Lernkontrolle: Systemkonzept (Arbeitsbogen)



Material 6: Sphären der Erde (Animation)