



*Unsere Erde:* Die chemische Zusammensetzung von Atmosphäre, Landoberflächen und Ozeanen der Erde ist signifikant verschieden von jener, die sich auf einem unbelebten Planeten einstellen würde.

## 5.2 Erdsystemanalyse: Wege zwischen Klimaschutz und Anpassung

WOLFGANG LUCHT

*Earth system analysis – Ways of climate change mitigation and adaptation:* The Earth currently is in a relatively stable interglacial warm phase. The main agent of change in this phase are human activities, which are causing climate change by chemically altering the atmosphere and transforming the biosphere through land use. In view of the mounting magnitude of the effects that these changes have on the Earth system and on the future prospects of human societies, humankind is faced with the challenge of taking into account in its actions not only the particular dynamics of its social and economic systems but also the dynamics of the Earth system as a whole. Earth system analysis based on computer modelling and macroscopic observation is the means by which a course may be steered that will better account for the environmental consequences of societal developments than has been the case in the past.

### Coevolution von Biosphäre und Geosphäre

Die wissenschaftliche Erforschung der Erde in den letzten 200 Jahren hat der Menschheit erstmals eine genauere Vorstellung von deren langer Geschichte gegeben. Das Alter des Lebens, die Bedeutung von Fossilien und Sedimenten, die Existenz von Eiszeiten und die zeitliche Stellung vorgeschichtlicher Steinwerkzeuge waren vor dem 19. Jahrhundert niemandem bekannt. Es lässt sich fragen, wie sich der heutige globale Wandel vor dem Hintergrund dieser Erdgeschichte darstellt und welche Sichtweise daraus auf die besondere Herausforderung entsteht, mit welcher sich die Menschheit heute konfrontiert findet. Hierzu gehört die Frage, ob durch vorausschauendes Handeln in einer sich verändernden Welt der Wandel so beschränkt werden kann, dass er von den natürlichen und sozialen Systemen der Erde zu bewältigen ist.

Die Evolution des Lebens ist stets von den klimatischen, chemischen und topographischen Gegebenheiten der planetaren Entwicklung abhängig gewesen. Die sich infolge der Plattentektonik verändernde Gestalt und Lage der Kontinente und Schelfmeere und der Wechsel verschiedener Klimate aufgrund geochemischer Entwicklungen in Atmosphäre und Ozeanen haben den Rahmen gesetzt, in welchem sich das Leben entwickeln konnte. Hinzu kamen als externe Faktoren die allmählich zunehmende Einstrahlung der Sonne sowie Einschläge größerer Körper aus dem Weltraum. So entfaltet sich auch heute das Leben der Menschen, ihrer Kulturen und gesellschaftlichen Ordnungen innerhalb der geographischen und umweltlichen Faktoren der Regionen, in denen sie leben.

Andererseits aber hat das Leben über die lange Periode seiner Entwicklung nicht nur passiv auf seine sich verändernde Umwelt reagiert, sondern seinerseits auch

stark auf diese eingewirkt und dabei die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Planeten erheblich verändert. Die chemische Zusammensetzung von Atmosphäre, Landoberflächen und Ozeanen der Erde ist signifikant verschieden von jener, die sich auf einem unbelebten Planeten einstellen würde. Sie wäre ebenso wie weitere geologische und klimatische Eigenschaften des Planeten Erde ohne die kollektive Aktivität der auf ihr lebenden Organismen nicht erklärbar. Heute ist es der Mensch, welcher als inzwischen recht zahlreicher Organismus seine Umwelt verändert.

Für die Wirkung des Lebens der Erde auf Eigenschaften der planetaren Umwelt gibt es zahlreiche Beispiele. Die Vegetation der Landoberfläche verändert die Strahlungsbilanz der Erde durch eine Veränderung der Rückstrahlung und damit das Klima. Sie verändert auch die chemischen Eigenschaften des Bodens, indem sie ihn mit organischem Material anreichert, welches Wasser und Nährstoffe speichert. Vegetation spielt durch ihr photosynthetisches Wachstum und ihren Stoffwechsel eine wichtige Rolle in den globalen Kreisläufen von Kohlenstoff, Stickstoff und Wasser. Organismen beschleunigen die Verwitterung von Gesteinen und tragen sehr zur Sedimentbildung im Meer bei.

