

Energieversorgung und Klimawandel

Die mit dem Klimawandel einhergehenden Gefahren sind real. Um sie abzuwenden, ist umfangreiche Forschung und Entwicklung notwendig: eine Bestandsaufnahme.

Walter Blum und Wolfgang Roether

Der durch industrielle Tätigkeit des Menschen hervorgerufene Klimawandel ist heute ebenso erwiesen wie die Tatsache, dass er großenteils auf die ungeheuren Mengen von CO₂ zurückgeht, die die Energieerzeugung mittels fossiler Brennstoffe freisetzt. Dies legt die Frage nahe, wie sich Energieversorgung und eine Begrenzung des Klimaproblems zukünftig in Einklang bringen lassen, eine Frage, die genau die Expertisen des Arbeitskreises Energie (AKE) und des Fachverbands Umweltphysik der DPG betrifft. Daher veranstalteten diese beiden Gruppierungen gemeinsam ein WE-Heraeus-Seminar, in dem international ausgewiesene Spezialisten die vielseitigen Aspekte dieses Themas präsentierten und diskutierten.¹⁾ Dieser Artikel skizziert die wesentlichen Feststellungen des Treffens.

■ *Modellrechnungen geben heute verlässliche und detaillierte Klimaprognosen. Modelle zur Vorhersage sozioökonomischer Auswirkungen befinden sich in der Entwicklung:* Alle Maßnahmen im Zusammenhang mit dem Klimaproblem benötigen Vorhersagen, wie sich das Wetter- und Klimageschehen verändern wird. Die neuesten Vorhersagemodelle umfassen Atmosphäre, Ozean, Kryosphäre und Ökosphäre und sind durch umfassenden Vergleich mit Beobachtungswerten und mit Näherungswerten für frühere Klimaperioden („Proxydaten“) verifiziert. Die heute verbleibenden Unsicherheiten gehen weitgehend auf nicht vollständig geklärte Rückkopplungsprozesse zurück, nicht zuletzt beim Einfluss der Wolken. Außerdem ist die durch die Rechnerkapazitäten bedingte räumliche Auflösung der Modelle immer noch begrenzend. Bisher wurden Gleichgewichte mit vorgegebenen



Abb. 1 Extreme Wetterereignisse wie das Elbhochwasser in Dresden 2002 werden künftig häufiger auftreten.

Randbedingungen („Szenarien“, d. h. vorhergesagte atmosphärische Konzentrationen von CO₂ und weiteren Treibhausgasen, anthropogene Änderungen der Landnutzung und Sonnenaktivität) berechnet. Eine neue Entwicklung geht dahin, von gegebenen Anfangswerten aus die Randbedingungen in ihrer zeitlichen Veränderung zu berücksichtigen. Damit sollen Voraussagen über kürzere Zeiten (Jahre bis Dekaden) sowie eine Bewertung der laufenden Klimaänderungen auf diesen Zeitskalen möglich werden. Eine weitere neue Entwicklung sind sozioökonomische Modelle, die aus dem veränderten Wetter und Klima sowie erfolgten adaptiven Maßnahmen quantitative Aussagen über die sozioökonomischen Auswirkungen liefern sollen. (H. Graßl, K. Hasselmann, J. Marotzke)²⁾

■ *Während in der öffentlichen Wahrnehmung die Erhöhung der globalen Mitteltemperatur im Vordergrund steht, liegt die wirkliche Brisanz in den regionalen klimatischen und ökologischen*

Ausformungen des Klimawandels: Eine Verschiebung der Klimazonen unter Ausdehnung der subtropischen Trockengebiete, der Schwund des arktischen Meereises, das Auftauen von Permafrostböden unter Emission von CO₂ und CH₄, der Artenschwund und extreme Wetterereignisse werden sich noch in unserem Jahrhundert deutlich manifestieren. Bereits heute treten Wetterextrema außerhalb der zuvor gültigen Variationsbreite auf. Für die mitteleuropäischen Sommer sind Hitzewellen vorhergesagt sowie eine insgesamt reduzierte Niederschlagshöhe bei gleichzeitig verstärktem Auftreten intensiver Niederschlagsereignisse. (Abb. 1) Der ebenfalls problematische Meeresspiegelanstieg wird zwar in diesem Jahrhundert im Wesentlichen von der thermischen Ausdehnung des Meerwassers bestimmt sein und noch beherrschbar bleiben. Auf einer Zeitskala von Jahrhunderten wird aber Abschmelzen von Festlandeis (Grönland und Westantarktis) zur Aufgabe großer, tief liegender Landbereiche zwingen, wobei

