Deutsche Physikalische Gesellschaft – Arbeitskreis Energie

KLIMA

und

ENERGIE KONZEPTE

8 Vorträge und 5 Abstracts der Tagung Berlin (2005) Herausgeber: M. Keilhacker

eingeschlossen das Symposium 'Klima und Energie' zusammen mit dem Fachverband Umweltphysik

DPG Deutsche Physikalische Gesellschaft e. V.
Hauptstrasse 5, D-53604 Bad Honnef

Weitere Exemplare können bezogen werden von
< Martin.Keilhacker@SoftDesign.de >
oder über die Geschäftsstelle der DPG
< dpg@dpg-physik.de>

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort 5

Eckhard Rebhan
Kosmologischer Ursprung der für irdische Zwecke nutzbaren Energie 9

Joachim U. Knebel und Th. Walter Tromm 25
Sollte sich Deutschland an der Entwicklung neuer Kernreaktoren der Generation IV beteiligen?

Wolfgang Steiger 53
Biogene synthetische Kraftstoffe – Basis nachhaltiger Mobilität

Stephan Kohler 69
Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse der Studie *Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie in Deutschland an Land und Offshore bis zum Jahr 2020* (dena-Netzstudie)

Stefan Glunz 93
Stand und Perspektiven der Photovoltaik

Brigitte Falkenburg 109
Unsere Verantwortung für das Klima – Was können wir wissen?

Christian-D. Schönwiese 125
Klimawandel im Industriezeitalter – Beobachtungsindizien und Ursachen

Fritz Vahrenholt 145
Energieversorgung – eine zentrale Frage des 21. Jahrhunderts

Axel Kranzmann 153
Stromerzeugung ohne CO_2-Ausstoss in die Erdatmosphäre (Abstract)

Hans Joachim Schellnhuber 154
Der Klimawandel: Diagnose, Prognose, Therapie (Abstract)

Thomas Stocker 155
800,000 Years of Greenhouse Gas Concentrations from an Antarctic Ice Core (Abstract)

Martin Visbeck 156
Climate Variability and Change in the Atlantic Sector (Abstract)

Peter G. Brewer 157
Experiments on the Ocean Disposal of Fossil Fuel CO_2 (Abstract)

Anschriften der Vortragenden und des Herausgebers 158

Liste der Vorträge 1996 – 2004 161

VORWORT

Der Arbeitskreis Energie (AKE) der Deutschen Physikalischen Gesellschaft beschäftigt sich seit vielen Jahren mit den verschiedenen Möglichkeiten der Erzeugung und Nutzung von Energie und mit ihren Auswirkungen auf das Klima. Einen Schwerpunkt dieser Arbeit bildet die Gestaltung eines eigenen Vortragsprogramms für die Jahrestagungen der DPG und die anschließende Herausgabe der Vorträge in einem Sammelband. Im Einstein Jahr 2005 fand die Jahrestagung der DPG mit allen Fachverbänden und Arbeitskreisen in Berlin statt. Der Arbeitskreis Energie war dort mit sechs eingeladenen energiespezifischen Vorträgen und einem gemeinsam mit dem Fachverband Umweltphysik veranstalteten Symposium *Klima und Energie* mit sechs weiteren eingeladenen Vorträgen vertreten. Der vorliegende Band enthält sieben dieser Beiträge, sowie den Vortrag *Unsere Verantwortung für das Klima*, der im Rahmen der Öffentlichen Sonntagsvorträge gehalten wurde. Fast alle Vorträge – auch die hier nicht veröffentlichten – können in ihrer Power-Point-Version im AKE-Archiv [1] aufgerufen werden.

Im ersten energiespezifischen Beitrag befasst sich Eckhard Rebhan, Universität Düsseldorf, mit dem kosmologischen Ursprung der für irdische Zwecke nutzbaren Energie. Er zeigt, dass die riesige Menge der heute in Strahlung und Materie des Universums enthaltenen und für uns nutzbaren Energie in einer Art Phasenübergang aus dunkler Energie entstanden ist und, da die Gesamtmenge dunkler Energie anfänglich verschwindend klein war, buchstäblich aus dem Nichts kam. – Der zweite Vortrag, in dem Axel Kranzmann, Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), Berlin, einen Überblick über den Stand der Entwicklung CO_2-freier Kraftwerke gab, liegt nicht in schriftlicher Form vor, es existieren aber Abstract und Power-Point-Version. – Im nächsten Beitrag berichtet Joachim U. Knebel, Forschungszentrum Karlsruhe, über die internationale Forschungsinitiative zur Entwicklung künftiger Kernreaktoren der Generation IV. Ziel dieser Initiative ist es, innerhalb der nächsten 15 bis 20 Jahre innovative Kernreaktoren zu entwickeln, die den Kriterien erhöhte Sicherheit, Minimierung des radioaktiven Abfalls, erhöhte Widerstandsfähigkeit gegen Proliferation und Steigerung der Wirtschaftlichkeit genügen.

Die folgenden drei Beiträge beschäftigen sich mit verschiedenen Formen erneuerbarer Energie. Zunächst berichtet Wolfgang Steiger, Volkswagen AG, Wolfsburg, über das große Potential flüssiger synthetischer Kraftstoffe. Sie können aus einer Vielzahl unterschiedlicher Primärenergieträger (Gas, Kohle, Biomasse) hergestellt werden und erlauben wegen ihrer hohen stofflichen Reinheit und guten *Designbarkeit* eine erhebliche Reduktion der Schadstoffemissionen. Dies und die geplante Weiterentwicklung der Antriebsaggregate haben es den Europäischen Automobilherstellern erlaubt, sich zu verpflichten, die CO_2-Emission von Neuwagen bis 2008 um 25% auf 140g/km zu reduzieren. Am Ende der Entwicklung, allerdings frühestens in 20 Jahren, steht der Übergang zur Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnik. – Es folgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse der dena-Netzstudie, über die Stephan Kohler, Deutsche Energie-Agentur (dena), Berlin, berichtete. Nach der Studie soll zwar die Integration der für 2015 vorgesehenen Windenergieleistung von 36 GW (davon 9.8 GW auf See) möglich sein, jedoch den Neubau von 850 km Hochspannungsnetzleitungen erfordern und mit CO_2-Vermeidungskosten von 95 bis 168 €/t CO_2 im Jahr 2007 (sinkend auf 41 bis 77 €/t CO_2 im Jahr 2015) verbunden sein. Eine zweite Studie soll noch offene Fragen untersuchen und eine Betrachtung des Gesamtzeitraums bis 2025 ermöglichen. – Schließlich gibt Stefan Glunz, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg, einen Überblick über Stand und Perspektiven der Photovoltaikforschung. Beim *Arbeitspferd Kristalline Siliziumsolarzelle* hat die Reduzierung der Zelldicke (Einsparung von teurem Ausgangsmaterial) bei gleichzeitiger Optimierung der Zellstruktur (Erhöhung des Wirkungsgrads) die Herstellungskosten wesentlich verringert. Man erwartet außerdem, dass optische Konzentratorsysteme auf der Basis von hocheffizienten III-V-Solarzellen in Zukunft eine größere Rolle spielen werden und neuartige Zellkonzepte zur besseren Ausnutzung des gesamten Sonnenspektrums eine massive Erhöhung des Wirkungsgrades bringen werden.

Als Auftakt zu den Beiträgen des Symposiums *Klima und Energie* beschäftigt sich Brigitte Falkenburg, Institut für Philosophie der Universität Dortmund, mit der *Frage Unsere Verantwortung für das Klima – Was können wir tun?*. Es geht dabei vorrangig um Problemanalyse und nicht um Ausführungen zum gegenwärtigen Stand der Klimaforschung. Zunächst wird analysiert, was Verantwortung heißt und wie dieser Begriff in Bezug auf Umweltprobleme zu verstehen ist. Dann beschäftigt sich der Beitrag mit der Frage, was es mit dem Klima als Gegenstand der Verantwortung auf sich hat und wie groß unser Wissen bezüglich der Folgen unserer Einwirkungen auf das Klima ist. Zuletzt wird diskutiert, in wie weit man Verantwortung für das Klima übernehmen kann.

Von den Beiträgen zum Symposium *Klima und Energie* liegen nur zwei, die von Christian-D. Schönwiese und Fritz Vahrenholt, in schriftlicher Form vor, es existieren aber von allen Vorträgen ein Abstract und die Power-Point-Version. Der Vollständigkeit halber seien im Folgenden alle Vorträge in ihrer ursprünglichen Reihenfolge kurz erwähnt.

Im ersten Vortrag unternahm Hans Joachim Schellnhuber, Tyndall Centre for Climate Change Research, UK, eine systematische Analyse (Diagnose, Prognose und Therapie) des Klimaproblems. Als aussichtsreichste und volkswirtschaftlich noch verkraftbare Therapie empfahl er eine Doppelstrategie aus Emissionsreduktionsmaßnahmen zur Begrenzung der Erderwärmung auf ein *tolerierbares* Maß, unterstützt durch Anpassungsmaßnahmen hinsichtlich der verbleibenden *unvermeidbaren* Klimaexkursionen. – Anschließend berichtete Thomas Stocker, Universität Bern, über einen von Europäischen Forschern in der Antarktis gewonnenen 3200 Meter langen Eisbohrkern, der mit 800.000 Jahren und acht Eiszeiten die längste bisher zugängliche Zeitspanne der Klimageschichte erfasst. Die Analyse des Kerns zeigt unter anderem, dass die CO_2-Konzentrationen heute um 27% höher sind als es jemals während der letz-

ten 650.000 Jahre der Fall war. – Zum Thema *Heutige Klimaänderungen* stellte zunächst Martin Visbeck, Leibniz-Institut für Meereswissenschaften, Kiel, das internationale Forschungsprogramm *Climatic Variability and Predictability* vor, das es zum Ziel hat, die aktuellen Veränderungen in der klimawirksamen Wechselwirkung zwischen den Ozeanen und der Atmosphäre aufzuklären. Es zeigt sich, dass die fossilen Brennstoffe in den letzten Jahrzehnten bereits einen beträchtlichen Einfluss auf dieses Verhalten hatten. – Dann gab Christian-D. Schönwiese, Institut für Atmosphäre und Umwelt der Universität Frankfurt, eine Übersicht der Fakten und Indikatoren für die heutige Klimaänderung und setzte sie in Bezug zu ihren Ursachen. Modellrechnungen und statistische Abschätzungen anhand der Beobachtungsdaten zeigen, dass der Mensch bereits jetzt als Klimafaktor dominiert, während zum Beispiel der durch Schwankungen der Sonnenaktivität hervorgerufene Effekt auf die Erdtemperatur um etwa den Faktor 10 kleiner als der anthropogene Treibhauseffekt ist. – Für die langfristige Lagerung von CO_2 kommt neben geologischen Formationen auch der Ozean in Frage. Peter G. Brewer, Monterrey Bay Aquarium Research Institute, Kalifornien, machte die interessante Feststellung, dass der Ozean gegenwärtig in jeder Sekunde annähernd 1000 Tonnen anthropogenes CO_2 netto aufnimmt. Ehe man jedoch diese Möglichkeit der Endlagerung im Ozean in die Überlegungen mit einbeziehen kann, müssen noch umfangreiche Untersuchungen der ökologischen Folgeerscheinungen im Umfeld solcher Depositionen durchgeführt werden. – Zum Abschluss zieht Fritz Vahrenholt, REpower Systems AG, Hamburg, praktische Schlussfolgerungen für eine nachhaltige Energieversorgung. Als Wege aus der Energiefalle sieht er für Deutschland die Verlängerung der Laufzeiten der Kernkraftwerke, die Renaissance der Kohle in Form CO_2-freier Kohlekraftwerke, Effizienzsteigerungen beim Energie- und Materialverbrauch und den Ausbau der heimischen erneuerbaren Energieträger Wind und Biomasse.