Biosphäre und Geosphäre haben sich auf diese Weise in enger beidseitiger Verzahnung durch Coevolution entwickelt (LENTON et al. 2004). Diese Verbindung von Umwelt und Leben kennzeichnet alle Ebenen der Evolution. Gene als Träger der biologischen Erbinformation werden durch verschiedene epigenetische Prozesse in ihrer Wirkung modifiziert und reguliert. Diese unterliegen dem Einfluss ihrer zellulären und außerzellulären Umgebung und sind in ihren Eigenschaften teilweise vererbbar. Damit haben nichtgenetische Vorgänge der Umwelt eine unmittelbare Auswirkung auf die Wirksamkeit von Genen in der Ausformung der äußeren Gestalt von Lebewesen und ihrer Eigenschaften (JABLONKA & LAMB 2005). Dies bewirkt eine enge, grundsätzliche Verzahnung von Leben, Evolution und geophysikalisch-geochemischen Eigenschaften der Umwelt des Planeten Erde.

Die Coevolution von Biosphäre und Geosphäre war im Laufe der Erdgeschichte von einer Anzahl grundlegender coevolutionärer Transformationen der Biosphäre gekennzeichnet (SMITH & SZÁTHMARY 1995). Hierzu zählen die große Oxidation der Erdatmosphäre vor 2.4 Milliarden Jahren durch von Lebewesen produzierten Sauerstoff, welche die chemischen Vorgänge der Landoberfläche, der Atmosphäre und der Ozeane grundlegend veränderte. Und dazu zählt der relativ rasche Übergang von einzelligem zu vielzelligem Leben vor 543 Millionen Jahren, als nach 3 Milliarden

Jahren einfachen Lebens die komplexen Baupläne der größeren Lebensformen entstanden, welche heute die Biosphäre kennzeichnen. Aber zu den erdgeschichtlichen Transformationen der Biosphäre zählen auch fünf große Ereignisse des Massensterbens von Arten. Es ist vor diesem Hintergrund, dass das Auftreten des Menschen als neues biosphärisches und damit auch geosphärisches, also planetares Phänomen gesehen werden kann.

### **Rolle des Menschen in der Coevolution**

Aus dieser Perspektive könnte es zunächst so aussehen, als sei der heute vom Menschen bewirkte globale Wandel möglicherweise nicht mehr als ein weiteres Kapitel in dieser Geschichte der Coevolution des Lebens mit seiner Umwelt. Das Lebewesen Mensch wirkt wie andere Lebensformen auf seine Umwelt ein. Jedoch unterscheidet sich die heutige globale Veränderung nach Qualität und Quantität von jenen der Vergangenheit. Nie zuvor hat eine einzige Art in einer so kurzen Zeit eine derart weitreichende Umgestaltung der Erde bewirkt.

Der Mensch verändert im globalen Wandel den Planeten grundlegend. Die mit der industriellen Energieproduktion aus fossilen Energieträgern verbundene Emission von Treibhausgasen verändert die Strahlungsbilanz der Atmosphäre und führt zu einer Klimaerwärmung, welche in einer Periode erdgeschichtlich ohnehin hoher Temperaturen zahlreiche die Umwelt verändernde Auswirkungen haben wird. Durch die weiter zunehmende Landnutzung des Menschen wird der Planet allmählich entwaldet, die Landoberfläche in agrarwirtschaftliche Produktionslandschaften verwandelt. Die daraus resultierende Degradierung und Fragmentierung natürlicher Lebensräume ist die direkte Ursache für das derzeitige große Artensterben, welches in der weiteren Entwicklung den Verlust wichtiger Spezies bewirken wird. Durch Landnutzung ist bereits ein Viertel der natürlichen Biomasse der Landoberfläche der Erde entfernt worden. Zusätzlich wird eine Vielzahl chemischer Stoffe in die Umwelt entlassen, welche dort natürlich nicht vorkommen. In der nahen Zukunft werden vom Menschen genetisch modifizierte Lebewesen in den verbleibenden Ökosystemen vorzufinden sein. Die planetare Umwelt des Menschen nimmt zunehmend einen Hybridcharakter an, in welchem grundlegende Systemeigenschaften wie Temperatur, chemische Zusammensetzung und ökologische Struktur ebenso sehr durch den Menschen und seine Aktivitäten wie durch natürliche Prozessabläufe bestimmt werden. Der Mensch transformiert die Biosphäre und modifiziert die Geosphäre.