1) „A Physics Perspective on Energy Supply and Climate Change: Prediction, Mitigation, and Adaptation“, 408. Heraeus-Seminar, Bad Honnef, 26.–29. Mai 2008.

2) Weitere Infos zu den Rednern sind unter www.uni-saarland.de/fak7/fze/ zu finden.

Prof. Dr. Walter Blum, Max-Planck-Institut für Physik, München, gehört dem Vorstand des AKE an.
Prof. Dr. Wolfgang Roether, Universität Bremen, war mehrere Jahre lang Vorsitzender des FV Umweltphysik.

zwischenzeitliche schnelle Schmelzvorgänge nicht ausgeschlossen sind. (H. Graßl, C. Schär)

■ *Paläoklimatische Evidenz stützt die Vorhersagen einer Ausdehnung der Trockengebiete und zeigt die Gefahr von raschen Klimaänderungen auf:* Klimaprognosen besagen, dass sich die subtropischen Trockengebiete aufgrund der zukünftigen Erwärmung ausdehnen werden. Eine paläoklimatische Untersuchung zeigt, dass in diesen Zonen Binnenseen zu Kaltzeiten um ein Vielfaches größer waren als in der heutigen Warmzeit. Ein Gleichgewicht zwischen Zufluss und Verdunstung bestimmt die Größe der Seen. Sicher hat die heutige, höhere Verdunstung die Abnahme der Seengrößen unterstützt, sie reicht aber auf keinen Fall aus, um die gefundenen, gewaltigen Flächenunterschiede (Abb. 2) hervorgerufen. Demnach zeigt der Befund für das jeweilige Einzugsgebiet stark verminderte Niederschläge zu Warmzeiten an, was die Modellvorhersagen unterstützt. Als weitere Unterstützung zeigen Binnenseen in höheren Breiten eine gegenläufige Größenänderung mit der Temperatur, wie dies die Modelle ebenfalls prognostizieren. Ausführliche paläoklimatische Befunde zeigen einwandfrei, dass sich das Klima in den Warmzeiten der vergangenen Million Jahre immer wieder rasch geändert hat. Im Vergleich damit erscheint das Klima unserer gegenwärtigen Warmzeit als ganz

ungewöhnlich stabil. Die Gründe für diesen Unterschied sind unverständlich. Es liegt also nahe, dass unser Klima sehr wohl instabil werden kann, wenn die anthropogene Klimaänderung ein bestimmtes Maß überschreitet, aber Kriterien hierfür können bisher nicht benannt werden. (W. S. Broecker)

■ *Die bis heute vorgeschlagenen technischen Maßnahmen zur Kompensation des Treibhauseffekts („Geo-Engineering“) kommen als Abhilfe des Klimaproblems nicht in Frage:* Jede dieser Maßnahmen ist mit gravierenden globalen Nebenwirkungen verbunden. Im Weltraum ausgebrachte Schattenspendler könnten die Erde, global betrachtet, zwar gezielt abkühlen, aber dies ginge mit einer Umschichtung des Wetter- und Klimageschehens einher, die ihrerseits unabsehbare Folgen hätte. Ähnliches gilt für die Abdunklung durch Aerosole in der Stratosphäre („stratosphärischer Sulfatschirm“). Ein Vergleich mit dem Ausbruch des Pinatubo 1991 (Abb. 3), als dessen Folge sich die Erde im Folgejahr um 0,5 °C abgekühlt hat, zeigt, dass jedes Jahr viele Millionen Tonnen Schwefel in der Stratosphäre notwendig wären, um die zur Mitte dieses Jahrhunderts erwartete CO₂-Zunahme zu kompensieren. Die vorgeschlagene Düngung des Ozeans zur Erhöhung seiner CO₂-Aufnahme durch Algenwuchs würde die oberflächlichen Schichten des Ozeans versäuern und die gesamte Meeresbiologie in