Während die Vorträge jedes einzelnen Tagungsbandes immer nur bestimmte Aspekte des Energieproblems behandeln können, stellen die Bände in ihrer Gesamtheit eine vielseitige und umfassende Informationsquelle zu den Energiefragen unserer Zeit dar. Im Anhang sind deshalb alle Vorträge der Jahre 1996 – 2004 zusammengestellt.

Zum Schluss möchte ich, auch im Namen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, allen vom Arbeitskreis Energie eingeladenen Rednern sehr herzlich für ihre interessanten Vorträge und die zusätzliche Mühe, diese auch in schriftlicher Form zugänglich zu machen, danken. Mein ganz besonderer persönlicher Dank gilt wieder Frau Barbara Blum für die ausgezeichnete technische und künstlerische Gestaltung des Tagungsbandes.

Martin Keilhacker (München)

[1] http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE-Archiv/DPG2005-AKE Berlin/Links DPG2005.htm

Kosmischer Ursprung und Zeitentwicklung der für irdische Zwecke nutzbaren Energie

Eckhard Rebhan, Heinrich-Heine-Universität,
Institut für Theoretische Physik II, Universitätsstr. 1, D 40225 Düsseldorf

6. Mai 2005

Zusammenfassung Die Expansion des Universums wird durch drei Sorten Energie bestimmt: 1. Energie von Strahlung und Materie (inklusive dunkler Materie), 2. die für das Abbremsen der kosmischen Expansion verantwortliche Gravitationsenergie und 3. sogenannte dunkle Energie. Die von der Menschheit genutzten Energiequellen sind alle auf die unter 1. aufgeführten Energien zurückzuführen. Bei der Gravitationsenergie handelt es sich um negative Feldenergie. Sie und die dunkle Energie sind nicht für irdische Zwecke nutzbar. Nur in der – bis heute andauernden – materiedominierten Ära der kosmologischen Evolution bleibt die im heute sichtbaren Universum enthaltene Gesamtenergie der Materie für sich erhalten. In den frühen Phasen des Universums dagegen gilt Energieerhaltung nur für die Summe der drei angeführten Gesamtenergien, und nach den Einsteinschen Feldgleichungen bzw. deren Spezialisierung auf unser Universum (Friedmann-Lemaitre-Gleichung) ist diese Summe gleich null. Bei reinen Urknall-Modellen des Universums ohne dunkle Energie wird die Gesamtenergie von Strahlung und Materie in der strahlungsdominierten Frühphase des Universums umso größer, je weiter man in der Zeit zurückgeht, um schließlich im Urknall zu divergieren. Gleichzeitig geht die Gravitationsenergie wegen des Verschwindens der Summe der Gesamtenergien gegen minus unendlich.

In der modernen Kosmologie werden Urknallsingularitäten und damit auch die angeführten Gesamtenergie-Singularitäten dadurch vermieden, daß einem Beinahe-Urknall (Zustand wie der einer Urknall-Lösung kurz nach dem Urknall) eine Phase explosiver Expansion, eine sogenannte Inflation, vorausgeht. Diese wurde durch dunkle Energie sehr hoher, aber endlicher Konzentration angetrieben. Zu Beginn der Inflation war die Gesamtmenge an dunkler Energie wegen der mikroskopischen Kleinheit des Universums verschwindend klein, nahm jedoch aufgrund der schnellen Expansion trotz abnehmender Konzentration sehr schnell zu. Wegen der Erhaltung der Summe aller Gesamtenergien mußte das durch eine gleich schnelle Zunahme des Betrags der Gravitationsenergie kompensiert werden. Die Phase der Inflation wurde dadurch beendet, daß die dunkle Energie in einer Art Phasenübergang durch Zerfall in Energie von Strahlung und Materie überführt wurde. Die riesige Menge der heute in Strahlung und Materie des Universums enthaltenen und für irdische Zwecke nutzbaren Energie stammt also letztlich aus dunkler Energie. Da deren Gesamtmenge anfänglich verschwindend klein war, kann man sagen, daß die für uns nutzbare Energie buchstäblich aus dem Nichts kam.

1 Einleitung

Für die mathematische Beschreibung der dynamischen Entwicklung des Universums und der in diesem enthaltenen Energien werden die Friedmann-Lemaitre-Gleichungen benötigt, die für ein räumlich flaches Universum

$$\dot{a}^2(t) = \frac{1}{3M_{Pl}^2}(\varrho_m + \varrho_s + \varrho_d)\, a^2 \tag{1}$$

und

$$\ddot{a}(t) = -\frac{1}{6M_{Pl}^2}\left[\varrho_m + \varrho_s + \varrho_d + 3(p_m + p_s + p_d)\right] a \tag{2}$$

lauten. In ihnen ist t die kosmische Zeit, $a(t)$ der Skalenfaktor des Universums, $\dot{a}(t)$ und $\ddot{a}(t)$ bezeichnen die erste und zweite Zeitableitung, $M_{Pl}{\approx}0,02$ mg ist die Planck-Masse, ϱ_s, ϱ_m sowie ϱ_d sind die Massendichten von Strahlung, Materie sowie dunkler Energie und p_s, p_m sowie p_d die entsprechenden Drücke. Wird die Lichtgeschwindigkeit wie in den Gleichungen (1)–(2) gleich eins gesetzt, so stimmen Massen- und Energiedichte überein. Der heute allgemein favorisierte Fall eines räumlich flachen Universums wurde gewählt, um die durch das sogenannte Flachheitsproblem (siehe z.B. [1]) bedingte extreme Feinabstimmung der Anfangsbedingungen zu vermeiden.
Gemäß den Gleichungen (1)–(2) wird die Expansion des Universums von drei Sorten Energie bestimmt: 1. Energie von Strahlung und Materie (unter Einschluß von dunkler Materie) mit den Dichten ϱ_s bzw. ϱ_m, 2. dunkle Energie der Dichte ϱ_d und 3. die für die Abbremsung der Expansion des Universums verantwortliche Gravitationsenergie (siehe Gleichung (17)). Die von der Menschheit genutzten Energiequellen gehen auf die Energie der Materie zurück, und hier wiederum im wesentlichen auf den kleinen Bruchteil der leuchtenden Materie.
Der heutige metrische Radius des heute sichtbaren Universums, der sogenannte Teilchenhorizont, ist

$$d_0 = \alpha_0 t_0\,, \tag{3}$$

wobei nach dem für die hiesigen Rechnungen benutzten Modell des Universums $t_0{=}14{\cdot}10^9$ a das gegenwärtige Alter des Universums ist und α_0 den Wert 4 besitzt (siehe Ende von Abschn. 3). Dementsprechend ist das Volumen des gegenwärtig sichtbaren Universums unter der Annahme räumlicher Flachheit

$$V_0 = V(t_0) = \frac{4\pi}{3} d_0^3 = \frac{4\pi}{3}\alpha_0^3\, t_0^3\,. \tag{4}$$

(Im folgenden werden alle zeitabhängigen Funktionen bei der Auswertung zum Zeitpunkt t_i mit f_i bezeichnet.) Messungen zufolge ist die gegenwärtige mittlere Dichte der leuchtenden Materie

$$\varrho_{lm0} = h^2{\cdot}4{\cdot}10^{-28}\,\mathrm{kg\,m^{-3}} \qquad \text{mit} \qquad 0,5 \le h \le 1\,. \tag{5}$$

Die Masse und die Energie der in V_0 enthaltenen leuchtenden Materie sind

$$M_{lm0} = E_{lm0} = \varrho_{lm0} V_0\,. \tag{6}$$

Für den in dieser Arbeit gewählten repräsentativen Wert $h{=}0,75$ haben sie in SMI-Einheiten die Werte $14,2{\cdot}10^{52}$ kg bzw. $1,3{\cdot}10^{52}$ EJ. (Die Energie ist etwa das $0,3{\cdot}10^{50}$-fache des jährlichen Energieverbrauchs der Menschheit.)

In der materiedominierten Ära, die den größten Teil der bisherigen Dauer des Universums ausmacht, kann die Materie nicht-relativistisch behandelt werden und genügt der aus (1)–(2) mit p_m=0 folgenden Gleichung

$$\varrho_m a^3(t) = \varrho_{m0} a_0^3 \,. \tag{7}$$

Da das Volumen $V(t)$ des heute sichtbaren Universums zu früheren Zeiten t durch

$$V(t) = x^3(t)\, V_0 \tag{8}$$

mit

$$x(t) = \frac{a(t)}{a_0} \tag{9}$$

gegeben war, genügt die in dem expandierenden Volumen $V(t)$ enthaltene Energie der leuchtenden Materie nach(6)–(9) der Gleichung

$$E_{lm}(t) = \varrho_{lm}(t)\, V(t) = \varrho_{lm}(t)\, \frac{a^3(t)}{a_0^3}\, V_0 = \varrho_{lm0} V_0 = E_{lm0} \,.$$

Dies bedeutet, daß sie in der nicht-relativistischen Ära eine Erhaltungsgröße ist.
In den Zeiten davor, als die Materie noch so heiß war, daß sie relativistisch behandelt werden muß, erfüllte sie statt Gleichung (7) wie Strahlung die Zustandsgleichung p_i=$\varrho_i/3$ bzw.

$$\varrho_i(t)\, a^4(t) = \text{const} = \varrho_{i1} a_1^4 \qquad \text{für} \qquad i = m, s \,, \tag{10}$$

wobei t_1 der späteste Zeitpunkt ist, zu dem Materie noch relativistisch behandelt werden muß. (In dieser Arbeit wird das relativ kurze Zeitintervall, in dem sich der Übergang von relativistischem zu nicht-relativistischem Verhalten vollzieht, der Einfachheit halber auf null zusammengeschrumpft. Dies bedeutet, daß für $t \le t_1$ die Gültigkeit von Gleichung (10) und für $t > t_1$ die Gültigkeit von Gleichung (7) angenommen wird.) Aus (8)–(10) erhalten wir

$$E_{lm}(t) = \varrho_{lm}(t)\, V(t) = \frac{\varrho_{lm1}\, a_1^4\, V_0}{a(t)\, a_0^3} = \frac{\varrho_{lm1}\, x_1^4\, V_0}{x(t)} \,, \tag{11}$$

und aus (1) ergibt sich mit (9) und $\varrho_d \ll \varrho = \varrho_m + \varrho_s$ (siehe kurz vor Gleichung (23)) Gleichung (23) bzw. (mit (9)–(10)) die Differentialgleichung

$$\dot{x}(t) = \sqrt{\frac{\varrho_1}{3}}\, \frac{x_1^2}{M_{Pl}\, x(t)} \,,$$

die durch

$$x(t) = x_1 \left(\frac{\varrho_1}{3}\right)^{1/4} \sqrt{\frac{2t}{M_{Pl}}} \tag{12}$$

gelöst wird. Wird diese Lösung in Gleichung (11) eingesetzt, so folgt

$$E_{lm}(t) \sim \frac{1}{\sqrt{t}} \,. \tag{13}$$

Dies bedeutet, daß die Energie der leuchtenden Materie für t=0, den Zeitpunkt des Urknalls, divergiert. In reinen Urknall-Modellen des Universums haben also nicht nur die Massen- und Energiedichten beim Urknall eine Singularität, sondern auch die Gesamtenergien, und das, obwohl das Volumen des sichtbaren Universums nach (8) und (12) für t=0 verschwindet.