Das Ausmaß dieser Veränderung bedeutet eine erdgeschichtlich neue Qualität. Auch ihre Ursache ist qualitativ neu, denn die zugrundeliegende Fähigkeit des Menschen zum Denken in Kategorien und Symbolen in grammatikalisch strukturierter Sprache bedeutet erdgeschichtlich gesehen die Eröffnung eines zuvor nicht vorhandenen neuen Kanals der Informationsübertragung zwischen Organismen in Raum und Zeit. Zu den bislang vorhandenen Formen der erblichen Informationsübertragung durch genetische, epigenetische und Verhalten imitierende Mechanismen tritt beim modernen Menschen die symbolische Informationsvermittlung (JABLONKA & LAMB 2005). Diese Innovation hat die Steigerung der kollektiven Aktivität des Menschen bis zum Stadium der heutigen globalen Auswirkungen ermöglicht. Sie hat somit eine möglicherweise erdgeschichtliche, mindestens aber jetztzeitliche Bedeutung. Sie macht den Menschen zu mehr als einem besonders zahlreichen Tier und die von ihm bewirkte Umweltveränderung zu einer neuartigen Erscheinung der Erdgeschichte.

Aus der erdgeschichtlichen Coevolution von Biosphäre und Geosphäre, welche die Entwicklung der Erde seit der Entstehung des Lebens bestimmt hat, ist eine Dreiecksbeziehung geworden, in welcher die Anthroposphäre, die Sphäre menschlicher Aktivitäten, seiner Wirtschaftssysteme und Sozialstrukturen und damit letztlich der mentalen Strukturierungen des Menschen, eine entscheidende Rolle spielt. Die Dynamik des Gesamtsystems Erde wird derzeit von diesen drei Komponenten des Erdsystems und ihren Wechselwirkungen gleichermaßen bestimmt. Zwar liegt die Ursache des heutigen globalen Wandels vor allem in der internen Dynamik der Anthroposphäre selbst, welche den Prozessen der geschichtlichen sozialen, kulturellen und ökonomischen Entwicklung der menschlichen Gesellschaften unterliegt. Aufgrund der engen Kopplung der Anthroposphäre an Geosphäre und Biosphäre führt diese Dynamik aber, wie dem Menschen zunehmend bewusst wird, zu erheblichen Veränderungen in der biologischen, physischen und chemischen Umwelt. Diese wirken direkt auf die Anthroposphäre zurück, unter anderem durch Klimawandel und den Verlust von Naturressourcen. Die vom Menschen gemachte Veränderung ist damit nicht nur für andere Lebewesen, sondern insbesondere auch für den Menschen selbst von grundlegender, seine Kulturen und Gesellschaften betreffender Bedeutung. Die Dynamik der Anthroposphäre hat Auswirkungen im Erdsystem, welche sie selbst verändern. Bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt wurden diese Auswirkungen erst wahrgenommen, wenn sie eintraten. Nun geht es darum, sie zu antizipieren und bereits in das Handeln in anthroposphärischen Zusammenhängen einzubeziehen, also gesamtsystemisch zu denken.