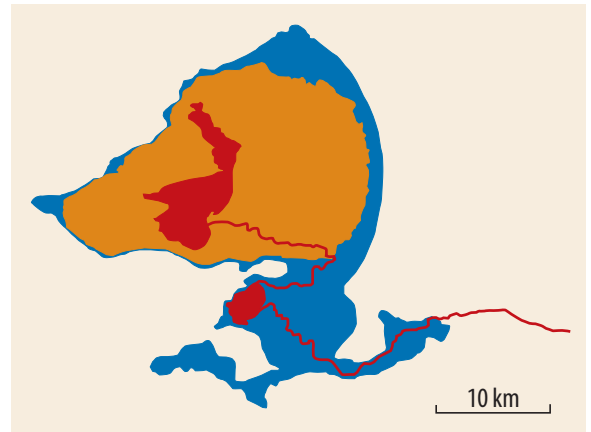


Abb. 2 Die Ausdehnung des argentinischen Binnensees Cari Lauquen hat sich in der Vergangenheit stark verändert (orange: im Eiszeitmaximum vor ca. 18000 Jahren; dunkelblau: vor ca. 15000 Jahren; rot: heute).

Mitleidenschaft ziehen. Zudem sind die Zeitskalen des Verbleibs von so gebundenem CO₂ sowie weitere Nebenwirkungen wie eine Emission von Ozon schädigenden Gasen ungeklärt. Trotz der offensichtlichen Ablehnungsgründe muss sich die Wissenschaft mit solchen Ideen eingehend auseinandersetzen, damit sich derartige Techniken auf der Basis gesicherter Fakten diskutieren lassen. (J. Feichter, K. S. Lackner, T. Leisner)

■ *Trotz aller Maßnahmen wird der Klimawandel in mehr oder weniger großem Ausmaß unabwendbar sein, Gegenmaßnahmen müssen dringend entwickelt werden:* In bestimmten Bereichen machen sich Klimaänderungen, vermischt mit der natürlichen Variabilität, bereits heute bemerkbar. So ist es beispielsweise notwendig, Deiche zu erhöhen als Konsequenz des Meeresspiegelanstiegs, verstärkten Auftretens extremer Wetterlagen, aber auch anderer anthropogener Faktoren wie Flussvertiefungen. Auf mittlere Sicht werden sich die oben genannten Änderungen des Wetter- und Klimageschehens noch in diesem Jahrhundert deutlich über die Variabilität hinaus abzeichnen. Soweit die Erfordernisse an Gegenmaßnahmen nur graduell ansteigen und aktuelle Ereignisse für eine Rückmeldung sorgen (Beispiel: Deichbau), werden die nötigen Maßnahmen immer Zustimmung finden; weniger entwickelte Länder benötigen allerdings Unterstützung. Etwas anderes sind qualitative An-



Abb. 3 Der Pinatubo-Ausbruch im Jahr 1991 hat gezeigt, dass jedes Jahr viele Millionen Tonnen Schwefel in die Stra-

tosphäre gebracht werden müssten, um den Treibhauseffekt zu kompensieren.



Abb. 4 Unweit Sevilla in Südspanien baut die Solar Millennium AG derzeit drei solarthermische Kraftwerke.

derungen wie die Ausdehnung der subtropischen Trockengebiete und erst recht die Folgen der auf längere Zeit zu erwartenden Landverluste infolge des Meeresspiegelanstiegs. Beide werden Wanderungsbewegungen auslösen und Umsiedlungen erforderlich machen, die schwierig zu steuern sein werden. (H. v. Storch)