Dieses Ergebnis bedeutet keine Verletzung der Energieerhaltung. Die Friedmann-Lemaitre Gleichungen (1)–(2) folgen aus den Einsteinschen Feldgleichungen

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R\, g_{\mu\nu} = -\frac{1}{M_{Pl}^2} \left[T_{\mu\nu} + T_{\mu\nu}^{(d)} \right] \,, \tag{14}$$

die um einen Energie-Impuls-Tensor für ein räumlich homogenes Skalarfeld Φ=$\Phi(t)$ erweitert sind, das die dunkle Energie beschreiben soll (siehe z.B. [2]). $R_{\mu\nu}$ ist der Ricci-Tensor, R der Krümmungsskalar, $T_{\mu\nu}$ der Energie-Impuls-Tensor für Strahlung und Materie und

$$T_{\mu\nu}^{(d)} = (\partial_\mu \Phi)(\partial_\nu \Phi) - \mathcal{L}\, g_{\mu\nu} \qquad \text{mit} \qquad \mathcal{L} = g^{\alpha\beta} (\partial_\alpha \Phi)(\partial_\beta \Phi) - V(\Phi) \tag{15}$$

der Energie-Impuls-Tensor für die dunkle Energie. Der metrische Tensor ist so gewählt, daß in einem lokal orthonormalen Inertialsystem g_{00}=1 und g_{11}=g_{22}=g_{33}=−1 gilt, $V(\Phi)$ ist eine Funktion von Φ, die frei wählbar ist, wenn auf die Renormierbarkeit der zugehörigen Quantenfeldtheorie verzichtet wird. Aus Gleichung (15) ergeben sich als Massen- bzw. Energiedichte und als Druck der dunklen Energie

$$\varrho_d = T_{00}^{(d)} = \dot{\Phi}^2 - \mathcal{L} = \frac{\dot{\Phi}^2}{2} + V(\Phi), \qquad p_d = \mathcal{L} = \frac{\dot{\Phi}^2}{2} - V(\Phi) \,. \tag{16}$$

Nach Gleichung (20), die später aus (1)–(2) und (16) für den Fall ϱ_s=ϱ_m=0 abgeleitet wird, ist die "Geschwindigkeit" $\dot{\Phi}$ aufgrund des "Reibungsterms" $3H\dot{\Phi}$ im allgemeinen so klein, daß $\varrho_d \approx V(\Phi) \ge 0$ und $p_d \approx -V(\Phi) \le 0$ gilt. Wegen Φ=$\Phi(t)$ ist die physikalische Wirkung des Skalarfeldes Φ im wesentlichen die gleiche wie die einer dynamischen kosmologischen Konstanten $\Lambda(t)$=$V(\Phi(t))$, die in Gleichung (16) durch einen Tensor $T_{\mu\nu}^{(\Lambda)} = -\Lambda(t)\, g_{\mu\nu}$ anstelle von $T_{\mu\nu}^{(d)}$ repräsentiert würde.
Gleichung (1), die wir in der Form

$$\varrho_m + \varrho_s + \varrho_d + \varrho_g = 0 \qquad \text{mit} \qquad \varrho_g = -\frac{3 M_{Pl}^2\, \dot{a}^2(t)}{a^2} \tag{17}$$

schreiben können, ist die 0-0-Komponente der Feldgleichungen (14). Dimensionsmäßig und ihrer Definition entsprechend sind ϱ_m, ϱ_s und ϱ_d Massen- und Energiedichten, und dementsprechend hat auch ϱ_g die Dimension einer Massen- und Energiedichte. Bei der Ableitung von (1)–(2) aus Gleichung (14) ergibt sich, daß der Term ϱ_g von deren linker Seite stammt. Diese beschreibt die Krümmung der Raum-Zeit, die ihrerseits in der Allgemeinen Relativitätstheorie das Gravitationsfeld darstellt. ϱ_g kann daher als Massen- bzw. Energiedichte des kosmischen Gravitationsfeldes aufgefaßt werden. Da ϱ_m, ϱ_s und ϱ_d positiv sind, muß ϱ_g nach Gleichung (17) negativ sein. (Im Anhang wird anhand des Grenzfalls vektorieller Newtonscher Gravitationsfelder dargelegt, warum die Gravitationsenergie negativ sein muß.)
Wird Gleichung (17) mit dem Volumen $V(t)$ multipliziert, welches das gegenwärtig sichtbare Universums zur Zeit t einnahm, so erhalten wir

$$E_m(t) + E_s(t) + E_d(t) + E_g(t) = 0 \,. \tag{18}$$

Darin ist E_i=$\varrho_i V(t)$ die in $V(t)$ enthaltene Gesamtenergie der Materie für i=m, Strahlung für i=s, dunklen Energie für i=d und kosmischen Gravitation für i=g. Gleichung (18) bedeutet, daß die für die Expansion des Universums verantwortlichen Gesamtenergien im

allgemeinen nicht separat erhalten werden, sondern nur in ihrer Summe. Damit diese verschwindet, muß daher zusammen mit E_m und E_s auch E_g beim Urknall eine Singularität aufweisen.
Urknall-Singularitäten sind als sehr spezielle und nicht weiter erklärbare Anfangsbedingungen von Urknall-Modellen des Universums aufzufassen und haben die Physiker nicht gerade begeistert. Das Konzept einer kosmischen Inflation, die einem Beinahe-Urknall (Zustand einer Urknall-Lösung kurz nach dem Urknall) vorangeht, hat nicht nur zur Lösung von Problemen wie dem der verblüffenden Homogenität kausal unverbundener Teilregionen des Universums und dem der Galaxienentstehung beigetragen, sondern auch die Singularitäten der Urknall-Modelle beseitigt. Der Zweck dieser Arbeit ist es, zu zeigen, wie sich die verschiedenen Gesamtenergien der Gleichung (18) zeitlich entwickelt haben nach einem Modell, das durch das Einbeziehen einer vorangehenden Inflation die Urknallsingularitäten vermeidet.

2 Benutztes kosmologisches Modell

Ohne den Rückgriff auf topologische Raffinessen ist ein räumlich flaches Universum unendlich ausgedehnt, während ein expandierendes Universum, das zugleich flach und kausal verbunden ist, endlich sein muß. Das einfachste Modell für die Geometrie eines räumlich flaches Universum endlicher Ausdehnung erhält man daher, wenn man dieses als endlichen Ausschnitt eines unendlich ausgedehnten, räumlich flachen Universums auffaßt. Ein attraktives Modell, das die Eigenschaften Flachheit, Expansion und kausale Verbundenheit miteinander kombiniert, liefert das Konzept der 1983 von A. Linde eingeführten chaotischen Inflation [3]-[4]. Nach diesem hat sich unser Universum im Teilgebiet eines Super-Universums entwickelt, in dem an allen Orten und zu allen Zeiten Fluktuationen eines Feldes Φ von der Art eines Higgs-Feldes auftreten. Dieses wird als Inflaton bezeichnet und kann zu einer inflationären Aufblähung des Gebiets führen, in dem die Fluktuation lokalisiert ist, sofern diese gewisse Kriterien erfüllt. (Wenn sie das nicht tut, zerfällt sie innerhalb kürzester Zeit, was auf die meisten Fälle zutrifft. In einem unendlich ausgedehnten Super-Universum gibt es jedoch immer noch genügend viele günstige Fluktuation, aus denen sich ein Universum wie unseres entwickelt oder ein diesem ähnliches.) Wir nehmen dementsprechend an, daß sich unser Universum aus einer Fluktuation in einem winzigen Teilgebiet eines Super-Universums entwickelt hat. Innerhalb eines Raum-Zeit-Gebiets mit dem Durchmesser einer Planck-Länge führt die quantenmechanische Unschärferelation zu Energiefluktuationen der Größenordnung $\Delta E \sim M_{PL}$ und Energiedichtefluktuationen der Größenordnung $\Delta\varrho \sim M_{Pl}^4$. Wir nehmen daher als Anfangsbedingung für das Inflaton an, daß es innerhalb einer Kugel vom metrischen Radius einer Planck-Länge L_{Pl} gleichförmig (Φ=$\Phi(t)$) mit der Dichte ϱ=M_{Pl}^4 verteilt war. Der Einfachheit halber gehen wir außerdem davon aus, daß anfänglich keine Strahlung und Materie vorhanden waren.
Mit Hilfe eines reellen Skalarfeldes, das die durch Gleichung (16) gegebenen Werte von Dichte und Druck besitzt, können wir eine inflationäre Expansion beschreiben. Indem wir ϱ_s=ϱ_m=p_s=p_m=0 setzen, Gleichung (1) nach t differenzieren und Gleichung (2) einsetzen, erhalten wir

$$\dot{\varrho}_d + 3H(\varrho_d + p_d) = 0\,. \tag{19}$$

Werden hierin die Gleichungen (16) eingesetzt, so ergibt sich nach Herauskürzen des Faktors $\dot{\Phi}$ für $\Phi(t)$ die Differentialgleichung

$$\ddot{\Phi} + 3H\dot{\Phi} + V'(\Phi) = 0\,. \tag{20}$$

Man erhält eine inflationäre Lösung, wenn das Feld $\Phi(t)$ zur Zeit t=0 mit einem Wert startet, bei dem das Potential $V(\Phi)$ hoch ist, und von dort aus zu niedrigeren Werten "hinunterrollt". Üblicherweise wird angenommen, daß das solange vonstatten geht, bis ein Minimum von $V(\Phi)$ erreicht wird, um das $\Phi(t)$ nach Gleichung (20) gedämpfte Oszillationen ausführt. Bei diesem Schwingungsprozeß gibt das Feld $\Phi(t)$ durch eine in Gleichung (20) nicht enthaltene Kopplung den Großteil seiner Energie an Materie- und Strahlungsfelder ab, wobei parametrische Resonanz eine wesentliche Rolle spielt (siehe [5]). In dieser Arbeit wird dieser Prozeß als diskontinuierlicher Phasenübergang behandelt, bei dem die Dichte ϱ_d des Feldes Φ zur Zeit t_2>0 sprunghaft in Materie- und Strahlungsdichte überführt wird. Wir nehmen an, daß $\varrho_d(t)$ nach diesem Übergang den heutigen Wert ϱ_{d0} annimmt, d.h.