## Die große Beschleunigung

Die Entwicklung des Menschen zu einem globalen Faktor hat langsam begonnen, hat aber seit dem Ende der letzten Eiszeit vor 11.000 Jahren und insbesondere mit der Industrialisierung vor 250 Jahren und noch einmal etwa seit Mitte des 20. Jahrhunderts eine unglaubliche Beschleunigung erfahren (AMBROSE 2001). Über einen Großteil seiner Entwicklung hatte der Mensch zunächst als zahlenmäßig relativ gering vertretene Art kaum einen Einfluss auf die planetare Umwelt. Erste Zeichen einer besonderen Entwicklung traten aber bereits vor zweieinhalb Millionen Jahren auf, als Verfahren des heutigen Menschen erstmals damit begannen, von Geröllsteinen Abschlüge abzutrennen und als Werkzeuge zu verwenden. Der entscheidende Übergang hin zu symbolischer Kommunikation scheint aber zum Beispiel in Europa erst vor ca. 30.000 Jahren erfolgt zu sein, als mit der Verdrängung des Neandertalers durch anatomisch moderne Menschen in der jüngeren Altsteinzeit erstmals eine symbolische Kultur entstand und eine Phase neuer technologischer und sozialer Möglichkeiten eingeleitet wurde. Zwar besaß auch der Neandertaler eine symbolische Kultur, wie an seinen Bestattungen ablesbar ist, doch finden sich Malereien und Schmuck erst in der letzten Phase der Altsteinzeit, also in einer menschheitsgeschichtlich noch nicht allzu lange zurückliegenden Zeit.

Im Verlauf des jetzigen Interglazials, der gegenwärtigen, klimatisch ungewöhnlich stabilen zwischeneiszeitlichen Warmperiode der Erdentwicklung, erfolgte vor nur wenigen Jahrtausenden mit der jungsteinzeitlichen Revolution der epochale Übergang zum Ackerbau. Der dadurch gesteigerte Zugriff des Menschen auf materielle und energetische Ressourcen durch gezielte Produktion und Ernte photosynthetischer Produkte ermöglichte erstmals die Ausbildung territorialer und städtischer Zivilisationen und eine erheblich höhere Bevölkerungsdichte. Erste flächige Waldrodungen waren die Folge. Vor nicht einmal 4000 Jahren endete dann die lange Steinzeit und es begann die Verarbeitung von Metall und Glas.

Vor nicht mehr als 250 Jahren erfolgte schließlich die für die heutigen Umweltauswirkungen menschlicher Aktivitäten entscheidende Entdeckung der maschinellen Nutzbarmachung fossiler Energieträger. Sie potenzierte die Fähigkeit des Menschen, seine Umwelt zu kolonisieren und Ressourcen zu extrahieren. Großstädte, globale Mobilität und umfangreiche industrielle Produktion von Gütern waren nun möglich. Gleichzeitig wuchs der Land- und Ressourcenverbrauch ebenso sprunghaft an wie das Volumen der entstehenden Abfälle und Emissionen. Industrialisierte Gesellschaften benötigen für ihren Erhalt und ihre Reproduktion ein

mehrfaches des energetischen und materiellen Durchsatzes von Agrargesellschaften, welche ihrerseits bereits einen deutlich höheren Umsatz zeigten als die vorherigen nomadische Jägersgesellschaften.

Heute verbinden Flugzeuge die Erdteile und eine Raumstation umkreist die Erde. Von der Erfindung des Pfeils und Bogen bis zur Mondlandung vergingen nicht mehr als 12000 Jahre, eine vor dem Hintergrund sowohl der Menschheitsgeschichte als auch der Erdgeschichte erstaunlich kurze Zeit. In den letzten lediglich 250 Jahren hat sich die Weltbevölkerung von 800 Millionen auf über 6 Milliarden vergrößert. Alleine zwischen 1950 und 2050, wenn sie die Zahl von 9 Milliarden Menschen erreicht haben wird, wird sich die Weltbevölkerung in nur einem Jahrhundert mehr als verdreifacht haben. Die tieferen Gründe für diese große Beschleunigung, welche die Entwicklung der Menschheit durchlaufen hat, bleiben im Kern rätselhaft und haben vermutlich sowohl mit genetischen als auch mit neuronalen, klimatischen und geographischen Faktoren zu tun.