■ *Die Zukunft der Kohle unter dem Regime des Klimaschutzes ist eng damit verbunden, ob es gelingt, in Kraftwerken das CO₂ abzuspalten und unschädlich einzulagern:* Dazu gibt es mehrere technische Verfahren, darunter den „Oxyfuel“-Prozess³⁾, der sich in einem kleinen 30-MW-Kraftwerk in Norddeutschland im Versuchsstadium befindet. Allen Verfahren ist gemeinsam, dass sie 20 bis 25 Prozent der erzeugten Energie verschlingen. Prinzipiell sind weltweit und in Deutschland auch ausreichend gute Einlagerungsorte für das Kohlendioxid in unterirdischen Gesteinsformationen („Aquiferen“) vorhanden, die Transportkosten

hängen natürlich von den Wegen ab, scheinen aber im Verhältnis zu den Gesamtkosten tragbar zu sein. Ob CO₂-Abspaltung und -Einlagerung wirtschaftlich in dem meistens diskutierten Rahmen von 40 bis 80 Dollar pro Tonne CO₂ möglich sind, muss sich noch zeigen. Obgleich die Experten die Einlagerung für weitgehend sicher ansehen, lässt sich allerdings nicht vorhersehen, ob sich gegen die dann entwickelten Verfahren in der öffentlichen Meinung, die letztlich unvorhersehbar ist, Widerstand bildet. (J. Anderson)

■ *Eine neue Entwicklung hat CO₂-Entzug aus der Umgebungsluft zum Ziel:* Im Vergleich zur CO₂-Sequestrierung an Kraftwerken ist hierbei das Hauptproblem, dass die geringe CO₂-Konzentration in der Atmosphäre riesige Kontaktflächen erfordert. Der Vorteil ist, dass das Verfahren von Ort und Zeit der CO₂-Emissionen entkoppelt ist. Daher würden auch verteilte Quellen erfasst (z. B. Verkehr), und Systeme könnten in der Nähe ge-

eigneter unterirdischer Lagerstätten aufgestellt werden. Das Verfahren verwendet CO₂-Absorption durch ein spezielles Polymer (bei maximierter Oberfläche), das eine wenig aufwändige CO₂-Regeneration erlaubt. Die Entwicklung wird von einem neu gegründeten Unternehmen vorangetrieben, das die ökonomische Machbarkeit in wenigen Jahren nachweisen will. (K. S. Lackner)

■ *Die Zukunft der solarthermischen Kraftwerke hat begonnen – sie werden gebaut:* Zurzeit werden drei 50-MW_e-Parabolrinnen-Kraftwerke in Südspanien errichtet, und das erste (Abb. 4) soll seinen Betrieb im Spätsommer 2008 aufnehmen. Bei diesem ersten europäischen solarthermischen Kraftwerk wird tagsüber ein Salzspeicher erwärmt, sodass die Dampfturbinen noch sieben Stunden nach Sonnenuntergang weiterlaufen können, was die Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit des Kraftwerks entscheidend verbessert. Das großzügig ausgelegte spanische Strom-Einspeisegesetz ermöglicht die Investitionen in Höhe von 300 Millionen Euro pro Kraftwerk. Ein wichtiger Schritt auf dem Weg zu einem wirtschaftlichen Stromimport der unerschöpflichen Sonnenenergie aus den Wüstengebieten Nordafrikas ist getan. Der verlustarme Stromtransport über tausende von Kilometern ist mit der Hochspannungsgleichstrom-Technik heute schon Stand der Technik. (S. Schnatbaum-Laumann)

■ *Die Erweiterung der Stromerzeugung aus dem Wind wird kommen, sobald die seetüchtigen Windkonverter der 5-MW-Klasse technisch*

3) Beim Oxyfuel-Prozess wird der Brennstoff nicht in Luft, sondern in einer Atmosphäre aus reinem Sauerstoff und recyceltem Rauchgas verbrannt.



Abb. 5 Das Elektroauto Tesla Roadster erreicht mit konventionellen Lithium-Ionen-Akkus eine Reichweite von 350 Kilometern.