$$\varrho_d(t) = \varrho_{d0} \qquad \text{für} \qquad t_2 < t \le t_0\,, \tag{21}$$

während die kombinierte Dichte ϱ=ϱ_m+ϱ_s von Strahlung und relativistischer Materie um den gleichen Betrag zunimmt, um den $\varrho_d(t)$ abnimmt, so daß wir

$$\lim_{\epsilon\to 0} \varrho(t_2+\epsilon) \approx \lim_{\epsilon\to 0} [\varrho(t_2+\epsilon) + \varrho_{d0}] = \lim_{\epsilon\to 0} \varrho_d(t_2-\epsilon) \tag{22}$$

haben. Die hier beim ersten Schritt eingeführte Näherung ist deshalb möglich, weil die heutige Dichte ϱ_{d0} um viele Größenordnungen kleiner als die nach dem Phasenübergang erreichte gemeinsame Dichte ϱ von Strahlung und Materie ist, und das bleibt auch so für eine ganze Weile nach dem Phasenübergang. Wir erhalten daher für die dynamische Entwicklung des Universums aus Gleichung (1) unter Benutzung der Definition (9) die Gleichung

$$\dot{x}^2(t) = \frac{1}{3M_{Pl}^2}\,\varrho\,x^2 \qquad \text{mit} \qquad \varrho = \varrho_m + \varrho_s\,. \tag{23}$$

In der auf den Phasenübergang folgenden Ära ist die Temperatur der Materie so hoch, daß diese sich relativistisch verhält. Strahlung und Materie können daher gleichartig behandelt werden, beide genügen der Zustandsgleichung (10), die mit der Definition (9) in die Form

$$\varrho(t)\,x^4(t) = \varrho_1 x_1^4 \tag{24}$$

gebracht werden kann.
Wenn durch die mit der Expansion des Universums verbundenen Abkühlung die Temperatur hinreichen niedrig geworden ist, müssen Strahlung und Materie separat behandelt werden. Während Strahlung bei allen Temperaturen der Gleichung (10) genügt, muß der Zustand nicht-relativistischer Materie durch Gleichung (7) beschrieben werden, unter Benutzung der Definition (9) haben wir also zwei Zustandsgleichungen

$$\varrho_m(t)\,x^3(t) = \varrho_{m0}\,, \qquad \varrho_s(t)\,x^4(t) = \varrho_{s0}\,, \tag{25}$$

die dann bis zum heutigen Zeitpunk t_0 gelten. Wie schon erwähnt treffen wir die vereinfachende Annahme, daß das relativ kurze Zeitintervall des Übergangs von relativistischem zu nicht-relativistischem Verhalten gleich null ist. Dieser Übergang vollzieht sich etwa um den Zeitpunkt herum, zu dem Strahlung und Materie die gleiche Dichte haben. Nach [6] ist die zugehörige Temperatur

$$T_1 = 65500\,\Omega_0\,h^2\,\mathrm{K} \qquad \text{mit} \qquad 0{,}5 \le h \le 1\,, \tag{26}$$

wobei

$$\Omega(t) = \frac{\varrho_m(t)}{\varrho_k(t)} \tag{27}$$

gilt. Hierin ist

$$\varrho_k(t) = 3M_{Pl}^2\, H^2(t) \tag{28}$$

mit dem Hubble Parameter

$$H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \tag{29}$$

die kritische Gesamtdichte, für die das Universum räumlich flach wird. Wir nehmen daher an, daß der sprunghafte Übergang von relativistisch zu nicht-relativistisch zu der Zeit t_1 stattfindet, zu der die Temperatur den in Gleichung (26) angegebenen Wert annimmt. Für alle Zeiten $t{>}t_2$ erfüllt die Temperatur $T(t)$ die Zustandsgleichung $T(t)\,a(t){=}\text{const}{=}T_0\,a_0$, mit (9) haben wir daher $T_1\,x_1{=}T_0$. Hieraus, aus Gleichung (26) und mit dem ziemlich genau bekannten Wert $T_0{=}2,73\,\text{K}$ der gegenwärtigen Temperatur der kosmischen Hintergrundstrahlung erhalten wir für die Zeit t_1 die implizite Gleichung

$$x(t_1) = x_1 = \frac{4,2{\cdot}10^{-5}}{\Omega_0\, h^2}\,. \tag{30}$$

3 Lösung für die dynamische Entwicklung des Universums

Für den gegenwärtigen Zustand des Universums erhalten wir aus den Gleichungen (1) und (29)

$$H_0^2 = \frac{1}{3M_{Pl}^2}(\varrho_{m0} + \varrho_{s0} + \varrho_{d0})\,.$$

Zusammen mit der aus (28) folgenden Gleichung $\varrho_{k0}{=}3M_{Pl}^2\,H_0^2$ führt das zu

$$\varrho_{m0} + \varrho_{s0} + \varrho_{d0} = \varrho_{k0} \tag{31}$$

und

$$\frac{1}{3M_{Pl}^2} = \frac{H_0^2}{\varrho_{k0}}\,. \tag{32}$$

Mit Hilfe von (9) und (32) bringen wir Gleichung (1) jetzt in die Form

$$\dot{x}^2(t) = \frac{H_0^2}{\varrho_{k0}}(\varrho_m + \varrho_s + \varrho_d)\,x^2\,, \tag{33}$$

und für spätere Zwecke führen wir die Definitionen

$$\varrho_{m0} = \Omega_0\varrho_{k0}\,, \qquad \varrho_{s0} = \omega_0\varrho_{k0}\,, \qquad \varrho_{d0} = \lambda_0\varrho_{k0} \tag{34}$$

ein, die mit Gleichung (31) zu

$$\Omega_0 + \omega_0 + \lambda_0 = 1 \tag{35}$$

führen.

Inflationäre Anfangsphase. In der inflationären Anfangsphase gilt $\varrho_m{\equiv}\varrho_s{\equiv}0$, und Gleichung (33) reduziert sich auf

$$\frac{\dot{x}^2}{x^2} = H^2 = \frac{H_0^2}{\varrho_{k0}}\,\varrho_d\,, \tag{36}$$

wobei im ersten Schritt Gleichung (29) benutzt wurde. Differenziert man diese Gleichung nach t, benutzt die Gleichungen (16) und (19) und zieht einen Faktor H heraus, so erhält man

$$\dot{\Phi}(t) = -\frac{2\,\varrho_{k0}\,\dot{H}(t)}{3\,H_0^2\,\dot{\Phi}(t)} = -\frac{2\,\varrho_{k0}}{3\,H_0^2}\,H'(\Phi)\,. \tag{37}$$

Im letzten Schritt wurde dabei angenommen, daß sich die Zeitabhängigkeit von H implizit durch eine explizite Abhängigkeit von Φ ausdrücken läßt. Gleichung (37) kann mit dem Ansatz

$$H(\Phi) = H(0)\,\mathrm{e}^{-\alpha\Phi} \tag{38}$$

gelöst werden, der zu $H'(\Phi) = -\alpha H(\Phi)$ führt. Hiermit wird aus Gleichung (37)

$$\dot{\Phi}(t) = \frac{2\,\alpha\,\varrho_{k0}\,H(0)}{3\,H_0^2}\,\mathrm{e}^{-\alpha\Phi}\,,$$

und die Lösung ist

$$\Phi(t) = \frac{1}{\alpha}\ln(1+\gamma t) \qquad \text{mit} \qquad \gamma = \frac{2\alpha^2\varrho_{k0}\,H(0)}{3H_0^2}\,.$$

Mit diesem Ergebnis erhalten wir aus Gleichung (36)

$$\varrho_d(t) = \frac{\varrho_{k0}}{H_0^2}\,H^2 = \frac{\varrho_{k0}\,H^2(0)}{H_0^2\,(1+\gamma t)^2}\,. \tag{39}$$

Nach dem von uns benutzten Modell ist die Dichte $\varrho_d(t)$ zur Zeit $t{=}0$ gleich der Planck-Dichte ϱ_{Pl}. Hiermit erhalten wir aus Gleichung (39)

$$\frac{\varrho_{k0}\,H^2(0)}{H_0^2} = \varrho_{Pl}$$

und

$$\varrho_d(t) = \frac{\varrho_{Pl}}{(1+\gamma t)^2} \qquad \text{mit} \qquad \gamma = \frac{2\alpha^2\sqrt{\varrho_{Pl}\varrho_{k0}}}{3H_0}\,. \tag{40}$$

Einsetzen in Gleichung (36), Ziehen der Wurzel und anschließende Integration liefert

$$\ln\frac{x(t)}{x(0)} = H_0\sqrt{\frac{\varrho_{Pl}}{\varrho_{k0}}}\int_0^t \frac{dt'}{1+\gamma t'} = H_0\sqrt{\frac{\varrho_{Pl}}{\varrho_{k0}}}\,\frac{\ln(1+\gamma t)}{\gamma}$$

oder

$$x(t) = x(0)(1+\gamma t)^\beta \qquad \text{mit} \qquad \beta = \frac{H_0\sqrt{\varrho_{Pl}/\varrho_{k0}}}{\gamma}\,. \tag{41}$$

Die Zeit t_2, zu der nach unserem Modell der größte Teil der dunklen Energie in Energie von Strahlung und Materie überführt wird, muß vor der Entstehung der Quarks liegen, jedoch

so spät, daß sich keine merkliche Dichte unerwünschter Relikte wie magnetischer Monopole entwickeln konnte. Diese Bedingung wird durch die Wahl $\lim_{\epsilon\to 0}\varrho_d(t_2-\epsilon) = 10^{80}\,\mathrm{kg/m^3}$ oder

$$\lim_{\epsilon\to 0}\varrho_d(t_2-\epsilon) = F\,\varrho_{Pl} \qquad \text{mit} \qquad F = 2{\cdot}10^{-17} \tag{42}$$

erfüllt. Aus (40) und (42) ergibt sich für die Zeit t_2 des Phasenübergangs

$$t_2 = \frac{1}{\gamma}\left(\frac{1}{\sqrt{F}} - 1\right). \tag{43}$$

Hiermit und mit $x_2{=}x(t_2)$ gemäß Gleichung (41) erhalten wir

$$x(0) = F^{\beta/2}\,x_2\,. \tag{44}$$

Relativistische Ära. In der relativistischen Ära erfüllt die Dichte $\varrho{=}\varrho_m{+}\varrho_s$ Gleichung (24), wobei x_1 durch (30) gegeben ist. In der nicht-relativistischen Ära erfüllt ϱ_m die erste der Gleichungen (25), womit wir $\varrho_{m1}x_1^3{=}\varrho_{m0}{=}\Omega_0\,\varrho_{k0}$ erhalten, und mit der zweiten Gleichung ergibt sich $\varrho_{s1}\,x_1^4{=}\varrho_{s0}{=}\omega_0\,\varrho_{k0}$ mit der Folge

$$\varrho_1 = \varrho_{m1} + \varrho_{s1} = \varrho_{k0}\left(\frac{\Omega_0}{x_1^3} + \frac{\omega_0}{x_1^4}\right) = \frac{\varrho_{k0}}{x_1^4}\,(\Omega_0 x_1 + \omega_0)\,.$$