Die nochmalige starke Beschleunigung, welche der Anstieg des Wachstums der menschlichen Gesellschaften in den letzten 250 Jahren und insbesondere seit etwa 1950 erlebt hat, führt dann direkt in die heutige Problematik des globalen Wandels, in welchem jetzt die Gefahr besteht, dass der Mensch Geosphäre und Biosphäre so stark verändert, dass dies zu seinem Nachteil und zum Nachteil zahlreicher anderer lebender Art wird. Die Erde als Planet und der Mensch mit seinen Gesellschaften befinden sich in neuem, bislang unkartiertem Terrain der planetaren Entwicklung. Es wäre verwunderlich, wenn die Veränderung seiner Umwelt nicht auch ihn, den Menschen, zumindest aber die Strukturen seiner sozialen Organisation verändern wird.

Es ist die überragende Herausforderung dieses Jahrhunderts, dass die Menschheit die erdsystemaren Auswirkungen ihres Handelns und deren Rückwirkungen auf ihre Gesellschaften in ihren Handlungen zu berücksichtigen lernt. Die Menschheit steht damit vor der Notwendigkeit, die Dynamik des Gesamtsystems Erde zu verstehen und in die Gestaltung ihrer künftigen Entwicklung bewusst mit einzubeziehen, statt wie in der Vergangenheit deren Auswirkungen lediglich im Nachhinein als Problem zu erkennen. Vorausschauendes, auf die Erde als System bezogenes Handeln ist notwendig.

### **Erdsystemanalyse**

Welche Instrumente stehen der Menschheit für diese Aufgabe zur Verfügung? Es geht zunächst nicht, wie oft unterstellt wird, darum, den Planeten Erde aktiv in eine bestimmte Richtung zu steuern. Sondern es geht

zunächst lediglich darum, die Auswirkungen eigenen kollektiven Handelns erdsystemdynamisch vorherzusehen und es so anzupassen, dass die schlimmsten Auswirkungen vermieden werden können. Zwei Kernfragen an die Dynamik des Erdsystems sind daher: Wie viel Spielraum besteht im System, bevor in ihren Rückwirkungen gefährliche Veränderungen auftreten, wie derzeit beim Klimawandel, und wie schnell lassen sich die Prozesse der Anthroposphäre umsteuern, wie zum Beispiel im Energieproduktionssystem?

Erdsystemanalyse ist die wissenschaftliche Untersuchung dieser Fragen und der Versuch, eine Antwort auf sie zu geben (SCHELLNHUBER 1999). Wissenschaft war zwar an der Verursachung der globalen Probleme ganz erheblich beteiligt, ist aber nun vermutlich unabdingbar für deren Bewältigung. Noch nie hatte die Menschheit ein solches Wissen über das Erdsystem wie heute und einen so reichen Zugang zu Daten und Berechnungen zur Verfügung. Erdsystemanalyse als Wissenschaft kann entscheidende Hinweise für das Handeln liefern, wie am Beispiel der internationalen Diskussion um den Klimaschutz exemplarisch sichtbar wird. Notwendig ist aber, dass die Erdsystemanalyse als Disziplin das Bestehen der Dreiecksbeziehung zwischen Geosphäre, Biosphäre und Anthroposphäre ernst nimmt und alle drei Komponenten in ihrer gekoppelten Dynamik im Zusammenhang analysiert.

Die wichtigsten Instrumente, welche die Erdsystemanalyse der Menschheit zur Verfügung stellen kann, sind Computermodellierungen des Erdsystems und eine umfassende makroskopische Erdbeobachtung (SCHELLNHUBER 1999). Bei der Modellierung erfordert eine integrierte Betrachtungsweise die Verwendung von Erdsystemmodellen, welche die gekoppelten Prozessmodelle des Klimas, der Biosphäre und der Ökonomie abbilden. Die Skalierungseigenschaften dieser Systeme werden genutzt, um die gekoppelte Dynamik in erster Ordnung abzubilden, während Details gemittelt werden.