Abb. 6 Seit über 15 Jahren zeigt dieses Passivhaus in Darmstadt-Kranichstein bereits, dass sich der Energiebedarf von Häusern drastisch reduzieren lässt.

ausgereift sind, ihre Netzanbindung bewerkstelligt und die Finanzierung großer Windparks auf See gesichert ist: Technisch gesehen, sind die kritischen Punkte die Fundamente auf See, der Transport sowie der Aufbau am Ort. Die Integration in die elektrischen Netze ist eng verbunden mit der Möglichkeit der kurzfristigen Windvoraussage. Fossil befeuerte Reservekapazitäten für schwachen Wind müssen auf jeden Fall bereit stehen. Weltweit haben Windkraftanlagen zurzeit eine Kapazität von ca. 100 GW, davon steht ein Viertel in Deutschland. Ein weiteres starkes Wachstum ist zu erwarten. (H.-J. Wagner)

■ *Es ist nicht auszuschließen, dass man eines Tages so viel Elektrizität in einem leichten Fahrzeug speichern kann, dass eine Füllung 40 Litern Benzin entspricht:* Der heute in Autos weit verbreitete Bleiakku hat eine typische Energiedichte von 30 Wh je kg seiner Masse. Die modernsten Lithium-Ionen-Akkus in den tragbaren Rechnern und Telefonen sind häufig schon sechsmal besser und schaffen 200 Wh/kg (Abb. 5). Diese Zahl lässt sich in Zukunft möglicherweise noch einmal um einen Faktor 2, vielleicht sogar um einen Faktor 4 steigern, was dem genannten Benzin-Äquivalent eines 100 kg schweren Akkus entspricht. Aber auch die

für Fahrzeuge typische Hochstrom-Fähigkeit sowie die Lebensdauer über viele Ladungszyklen müssen hinzukommen. Ob Elektrofahrzeuge einmal die heutige Abhängigkeit vom Erdöl auflösen werden, ist zurzeit nicht zu entscheiden, aber eines ist sicher: Was auf diesem vielleicht entscheidenden Gebiet gebraucht wird, ist weitere Forschung. (P. Novak)

■ *Neue landwirtschaftliche Anbauflächen sollten lieber für Nahrungsmittel als für technische Bioenergie genutzt werden, da sie für den zunehmenden Nahrungsbedarf der Welt nötig sind:* Diese Empfehlung steht in einer Studie der Royal Swedish Academy of Sciences. Der weltweit auf 13000 TWh/a geschätzte technische Beitrag der Bioenergie lässt sich vielleicht gerade noch einmal verdoppeln, indem Abfälle aus Forst- und Landwirtschaft systematisch ausgebeutet werden. Zum Schutz des Klimas und der Biodiversität darf nicht mehr Wald gerodet werden als nachwächst. Die bakterielle Umwandlung der Stickstoffdünger in das klimaschädliche Lachgas hat zur Folge, dass die Raps- und Getreidemengen, die zur Herstellung von Ethanol angebaut werden und die nicht ohne Dünger auskommen können, mehr Schaden für das Klima anrichten

als man es durch die Verwendung von Bio-Ethanol verbessern wollte. (S. Kullander)

■ *Ein unterkritischer, Beschleuniger-gestützter Kernreaktor kann den radioaktiven Abfall der herkömmlichen Strom erzeugenden Kernreaktoren entscheidend vermindern, indem er die Transurane mit schnellen Neutronen „verbrennt“ (Transmutation, d. h. Elementumwandlung):* Übrig bleibt eine sehr viel geringere Menge an Strahlungsmaterial mit um Größenordnungen kleineren Lebensdauern, sodass die Endlagerproblematik erheblich reduziert wird. Da solche Kernreaktoren eine schlechte Neutronenausbeute haben, muss ein Beschleuniger ständig Neutronen nachliefern, was wiederum ein Vorteil für die Sicherheit ist, da solche Reaktoren nicht „durchgehen“ können. Die radioaktischen Abfälle müssen aus den verbrauchten Brennstäben der Kernkraftwerke chemisch abgetrennt und in einen solchen Reaktor eingespeist werden. Ein europäisches Projekt in staatlich-industrieller Partnerschaft (EUROTRANS) hat die Aufgabe, erst einen Demonstrationsreaktor von 50 bis 100 MW_{th} und später einen industriellen Prototyp von mehreren hundert MW_{th} zu bauen. Eine zukünftige Stromerzeugung durch eine neue Generation dann inhärent sicherer Kernspaltungs-Kraftwerke könnte ohne Transmutation kaum auskommen. (A. Mueller)