Hiermit erhalten wir aus Gleichung (24)

$$\varrho(t) = \frac{\varrho_{k0}\,(\Omega_0 x_1 + \omega_0)}{x^4(t)}\,. \tag{45}$$

Wird dies und Gleichung (42) in die Bedingung (22) für den Phasenübergang eingesetzt und die letztere nach x_2 aufgelöst, so ergibt sich

$$x_2 = \left[\frac{\varrho_{k0}\,(\Omega_0 x_1 + \omega_0)}{F\varrho_{Pl}}\right]^{1/4}. \tag{46}$$

Für $t_2{\le}t{\le}t_1$ und $\Omega_0{\ge}0,2$ erhalten wir mit Hilfe der Gleichungen (35), (45) und $\varrho_d{=}\varrho_{d0}{=}\lambda_0\,\varrho_{k0}$ aus $x{\le}x_1$ mit (30) die Bedingung

$$\frac{\varrho_d}{\varrho} = \frac{\lambda_0 x^4}{\Omega_0 x_1 + \omega_0} \le \frac{\lambda_0 x_1^3}{\Omega_0} \le 10^{-10}\,,$$

die bedeutet, daß ϱ_d in der relativistischen Ära vernachlässigt werden kann. Hiermit folgt aus Gleichung (33) $\dot{x}^2(t) = H_0^2\varrho\,x^2/\varrho_{k0}$ oder mit (45)

$$\dot{x} = \frac{H_0\sqrt{\Omega_0 x_1 + \omega_0}}{x}\,. \tag{47}$$

Die Lösung dieser Gleichung ist

$$x(t) = x_2\left[1 + \frac{2H_0\sqrt{\Omega_0 x_1 + \omega_0}}{x_2^2}\,(t - t_2)\right]^{1/2}. \tag{48}$$

Durch Inversion und unter Vernachlässigung von x_2 gegenüber x_1 sowie t_2 gegenüber t_1 – Gleichung (30) und (46) bzw. (43) und das Ergebnis (49) machen das möglich –, erhalten wir für die Zeit t_1, zu der $x(t_1){=}x_1$ gilt,

$$t_1 = \frac{x_1^2}{2H_0(\Omega_0 x_1 + \omega_0)^{1/2}}\,. \tag{49}$$

Materiedominierte Ära. In der nicht-relativistischen Ära, die kurz nach dem Zeitpunkt t_1 materiedominiert wird ($\varrho_m{\gg}\varrho_s$), müssen die Gleichungen (25)benutzt werden. Mit diesen und den Definitionen (34) erhalten wir aus Gleichung (33)

$$\dot{x}(t) = H_0\frac{\sqrt{\omega_0 + \Omega_0 x + \lambda_0 x^4}}{x}\,. \tag{50}$$

Die Integration dieser Gleichung liefert die implizite Lösung

$$t(x) = t_1 + \frac{1}{H_0}\int_{x_1}^{x}\frac{x'\,dx'}{\sqrt{\omega_0 + \Omega_0 x' + \lambda_0 x'^4}}\,. \tag{51}$$

Aus dieser ergibt sich als heutiges Alter des Universums

$$t_0 = t(1) = t_1 + \frac{1}{H_0}\int_{x_1}^{1}\frac{x'\,dx'}{\sqrt{\omega_0 + \Omega_0 x' + \lambda_0 x'^4}}\,. \tag{52}$$

Da $t(x)$ monoton mit x zunimmt, kann die explizite Lösung $x(t)$ leicht durch numerische Inversion aus $t(x)$ erhalten werden.

Teilchenhorizont und Bestimmung des Faktors β. Der gegenwärtige metrische Abstand der Grenze des sichtbaren Universums von uns ist gleich der Strecke, die ein frei fliegendes Photon während der dem heutigen Alter des Universums entsprechenden Zeitspanne zurückgelegt hätte, wobei mit einberechnet werden muß, daß sowohl bereits zurückgelegte Strecken als auch noch vor dem Photon liegende Strecken durch die Expansion des Universums vergrößert werden. Er wird als Teilchenhorizont bezeichnet und ist durch die Formel

$$d_0 = \int_0^{t_0}\frac{dt}{x(t)} \tag{53}$$

gegeben. In dieser müssen die für die verschiedenen Äras erhaltenen Lösungen eingesetzt werden. Unter Benutzung von (41), (47) und (50) erhalten wir so

$$d_0 = d_{02} + d_{01} + d_{00} \tag{54}$$

mit

$$\begin{aligned} d_{02} &= \int_0^{t_2}\frac{dt}{x(0)(1+\gamma t)^\beta} = \frac{1}{\gamma\,x(0)(1-\beta)}\left[F^{\frac{\beta-1}{2}} - 1\right] \\ &\approx \frac{F^{-\beta/2}}{H_0\sqrt{\varrho_{Pl}/\varrho_{k0}}\,(1-1/\beta)x_2}\,, \end{aligned} \tag{55}$$

wobei die Gleichungen (43) und (44) eingesetzt, die Eigenschaft $F{\ll}1$, die zweite der Gleichungen (41) sowie das später verifizierte Ergebnis $\beta{>}2$ mit der Folge $F^{(\beta-1)/2}{\ll}1$ benutzt wurden, außerdem mit

$$d_{01} = \int_{x_2}^{x_1}\frac{dt}{x(t)} = \int_{x_2}^{x_1}\frac{dx}{x(t)\dot{x}(t)} = \int_{x_2}^{x_1}\frac{dx}{H_0\sqrt{\Omega_0 x_1 + \omega_0}} = \frac{x_1 - x_2}{H_0\sqrt{\Omega_0 x_1 + \omega_0}} \tag{56}$$

und mit

$$d_{00} = \int_{x_1}^{1} \frac{dx}{x(t)\dot{x}(t)} = \frac{1}{H_0}\int_{x_1}^{1} \frac{dx}{\sqrt{\omega_0 + \Omega_0 x + \lambda_0 x^4}}\,. \tag{57}$$

Der in der Lösung (41) eingeführte Exponent β kann als einzige bislang unbestimmt gebliebene Größe angesehen werden, denn γ kann mit Hilfe der zweiten der Gleichungen (41) durch ihn und der im Ansatz (38) eingeführte Faktor α kann mit Hilfe der zweiten der Gleichungen (40) durch γ ausgedrückt werden. Durch Vorgabe der Länge $d(t)=x(t)\,d_0$ des heutigen Teilchenhorizonts zur Zeit $t=0$ (Expansionsbeginn) können wir β festlegen. Eine dem hier benutzten Modell angepaßte Wahl ist

$$d(0) = x(0)\,d_0 = L_{Pl}\,. \tag{58}$$

Werden hierin die Gleichungen (54)–(57) eingesetzt, so erhalten wir unter Benutzung der Gleichungen (44), (41), (40), (30) und (46) für $x(0)$, γ, α, x_1 und x_2, der empirischen Werte

$$\Omega_0 = 0,2\,, \quad \omega_0 = \frac{2,6 * 10^{-5}}{h^2}\,, \quad h = 0,75\,, \quad \varrho_{k0} = h^2{\cdot}1,9{\cdot}10^{-26}\,\mathrm{kg\,m^{-3}} \tag{59}$$

sowie mit

$$\varrho_{Pl} = 5,16{\cdot}10^{96}\,\mathrm{kg\,m^{-3}}\,, \qquad L_{Pl} = 1,62{\cdot}10^{-35}\,\mathrm{m} \tag{60}$$

nach numerischer Auswertung des Integrals für d_{00} den Wert $\beta=4,10256$. Es bietet sich an, stattdessen den glatten Wert

$$\beta = 4 \tag{61}$$

zu wählen und dafür die Bedingung (58) leicht in

$$d(0) = x(0)d_0 = \lambda\, L_{Pl} \tag{62}$$

abzuwandeln. Mit der Wahl (61) erhalten wir aus (41), (40) und (44)

$$\gamma = \frac{H_0}{4}\sqrt{\frac{\varrho_{Pl}}{\varrho_{k0}}}\,, \qquad \alpha = \sqrt{\frac{3}{8\varrho_{k0}}}\,H_0\,, \qquad x(0) = F^2 x_2\,. \tag{63}$$

Die numerische Auswertung von Gleichung (52) bzw. der Gleichungen (54)–(57) liefert $t_0=14{\cdot}10^9$ Jahre bzw. $56{\cdot}10^9$ Lichtjahre, während sich aus Gleichung (62) $\lambda=4,45$ ergibt.

4 Berechnung der Gesamtenergien

Aus dem Radius $d(0)$, den das heute sichtbare Universum zur Zeit $t=0$ hatte, erhalten wir für das Volumen $V(t)$ zu dieser Zeit

$$V(0) = \frac{4\pi}{3}\lambda^3 L_{Pl}^3\,. \tag{64}$$

Durch die Expansion des Universums wird daraus zur Zeit t das Volumen

$$V(t) = \frac{4\pi\, x^3(t)}{3\, x^3(0)}\,\lambda^3 L_{Pl}^3\,. \tag{65}$$

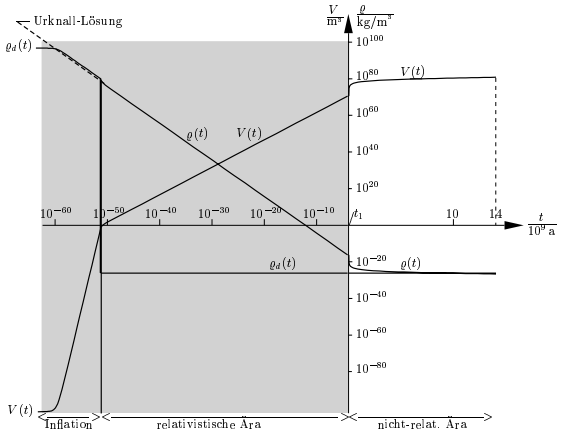

Abbildung 1: Zeitentwicklung der Dichten $\varrho_d(t)$, $\varrho(t)=\varrho_m(t)+\varrho_s(t)$ und des Volumens $V(t)$. Man beachte, daß für die Zeitachse zwei verschiedene Skalen benutzt sind: In dem grau unterlegten Gebiet linker Hand ist die Zeit logarithmisch aufgetragen, rechts davon linear. Für Dichte und Volumen ist dagegen durchgängig eine logarithmische Skala gewählt. Die gestrichelte Kurve links oben repräsentiert die Dichte $\varrho(t)$ einer reinen Urknall-Lösung und divergiert im Urknall.