Erdsystemanalyse bedarf darüber hinaus einer umfassenden Erdbeobachtung. Daten über die Entwicklung in wichtigen Umweltsystemen, vor allem die Erfassung globaler Strömungsmuster und ihrer Veränderungen, sind eine Voraussetzung für glaubwürdige Computermodellierung. Ideal wäre es darüber hinaus, Frühwarnsysteme für kritische Veränderungen zur Verfügung zu haben. Schwieriger als die Beobachtung der physikalisch-chemischen Eigenschaften von Atmosphäre und Ozeanen gestaltet sich die Beobachtung der Biosphäre und der Anthroposphäre, da weder in der Ökologie noch in den Sozialwissenschaften geschlossene Theorien vorliegen, welche relevante Messgrößen und deren Interpretation identifizieren. Jedoch ist gerade eine

Beobachtung der Faktoren, welche in menschlichen Gesellschaften die Entwicklung bestimmen, in der Zukunft von großer Wichtigkeit, wenn bewertet werden soll, ob politische Maßnahmen zum Erdsystemmanagement erfolgreich verlaufen. Zwar gibt es ein umfangreiches statistisches Erfassungswesen und weltweite nationalökonomische Überwachungssysteme, doch hängt gesamtgesellschaftliche Dynamik entscheidend von noch anderen soziokulturellen Faktoren ab. Durch Erdbeobachtung können aber auch makroskopische Bilder der Erde entstehen, welche politikwirksam und bewusstseinsverändernd sein können. Die sinnliche Erfassung von Problemen ist ein wichtiges Mittel der Realitätsverarbeitung des Menschen.

Eine Kombination aus Computermodellierung mittlerer Komplexität und umfassender Erdbeobachtung grundlegender Parameter erlaubt der Erdsystemanalyse, Entwicklungspfade der Erde in der nahen und fernerer Zukunft vorauszuberechnen. Die Analyse dieser Pfade kann als Grundlage für die globale politische, kulturelle und ethische Diskussion über zu vermeidende, problematische und wünschenswerte Zukunftspfade des Planeten Erde dienen. Es bedarf dann wirksamer politischer und wirtschaftlicher Institutionen, um die Entwicklung der Anthroposphäre in Richtungen zu lenken, welche den Vorstellungen der Akteure unter Berücksichtigung der gesamtsystemaren Dynamik entsprechen.

Hier spielt der Gedanke der Leitplanken eine wichtige Rolle. Entwicklungen dürfen sich in Korridoren abspielen, welche Leitplanken einhalten, die nicht überschritten werden sollten. Derzeit wird vor allem eine Leitplanke für die Erwärmung der Welt diskutiert. Im globalen jahreszeitlichen Mittel soll sie zwei Grad nicht übersteigen. Darüber hinaus ist eine Formulierung entsprechender Leitplanken für die Nutzung von Wasserressourcen, den Erhalt von Biodiversität, die Ernährung der Weltbevölkerung und die Nachhaltigkeit von Landnutzung und Bodendegradation notwendig.

### **Durch die Meerenge steuern**

Die Entwicklung des Erdsystems lässt sich in einem Diagramm darstellen, welches in einer Dimension den Zustand der Umwelt misst, in der anderen Dimension den Zustand der Gesellschaft. Die Steinzeit ist von einem Entwicklungspfad in diesem Erdsystemdiagramm gekennzeichnet, in welchem eine Entwicklung des gesellschaftlichen Zustandes erfolgt, ohne dass dies eine große Veränderung des Zustandes der Umwelt bewirkt. Mit dem Beginn des menschlichen Einflusses auf die Umwelt sind die beiden Dimensionen gekoppelt: Veränderungen in der Gesellschaft bedingen zunehmend Veränderungen in der Umwelt. Eine Fort-

setzung dieser Entwicklung kann zum Kollaps führen. Entweder erreicht die Umwelt einen Zustand, der nicht mehr stabil ist, zum Beispiel weil das Klima sich zu stark erwärmt. Oder aber die Gesellschaft gerät in einen Zustand, in welchem die Umweltzerstörung ihre Existenz unterminiert und ein sozialer Kollaps folgt.