■ *Die Kernfusion könnte ab der Mitte des Jahrhunderts als neue Energiequelle hinzutreten, welche umweltfreundlich und inhärent sicher funktioniert:* Das Fusionsexperiment ITER soll die Plasmabedingungen erreichen, die man für ein Kraftwerk braucht. ITER soll im Gigawatt-Bereich zehnmals so viel Energie erzeugen, wie man hineinstecken muss. Sein Vorgänger JET erreichte 16 MW Fusionsenergie für ebensoviel Heizenergie. Der hohe Teilchenfluss stellt die Ingenieure vor schwierige, aber wohl überwindbare Materialprobleme. Dafür ist ein eigener Hochfluss-Beschleuniger IFMIF (International Fusion Materials Test Facility) geplant. Das erste Fusionskraftwerk im industriellen Maßstab muss auf den Ergebnissen

von ITER und von IFMIF aufbauen. Chris Llewellyn Smith, Direktor der britischen Atomenergie-Behörde, Culham, und Vorsitzender des ITER-Rates, erklärte außer der Fusionsphysik auch, warum er den „fast track“ vorschlägt, bald mit IFMIF anzufangen, damit wir die verheißene unbegrenzte saubere Elektrizität noch zu unseren Lebzeiten bekommen.

■ *Wasserstoff als Energieträger kommt in großem Maßstab nur dann in Frage, wenn grundlegende physikalische Probleme überwunden werden, die einer technisch und wirtschaftlich plausiblen Speichertechnik im Wege stehen.* Vom Prinzip her speicherbar und in der Verbrennung sauber – Wasserstoff wäre ideal. Doch die technische Ausgestaltung eines Speichers stößt auf physikalische Grenzen. Sowohl Kompression als auch Verflüssigung sind extrem energieaufwändig und benötigen zu große und schwere Speicherflaschen. Sicherheitsprobleme kommen hinzu. Die

Hoffnung richtet sich daher auf chemische Speicher. Untersucht werden flüssige Wasserstoffträger wie CH_3OH und NH_3 , sowie insbesondere die Adsorption in kohlebasiertem Material. Trotz viel versprechender früherer Berichte ist inzwischen klar geworden, dass solche Adsorptionspeicher nicht weit genug kommen. Die Leichtmetall-Hydride und die Leichtmetall-Imid/Amid-Systeme sind interessante Kandidaten. Um über die bisherige Grenze der rückholbaren Kapazität von ca. fünf Gewichtsprozenten hinauszugelangen, müssen neuartige Hydride entwickelt werden. (F. Schüth)

■ *Der enorme Energiebedarf für die Heizung von Häusern lässt sich mit neu gebauten Passivhäusern um den Faktor 10 bei gleicher Wohnfläche vermindern:* Das Passivhaus Institut, Darmstadt, entwickelt und zertifiziert solche Baupläne (Abb. 6). Entscheidende Details der Bauhülle und der Frischluftorganisation erfordern technische Mittel,

die nicht besonders kompliziert sind. Es gibt schon Häuser mit rund 10 000 Wohneinheiten. Ihre Bewohner beantworten die Fragen nach dem Komfort-Gefühl überaus positiv. – Für das Energieproblem sind die Einsparung und die Investition in effiziente Anwendungen ebenso wichtig wie der Ersatz alter Energiequellen durch umweltfreundliche und bezahlbare neue. (J. Schnieders)

Das Symposium⁴⁾ hat zweierlei klar gemacht: Die Gefahren, die die Klimawissenschaft herausgefunden hat und mit Augenmaß und Genauigkeit benennt, sind real. Die Chancen, die von der Wissenschaft der Energietechnik aufgezeigt werden, sind ebenfalls real, aber sie erfordern noch umfangreiche und äußerst aufwändige Forschung und Entwicklung. Es ist zu hoffen, dass Politik, Wirtschaft und Wissenschaft weltweit zusammenwirken, damit die Menschheit in dem globalen Energie- und Klimaproblem bestehen kann.

4) Wir danken der Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung für ihre großzügige finanzielle Unterstützung. Um das Ergebnis des Seminars auch einem größeren Kreis zugänglich zu machen, sollen die Vorträge in Buchform bei Springer erscheinen.