Die Gesamtmasse bzw. -energie der im Volumen $V(t)$ enthaltenen Energiesorte i (Dichte ϱ_i) ist

$$E_i(t) = \varrho_i(t)V(t) = \frac{4\pi\, x^3(t)}{3\, x^3(0)}\,\lambda^3\, L_{Pl}^3\,\varrho_i(t)\,. \tag{66}$$

Hierin müssen für das Zeitintervall $0\le t<t_2$ für die dunkle Gesamtenergie die Gleichungen (40) und (41) mit (61) und (63) eingesetzt werden. Da während dieser Ära $\varrho_m\equiv\varrho_s\equiv 0$ gilt, stammt die einzige weitere Energie von der Gravitation und ist nach (18) durch

$$E_g(t) = -E_d(t) \tag{67}$$

gegeben.
Für das Zeitintervall $t_1\le t\le t_2$ ergibt sich die Gesamtmasse bzw. -energie $E(t)$ von Strahlung und Materie mit $\varrho_i(t)\to\varrho(t)$ aus (66), indem man (45) und (48) einsetzt, während sich die dunkle Gesamtenergie durch Einsetzen von Gleichung (21) und der letzten der Gleichungen (34) ergibt, wobei nach (35) $\lambda_0=1-\Omega_0-\omega_0$ gilt. Die Gravitationsenergie ergibt sich aus Gleichung (18) zu

$$E_g(t) = -E_d(t) - E(t)\,. \tag{68}$$

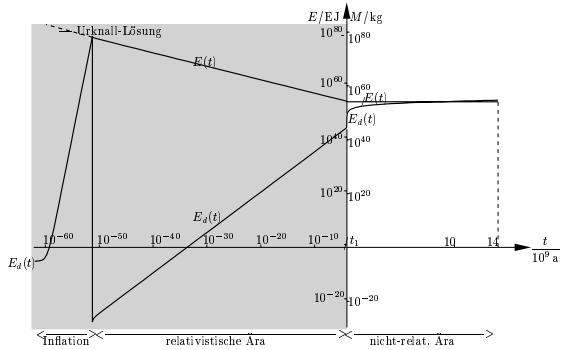

Abbildung 2: Zeitentwicklung der im heute sichtbaren Universum enthaltenen Gesamtmassen bzw. -energien $E_i(t)$ (mit Ausnahme der kosmischen Gravitationsenergie). (Siehe Abb. 1 bezüglich der zwei für t benutzten Zeitskalen.) Die gestrichelte Kurve links oben repräsentiert die zu einer reinen Urknall-Lösung gehörige Energie $E(t)$ von Strahlung und Materie und divergiert zur Zeit des Urknalls.

Schließlich erhalten wir für das Zeitintervall $t_1<t\leq t_0$ aus den Gleichungen (8) und (25) mit $V_0=4\pi d_0^3/3$ für die Gesamtenergie von Strahlung und Materie

$$E(t) = [\varrho_m(t) + \varrho_s(t)]\, x^3(t)\, V_0 = \left[\varrho_{m0} + \frac{\varrho_{s0}}{x(t)}\right]\, V_0 = \frac{4\pi d_0^3}{3}\, \left[\varrho_{m0} + \frac{\varrho_{s0}}{x(t)}\right]\,. \qquad (69)$$

Dabei ist $x(t)$ die Inverse der durch Gleichung (51) definierten Funktion $t(x)$, und für die dunkle Energie erhalten wir

$$E_d(t) = \frac{4\pi\,\varrho_{d0}\, d_0^3}{3}\, x^3(t)\,. \qquad (70)$$

In Abb. 1 ist für die verschiedenen Äras die zeitliche Entwicklung der Dichten $\varrho_i(t)$ und des Volumens $V(t)$ dargestellt. Während für $\varrho_i(t)$ und $V(t)$ durchgängig eine logarithmische Darstellung gewählt wurde, ist die Zeit nur für das in der Abbildung grau unterlegte Zeitintervall $t\leq t_1$ logarithmisch aufgetragen, für das Zeitintervall $t_1\leq t\leq t_0$ dagegen linear. Die Dichte $\varrho_d(t)$ der dunklen Energie nimmt von $t=0$ bis $t=t_2$ monoton ab und bleibt nach ihrem im Phasenübergang erfolgten Sprung auf den Wert ϱ_{d0} zeitlich konstant. Nach dem Phasenübergang nehmen die Dichten $\varrho_m(t)$ und $\varrho_s(t)$ sowie ihre Summe $\varrho(t)$ monoton ab, während $V(t)$ aufgrund der Expansion des Universums permanent zunimmt.
In Abb. 2 ist die zeitliche Entwicklung der im gegenwärtig sichtbaren Universum enthaltenen Gesamtmassen bzw. -energien $E_i(t)$ (mit Ausnahme der Gravitationsenergie) aufgetragen. $E_d(t)$ beginnt in der Inflationsära mit einem der Masse weniger Milligramm entsprechenden Wert und nimmt trotz Abnahme der Dichte $\varrho_d(t)$ sehr schnell zu, weil diese Abnahme durch

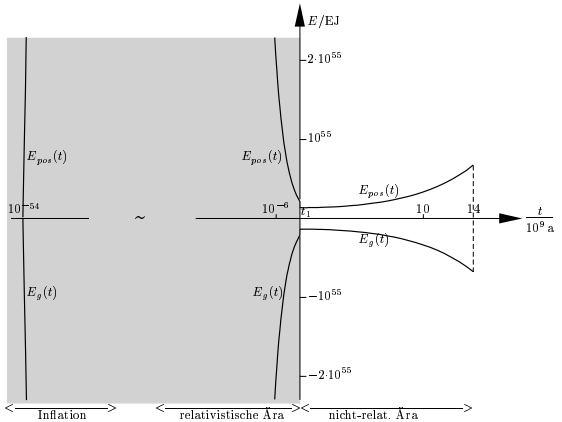

Abbildung 3: Zeitentwicklung der Energien $E_g(t)$ und $E_{pos}(t)=E_d(t)+E_m(t)+E_s(t)$ in linearer Auftragung, jedoch wie in Abb. 1 mit unterschiedlicher Zeitskala vor und nach t_1. Die kurz nach t_1 beginnende und bis heute andauernde Zunahme von $E_{pos}(t)$ beruht im wesentlichen auf der Zunahme von $E_d(t)$.

die inflationäre Zunahme des Volumens bei weitem überkompensiert wird. Die zur Energiezunahme führende Arbeitszufuhr wird vom negativen Druck $p_d\approx -V(\Phi)$ des Inflatons geleistet, und dasselbe gilt auch für die viel kleineren Werte $E_d(t)$ nach dem Phasenübergang. Der positive Druck relativistischer Teilchen führt bei der Expansion des Universums dagegen zu einer Arbeitsabgabe und damit Abnahme der Gesamtenergie $E(t)=E_s(t)+E_m(t)$ von Strahlung und Materie. Wegen der durch Gleichung (18) ausgedrückten Energieerhaltung muß diese Energie im wesentlichen der Gravitationsenergie zugute kommen, die daher zunimmt. Da diese jedoch negativ ist, bedeutet ihre Zunahme den Übergang zu weniger negativen Werten bzw. kleineren Absolutwerten. Die auf der Zustandsgleichung (7) beruhende Erhaltung der Energie $E_m(t)$ für $t\geq t_1$ kommt dadurch zustande, daß der Druck von Teilchen nicht-verschwindender Ruhemasse in der nicht-relativistischen Ära vernachlässigt werden kann, weshalb in Gleichung (2) $p_m\ll\varrho_m$ gilt.
In Abb. 3 sind $E_g(t)$ und $E_{pos}(t)=E_d(t)+E_m(t)+E_s(t)$ linear (also nicht-logarithmisch) über einer Zeitachse aufgetragen, die wie in den Abbildungen 1 und 2 vor und nach t_1 unterschiedlich skaliert ist. Die Abnahme der Gravitationsenergie bis zur Zeit t_2 und ihre Zunahme danach können durch die Wirkung eines Drucks des tensoriellen Gravitationsfeldes und die Expansion des Universums erklärt werden. Werden in Gleichung (2) die Dichten mit

Hilfe von Gleichung (1) eliminiert, so ergibt sich

$$p_m + p_s + p_d + p_g = 0 \qquad \text{mit} \qquad p_g = M_{Pl}^2 \left(\frac{2\ddot{a}}{a} + \frac{\dot{a}^2}{a^2} \right) . \tag{71}$$

p_g hat die Dimension eines Drucks, stammt von der linken Seite der Feldgleichungen (14) ab und kann daher als Druck des kosmischen Gravitationsfeldes interpretiert werden. Während der Inflation gilt $p_m{=}p_s{=}0$ und nach Gleichung (71) daher $p_g{=}{-}p_d{\approx}V(\Phi){\geq}0$. Ein positiver Druck leistet während der Expansion des Universums Arbeit, weshalb die Gravitationsenergie abnehmen muß. Nach dem Phasenübergang wird p_d vernachlässigbar klein und $p_g{=}{-}(p_m{+}p_s){\leq}0$, der gravitative Druck leistet negative Arbeit und die Energie des Gravitationsfeldes nimmt daher zu.

Anhang: Negativität der gravitativen Feldenergie

Um zu einem einfachen Verständnis dafür zu gelangen, warum die Energie von Gravitationsfeldern negativ ist, betrachten wir den Newtonschen Grenzfall des vektoriellen Gravitationsfeldes, das von einer Masse m erzeugt wird, die gleichmäßig in einer vom Radius $r_s{-}\epsilon$ bis zum Radius r_s reichenden Kugelschale verteilt ist. Im Gebiet $0{\leq}r{\leq}r_s{-}\epsilon$ verschwindet das Gravitationsfeld, weshalb dieses auch keine Feldenergie enthält. Wir nehmen an, die Dicke ϵ der Kugelschale ist so klein, daß die in ihr enthaltene Feldenergie gegenüber der außerhalb von ihr lokalisierten Feldenergie vernachlässigt werden kann. Jetzt vergleichen wir zwei Fälle, Fall 1 mit $r_s{=}r_1$ und Fall 2 mit $r_s{=}r_2{\gg}r_1$. Da das Gravitationsfeld im Bereich $r{>}r_2$ in beiden Fällen dasselbe ist, überschreitet der Absolutwert der Gesamtenergie des Feldes im ersten den des zweiten Falls um den Betrag der im Gebiet $r_1{\leq}r{\leq}r_2$ enthaltenen Energie. Da das Gravitationsfeld andererseits in der die Masse m enthaltenden Kugelschale auf das Kugelzentrum hin gerichtet ist, leisten die auf die Massenverteilung einwirkenden Gravitationskräfte bei der Verschiebung der Kugelschale von $r_s{=}r_2$ nach $r_s{=}r_1$ Arbeit, die der Gravitationsenergie verloren gehen muß. Deren Abnahme ist mit der Zunahme ihres Betrages jedoch nur vereinbar, wenn sie negativ ist.