Dies sind die Extremfälle, welche eine vorausschauende Politik zu vermeiden trachtet. Die Frage ist aber, welche Kopplung von gesellschaftlicher Entwicklung und Umweltbelastung mindestens vorhanden ist, da eine vollständige Entkopplung unmöglich ist. Weiterhin ist teilweise offen, wie schnell eine Entkopplung vor sich gehen müsste, um Kollapsszenarien zu vermeiden. Offensichtlich ist der Entwicklungsraum zusätzlich von nicht zugänglichen Bereichen gekennzeichnet. Weder ist ein sofortiger Umstieg auf eine gesellschaftliche Entwicklung möglich, welche die Umwelt gar nicht belastet, noch ist möglicherweise ein hochentwickelter Zustand der Gesellschaft bei stark degradiertem Umwelt möglich. Zwischen diesen Inseln der Unzugänglichkeit müsste ein realer Co-Entwicklungspfad von Gesellschaft und Umwelt hindurchsteuern. Ein Übergang zu Nachhaltigkeit würde vermutlich bedeuten, dass sich die Umwelt bei gesellschaftlicher Weiterentwicklung gegenüber dem heutigen Zustand sogar wieder verbessert.

Heute ist nicht viel bekannt über die genaue Lage der Schar möglicher Entwicklungspfade des Erdsystems unter menschlichem Einfluss, das heißt über die Lage, Form und Ausdehnung gesellschaftlich oder naturräumlich unzugänglicher Bereiche, und über die realistisch möglichen Raten der Entkopplung der Entwicklung in den beiden Dimensionen. Zudem besteht die Möglichkeit, dass Systemübergänge in einzelnen Komponenten zu einer sprunghaften statt einer kontinuierlichen Entwicklung führen. Wenn solche Kippunkte überschritten werden, gibt es einen Sprung im Zustand der Umwelt, zum Beispiel durch eine Reorganisation eines Umweltsystems. Daraus kann auch ein Sprung im Zustand der betroffenen Gesellschaft folgen. Hier ist es die Aufgabe der Erdsystemanalyse, vorausblickend vor solchen Entwicklungen zu warnen. Dann wird es vielleicht möglich sein, mit geeigneten Steuerungsinstrumenten ökonomischer, politischer und kultureller Art einen Kurs zwischen den Klippen und Untiefen zu steuern.

Die große Geschwindigkeit der derzeitigen Entwicklung ist aber nicht nur eine Gefahr, sondern sie bietet auch die Chance, steuernd einzugreifen statt die Auswirkungen des Wandels schlichtweg blindlings zu erleben. Wenn es der Menschheit gelänge, sich unter Berücksichtigung der großen globalen Disparitäten auf Entwicklungsziele zu einigen, deren Einhaltung

geboden erscheint, und institutionelle Mechanismen zu schaffen, die eine Umsetzung ermöglichen, so wäre ein wichtiger Schritt hin zu einer nachhaltigen Weltentwicklung getan.

## Umwelt und Menschenrecht

Ein großes Menschheitsziel bleibt unterdessen weiterhin die weltweite Beseitigung von Armut und Hunger, da sie ein Leben in Würde unmöglich machen. Die sichtbare Krise der Industrialisierung kann daher nicht dazu führen, dass die Entwicklungsambitionen der ärmeren Länder in Frage gestellt werden. Eine Steigerung des materiellen Wohlstandes ist in diesen Ländern also trotz der Problematik des globalen Wandels dringend notwendig. Ökonomisch aufsteigende Länder mit starkem Wirtschaftswachstum stehen ihrerseits vor der Problematik, ihre Wachstumspfade robust zu gestalten und vor Krisen und Rückschlägen zu sichern, damit die dort lebende Bevölkerung ein hohes Niveau der Versorgung erreichen kann. Und auch die Infrastrukturen und sozialen Systeme der reichen Industrieländer sind bisher von weiterem Wirtschaftswachstum abhängig.