Literatur

[1] A. R. Liddle and D. H. Lyth, *Cosmological Inflation and Large-Scale Structure*, Cambridge University Press, Kap. 3 (2000)

[2] Kap. 14 von [1]

[3] A. D. Linde, Phys. Lett. B **129**, 177 (1983)

[4] A. D. Linde, *Particle Physics and Inflationary Cosmology*, Harwood, Chur Switzerland (1990)

[5] J. Traschen and R. Brandenberger, Phys. Rev. D **42**, 2491 (1990)

[6] Kap. 2 von [1]

SOLLTE SICH DEUTSCHLAND AN DER ENTWICKLUNG NEUER KERNREAKTOREN DER GENERATION IV BETEILIGEN?

Joachim U. Knebel
Fachgruppe Thermo- und Fluiddynamik, Kerntechnische Gesellschaft

Th. Walter Tromm
Fachausschuss Kerntechnik, VDI-Gesellschaft Energietechnik (GET)

1. Die Ausgangssituation

1.1 Weltweit

Ende vergangenen Jahres 2004 waren weltweit in 31 Ländern 441 Kernkraftwerke mit einer Bruttoleistung von insgesamt rund 386 GWe (Nettoleistung 367 GWe) im nuklearen Betrieb. Im Jahr 2004 nahmen 7 Kraftwerke mit einer Gesamtleistung von 6 000 MWe brutto (5 860 MWe netto) den Betrieb auf [1], und zwar je ein Kraftwerk in der Volksrepublik China, Japan, der Republik Korea, Russland und zwei in der Ukraine.

In den USA haben Ende 2004 insgesamt 30 Anlagen die Verlängerung der Betriebslizenz für weitere 20 Jahre erhalten, was für diese Anlagen nun eine Betriebszeit von 60 Jahren ergibt. 18 weitere Verfahren der Lizenzverlängerung laufen.

Mit den 441 in Betrieb befindlichen Anlagen waren im Jahr 2004 nur 4 Anlagen weniger in Betrieb als im bisher führenden Jahr 1997. Nach der vorläufigen Statistik stand mit rund 385 854 GWe brutto aber mehr nukleare Stromerzeugungskapazität weltweit zur Verfügung als je zuvor. Die in den vergangenen Jahren neu in Betrieb genommenen Kernkraftwerke sowie die Leistungserhöhungen bei laufenden Anlagen stellen erhebliche zusätzliche Kapazitäten zur Verfügung.

1.2 Europa

Fünf der zehn Staaten, die am 1. Mai 2004 der Europäischen Union (EU) beitraten, nutzen die Kernenergie. Der europäische Energiemix zur Stromerzeugung wurde deshalb mit dem Beitritt der zehn neuen Mitglieder im Mai 2004 kaum verändert.

Erstmals seit 13 Jahren wurde im Jahr 2002 in einem westeuropäischen Land wieder eine Entscheidung für den Neubau eines Kernkraftwerks gefällt. Nach einer internationalen Ausschreibung entschied sich der Bauherr im Jahr 2003 für den *European Pressurized Water Reactor (EPR)* mit ca. 1 600 MWe Leistung des Herstellerkonsortiums *Framatome ANP* (nuclear island) und *Siemens AG* (conventional island). Die Anlage soll im Jahr 2009 in Betrieb gehen. Im Einklang mit den Bestimmungen des Euratom-Vertrags hat die Europäische Kommission den Bau eines neuen Kernkraftwerks in Finnland befürwortet.

In Frankreich teilte das Stromversorgungsunternehmen EDF mit, dass in der Normandie ab dem Jahr 2007 der erste EPR des Landes als Einstieg in diese neue Reaktorgeneration errichtet werden soll. Der für Umbaumaßnahmen seit 1998 abgeschaltete *Schnelle Brutreaktor Phoenix* (250 MWe) nahm in 2003 seinen Betrieb wieder auf. Bis 2008 sind dort durch den Betreiber CEA umfangreiche Forschungs- und Testprojekte vorgesehen.

Endgültig außer Betrieb genommen wurden im Jahr 2004 fünf Kernkraftwerke mit einer Gesamtleistung von 1 500 MWe brutto, und zwar vier in Großbritannien (jeweils 50 MWe) und eines in Litauen (1 300 MWe).

1.3 Deutschland

Fünf der zehn weltweit besten Produktionsergebnisse wurden im vergangenen Jahr von deutschen Kernkraftwerken erzielt. Mit einer Jahreserzeugung von 12,24 Milliarden Kilowattstunden (kWh) wurde das Kernkraftwerk Isar 2 bereits zum sechsten Mal in Folge Weltmeister in der Stromproduktion bei einer Leistung von 1 475 Megawatt. Die Zahlen verdeutlichen die internationale Spitzenposition der deutschen Kernkraftwerke bei Sicherheit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit. Mit der vergleichsweise niedrigen Zahl von 18 Reaktoren produzierte Deutschland 2004 die vierthöchste Strommenge hinter den USA, Frankreich und Japan. Damit leistet die Kernenergie in Deutschland im Bereich der Grundlast einen Beitrag von rund 50% (bei einer Verfügbarkeit von 87,7 Prozent in 2003 und 89,8 Prozent in 2004). Gleichzeitig leistet die Kernenergie einen wesentlichen Beitrag zur Klimavorsorge: Jedes Jahr werden in Deutschland durch die Kernenergie soviel CO_2-Emmissionen vermieden wie jährlich im gesamten Straßenverkehr ausgestoßen werden.

2. Situation bei der Endlagerung

2.1 Abfallaufkommen

Bei der Endlagerung sind aus dem Betrieb von Kernkraftwerken folgende Abfallarten zu berücksichtigen:

- Betriebsabfälle
- Stilllegungsabfälle
- Abfälle aus der Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente
- Bestrahlte Brennelemente für die direkte Endlagerung
- Sonstige Abfälle

Hinzu kommen Abfälle aus Krankenhäusern, Forschungseinrichtungen und anderen Institutionen.

Während man international Abfälle in die Kategorien schwach-, mittel- und hochradioaktive Abfälle einteilt, erfolgt die Unterscheidung in Deutschland im Hinblick auf die beiden Endlagerprojekte Konrad und Gorleben nach den Kategorien nicht Wärme entwickelnde und Wärme entwikkelnde Abfälle. Nicht Wärme entwickelnde Abfälle sind solche, die nur zu einer geringfügigen Temperaturerhöhung (max. 3 K) des umgebenden Wirtsgesteines führen. Für die Endlagerung dieser Abfälle ist die Schachtanlage Konrad vorgesehen. Demgegenüber führen Wärme entwikkelnde Abfälle zu einem deutlich höheren Wärmeeintrag in das Endlager. Die Einlagerung dieser Abfälle war im Salzstock Gorleben vorgesehen, sofern dieser nach Abschluss der Erkundungsarbeiten als geeignet erschien.

2.2 Schwachradioaktive Abfälle

Schwachradioaktive, also nicht Wärme entwickelnde Abfälle fallen beim Betrieb, der Reparatur und Wartung, sowie der Stilllegung von Kernkraftwerken an. Darüber hinaus stammen geringe Mengen aus der Wiederaufarbeitung und der Konditionierung bestrahlter Brennelemente. Des Weiteren fallen diese Abfälle auch z. B. in Krankenhäusern und den verschiedenen Forschungsinstitutionen an.

Derzeit beziffert das Bundesamt für Strahlenschutz das Abfallvolumen auf ca. 70 000 m^3, hiervon entfallen auf die Energieversorgungsunternehmen ca. 20 000 m^3 und auf die anderen Abfallverursacher wie Großforschungseinrichtungen, Medizin, Industrie und Landessammenstellen ca. 50 000 m^3. Für die weitere zeitliche Entwicklung kann erwartet werden, dass das Volumen des heutigen Bestandes und der bis etwa 2030 noch erwarteten Abfallmengen auf dann ca. 170 000 m^3 ansteigen wird.

2.3 Situation Konrad

Für die Schachtanlage Konrad liegt seit Mai 2002 der Planfeststellungsbeschluss vor. Aufgrund der Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen (EVU) wurde vom Antragsteller, dem Bundesamt für Strahlenschutz, der Antrag auf Sofortvollzug des Beschlusses zurückgezogen, um vor der Umrüstung die Klageverfahren abschließen zu können. Nach zügiger Beendigung der Rechstreitigkeiten und dem Erlangen von Rechtssicherheit sollte die Errichtung des Endlagers durch den Bund abgeschlossen werden. Nach einer etwa 2 bis drei Jahre dauernden Vorbereitungszeit würde die Umrüstung der Anlage, der Bau der erforderlichen Gebäude über Tage und das Auffahren und Herrichten der Einlagerungshohlräume etwa vier bis fünf Jahre in Anspruch nehmen. Die Einlagerung könnte somit etwa 2010 bis 2013 beginnen.

2.4 Hochradioaktive bzw. Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle

Die Aufarbeitung abgebrannter Brennelemente war bis zum Jahr 1994 für die deutschen EVU laut Atomgesetz der vorrangige Entsorgungsweg für bestrahlte Brennelemente. Entsprechend haben die deutschen EVU Wiederaufarbeitungsverträge mit COGEMA und BNFL über insgesamt 6 900 t abgeschlossen. Für diese Verträge besteht die Verpflichtung der Rücknahme der bei der Wiederaufarbeitung anfallenden Abfälle.

Nach der Vereinbarung der Bundesregierung mit den EVU vom 11.06.2001 sind Brennelementtransporte zur Wiederaufarbeitung nur noch bis Mitte 2005 zulässig. Die Rückführung aller Wiederaufarbeitungsabfälle wird sich aber voraussichtlich noch bis etwa 2022 erstrecken.

Durch die erwähnte Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den EVU ist heute die direkte Endlagerung der bestrahlten Brennelemente der zu beschreitende Weg. Bis etwa 2025 werden dadurch ca. 10 000 t radioaktives Schwermetall anfallen. Die Brennelemente werden in CASTOR Behältern zwischengelagert, weshalb eine ausreichende Zwischenlagerkapazität an den Standorten bereitgestellt werden muss. Die Betriebsgenehmigungen für diese Zwischenlager sind aber durch das Bundesamt für Strahlenschutz auf 40 Jahre begrenzt.

2.5 Salzstock Gorleben

Die Erkundung des Salzstockes Gorleben wurde am 01.10.2000 zur Klärung konzeptioneller und sicherheitstechnischer Fragen zur Endlagerung durch das BMU für einen Zeitraum von drei bis

maximal 10 Jahren unterbrochen. In einer Erklärung der Bundesregierung heißt es aber: ‚die bisherigen Erkenntnisse über ein dichtes Gebirge und damit der Barrierefunktion des Salzes werden positiv bestätigt.'

Die Überlegungen des Umweltministeriums (BMU) hinsichtlich einer erneut durchzuführenden Standortauswahl und einer daran anschließenden Erkundung von mehreren Standorten wurden schon mehrfach dargestellt. Durch die Umsetzung eines erneuten Standortauswahlverfahrens, wie es vom Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) vorgeschlagen wird, wird sich die Inbetriebnahme eines Endlagers mindestens bis zum Jahr 2040 verzögern.