Die erdsystemar entwickelte Agenda der Bewältigung des globalen Wandels scheint damit in eklatantem Widerspruch mit der Notwendigkeit weiterer wirtschaftlicher Entwicklung zu stehen. Aus diesem Dilemma gibt es nur den einen Ausweg, dass neue Verfahrensweisen, sowohl technischer als auch kultureller Art, zu einer stärkeren Entkopplung der gesellschaftlichen und ökonomischen Entwicklung vom Energie- und Materialverbrauch führen. Das Wachstum der nicht oder noch nicht stark industrialisierten Länder der Erde sollte daher zu ihrem eigenen Vorteil nicht auf den Entwicklungspfad verlaufen, welche den reichen Ländern zwar ihren Wohlstand gebracht, aber die Umwelt in eine nicht nachhaltige Schädigung geführt hat. Vielmehr muss ihr Wachstum auf Pfaden verlaufen, welche für die Zukunft anschlussfähig sind, also verschärfte globale Verteilungskämpfe und eine starke Umweltdegradation mit erheblichen Rückwirkungen vermeiden. Diese Pfade werden die wissenschaftlich und technisch befähigten Länder der Erde entwickeln und finanzieren müssen. An der Umsetzung solcher Entwicklungspfade wäre daher politisch vorrangig zu arbeiten.

Nachhaltigkeit wird vermutlich nicht aus einer reinen Verlängerung bestehender Praxis entstehen können, sondern es werden Innovationen notwendig sein, welche transformierenden Charakter haben. Dies

schließt die Möglichkeit wichtiger sozialer Transformationen mit ein. Darin liegt eine Gefahr der Instabilität, aber auch eine Chance, aus den Problemfeldern herauszufinden, in welche die Menschheit ohne Absicht im Zuge ihrer Entwicklung hineingeraten ist. Instabilität der Entwicklung sowohl in den hybridisierten?? Natursystemen Biosphäre und Geosphäre als auch in der Anthroposphäre des Menschen werden auch entstehen, wenn nicht gehandelt wird.

Die Dynamik des dreifach gekoppelten Systems Geosphäre, Biosphäre und Anthroposphäre steuert auf eine Veränderung hin, welche erhebliche Anpassungen erzwingen wird. Gelingt es dem Menschen, mit Erdsystemanalyse und nachfolgender politischer Umsetzung den Wandel zu begrenzen, so bestehen Chancen, dass diese Anpassung möglich ist. Eines erscheint jedoch sicher: die Gesundheit des eigenen Körpers wird nicht zu gewährleisten sein, wenn die Gesundheit des planetaren Körpers ruiniert wird.

## Literatur:

- AMBROSE, S.H. (2001): Paleolithic technology and human evolution. *Science* 291, 1748-1753.
- SMITH, J.M. & SZATHMÁRY, E. (1995): *The Major Transitions in Evolution*. Oxford Univ. Press, Oxford.
- SCHELLNHUBER, H.-J. (1999): Earth system analysis and the second Copernican revolution. *Nature* 402, Supp., C19-C23.
- JABLONKA E. & LAMB M.J. (2005): *Evolution in four dimensions*. MIT Press, Cambridge, MA.
- LUCHT, W. & PACHAURI, R.K. (2004): The mental component of the Earth system. In: SCHELLNHUBER, H.-J., CRUTZEN, P.J., CLARK, W.C., CLAUSSEN, M. & HELD, H. (Hrsg.). *Earth System Analysis for Sustainability*. MIT Press, Boston, MA, 341-365.
- LENTON, T.M., CALDEIRA, K.G., FRANCK, S.A., HORNECK, G., JOLLY, A., RABOW, E., SCHELLNHUBER, H.-J., SZATHMÁRY, E., WESTALL, F., ZAVARZIN, G., & ZIMMERMANN-TIMM, H. (2004): Group Report: Long-term Geosphere-Biosphere Coevolution and Astrobiology. In: SCHELLNHUBER, H.-J., CRUTZEN, P.J., CLARK, W.C., CLAUSSEN, M. & HELD, H. (Hrsg.). *Earth System Analysis for Sustainability*. MIT Press, Boston, MA, 111-140.

## Kontakt:

Prof. Dr. Wolfgang Lucht  
 Forschungsfeld Erdsystemanalyse  
 Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung  
[wolfgang.lucht@pik-potsdam.de](mailto:wolfgang.lucht@pik-potsdam.de)

Lucht, W. (2014): *Erdsystemanalyse: Wege zwischen Klimaschutz und Anpassung*. In: Lozán, J. L., Grassl, H., Karbe, L. & G. Jendritzky (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen*. 2. Auflage. Elektron. Veröffent. (Kap. 5.2) - [www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de](http://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de).