Sollte allerdings, wie vom BMU dem AkEnd als Arbeitshypothese vorgegeben, nur **ein** Endlager frühestens im Jahr 2030 in Betrieb gehen, ist für den noch zu erwartenden Anfall an schwach- und mittelradioaktiven Abfall der Zubau weiterer Zwischenlagerkapazitäten in der Größenordnung von 100 000 m_ allein bei den EVU erforderlich. Insbesondere aber ist ein solches Szenario für die öffentlichen Haushalte extrem teuer, da ihnen, wie bereits dargestellt, die Hauptlast mit etwa zwei Dritteln der zurzeit bereits existierenden schwach- und mittelradioaktiven Abfälle zuzurechnen ist. Ein Großteil dieser Abfälle ist für die langfristig sichere Zwischenlagerung in der derzeitigen Form nicht konditioniert und müsste deshalb umkonditioniert werden.

Der Bund ist darüber hinaus Hauptgesellschafter der Großforschungseinrichtungen und damit auch für den Rückbau der dortigen kerntechnischen Einrichtungen verantwortlich. Die Kosten für diese Projekte werden durch eine Verzögerung der Verfügbarkeit eines Endlagers für schwach- und mittelradioaktive Abfälle deutlich erhöht.

Der Bundesrechungshof hat letztes Jahr in einer Stellungnahme deutlich auf diese Problematik hingewiesen.

3. Die Koalitionsvereinbarung der derzeitigen Bundesregierung aus dem Jahr 2002

Zu den energiepolitischen Zielen der rot-grünen *Bundesregierung* zählt der Ausstieg aus der Kernenergie. Das entsprechende „*Gesetz zur geordneten Beendigung der Kernenergienutzung zur Erzeugung von Elektrizität*" vom 25. Juli 2002 sichert die vorlaufende Vereinbarung zwischen der *Bundesregierung* und den Energieversorgungsunternehmen vom 14. Juni 2000 zum „*Atomkonsens*" juristisch ab. Die Vereinbarung sieht für die damals 19 in Deutschland betriebenen Kernkraftwerke (KKW) eine Befristung der Regellaufzeit auf insgesamt 32 Jahre (seit Betriebsbeginn) vor, mit einer entsprechenden Begrenzung der in Zukunft zu produzierenden Reststrommenge. Daraus ergeben sich individuelle zukünftige Anlagen-Laufzeiten, die in Abb. 1 dargestellt sind. Demnach werden aus heutiger Sicht bis 2010 acht Kernkraftwerke ihren Betrieb einstellen und die Abschaltung der letzten Anlagen fällt in das Jahr 2022. Die Vereinbarung eröffnet aber auch die Möglichkeit, bei der vorzeitigen Abschaltung einer (älteren) Anlage die verbleibende Reststrommenge auf eine andere Anlage zu übertragen. Diese Option ist beispielsweise bei der vorzeitigen Stilllegung des *KKW Stade* (am 14. November 2003) und des KKW Obrigheim (am 11. Mai 2005) in Anspruch genommen worden. Insofern stellt das Jahr 2022 keine zeitlich fixierte Obergrenze für die nukleare Stromerzeugung in Deutschland dar. Wir werden also noch zwei Jahrzehnte allein für den Betrieb und die staatliche Aufsicht der Anlagen kompetentes Fachpersonal benötigen. Eine „*geordnete Beendigung der Kernenergienutzung*" schließt aber auch eine sichere Zwischenlagerung der abgebrannten Brennelemente, den sicheren Rückbau der Kernkraftwerke und die sichere Entsorgung und Endlagerung der radioaktiven Abfälle mit ein. Für diese Arbeiten ist ein Zeitraum zu veranschlagen, der bis in die Mitte dieses Jahrhunderts reicht und der zugleich – aus heutiger Sicht – den Zeithorizont für die notwendige Kompetenzerhaltung in der Kerntechnik absteckt. Das ist prinzipiell in Politik, Wissenschaft und Wirtschaft unstrittig.

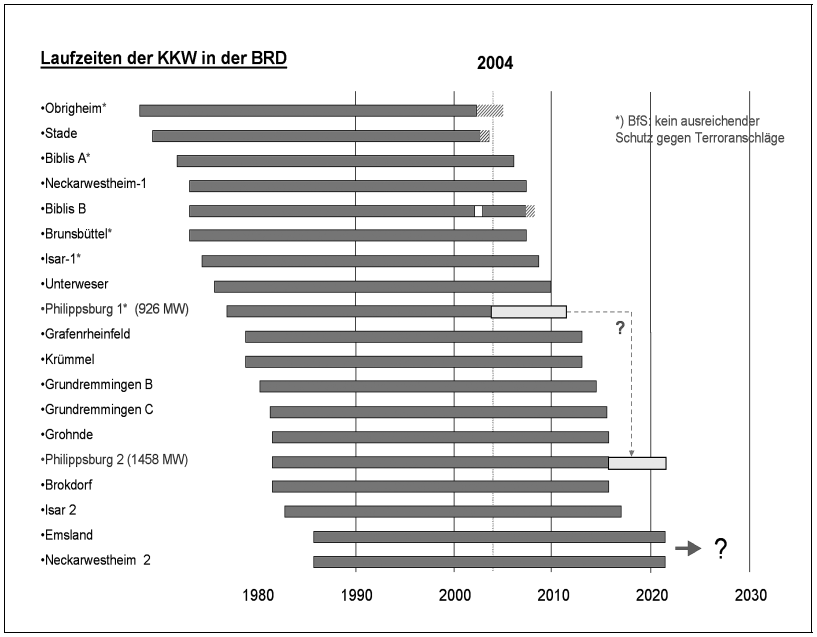

Abb. 1: vereinbarte Restlaufzeiten der deutschen KKW

4. Kompetenzerhaltung: Kompetenzverbund Kerntechnik

Vor diesem Hintergrund hat die *Bundesregierung* im Herbst 1999 eine Evaluierungskommission eingesetzt, die mit besonderer Aufmerksamkeit auf die Erhaltung forschungspolitischer Funktionsfähigkeit und auf die Sicherung des Know-how in den Bereichen Reaktorsicherheit und Endlagerung achtete. In dieser Kommission wirkten Vertreter des Wirtschafts-, Forschungs-, Umwelt- und Finanzministeriums sowie Vorstandsmitglieder der Forschungszentren Jülich (FZJ), Karlsruhe (FZK) und Rossendorf (FZR), der Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS, München) und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR, Hannover) mit. In ihrem Abschlussbericht vom 21. Januar 2000 stellt die Kommission fest [3]: „*Unabhängig von den Vorgaben der politischen Entscheidung über die Beendigung der Nutzung der Kernenergie in Deutschland ist für die nächsten Dekaden die Kompetenzerhaltung in kerntechnischer Sicherheit erforderlich. Nur dann kann weiterhin der Schutzauftrag staatlicher Vorsorge erfüllt und die Sicherheit nuklearer Anlagen und Entsorgungswege nach dem internationalen Stand von Wissenschaft und Technik gewährleistet bleiben*“.

Zur Gewährleistung der notwendigen Kompetenzerhaltung empfahl die Kommission die Gründung eines Kompetenzverbunds mit dem Ziel, die Zusammenarbeit der Forschungseinrichtungen untereinander und mit den jeweiligen Nachbar-Hochschulen weiter zu intensivieren. In diesem Sinn hat sich am 16. März 2000 der *Kompetenzverbund Kerntechnik* etabliert, dem als Mitglieder die beiden Forschungszentren der Helmholtz-Gemeinschaft FZJ und FZK, das Zentrum der Leibniz-Wissenschaftsgemeinschaft FZR und die Gutachterinstitution GRS mit ihren jeweiligen Nachbar-Hochschulen angehören (s. Abb. 2).

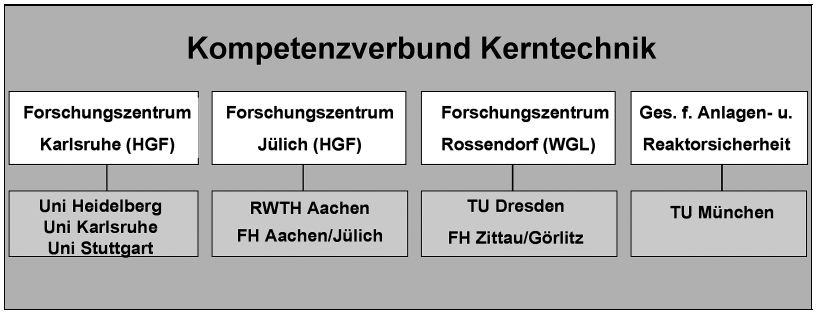

Abb. 2: Kompetenzverbund Kerntechnik

Die strategischen Ziele des Kompetenzverbunds sind aus den Empfehlungen der *Evaluierungskommission* abgeleitet worden und umfassen eine Trenddarstellung bei der Arbeitsplatzentwicklung und bei den Ausbildungskapazitäten im kerntechnischen Bereich, die verstärkte Kooperation

der Forschungseinrichtungen mit den Hochschulen und eine Unterstützung internationaler Initiativen zu Ausbildungsangeboten im nuklearen Bereich, die Abstimmung und Bündelung der Aktivitäten im Bereich der mit öffentlichen Mitteln geförderten nuklearen Sicherheits- und Endlagerforschung, die Förderung von qualifiziertem wissenschaftlichen Nachwuchs (Diplomanden und Doktoranden), und eine wirksame Beteiligung an internationalen Aktivitäten und Projekten zum Erhalt und der Weiterentwicklung internationaler nuklearer Sicherheitsstandards. Diese Punkte werden im Folgenden näher beleuchtet.

4.1 Arbeitsplatzentwicklung und Ausbildungskapazitäten

Eine im Sommer 2000 durchgeführte Erhebung hat ergeben, dass die kerntechnische Kompetenz in Deutschland durch rund 16500 Fachleute repräsentiert wird. Die bedarfsorientierte Perspektive für das Jahr 2010 zeigt eine Abnahme der Arbeitsplätze für das Fachpersonal von 16 500 auf etwa 13 000 an. Darin enthalten sind knapp 7 000 Arbeitsplätze für kerntechnisch orientierte Hochschulabsolventen (Universitäten, TU, FH), die bis 2010 auf etwa 6 200 zurückgehen werden. Bis 2010 werden infolge altersbedingter Personalabgänge ca. 1 700 qualifizierte Nachwuchskräfte für Stellenneubesetzungen benötigt. Wie aber kann der Bedarf für den Generationswechsel gedeckt werden? Der Umfrage 2000 zufolge, an der sich 17 Hochschulen und 11 Fachhochschulen beteiligten, beträgt die Zahl der Hochschulabsolventen, die neben den naturwissenschaftlichen und technischen Hauptvorlesungen auch kerntechnische Vorlesungen belegt haben, etwa 50 pro Jahr. Basierend auf dieser niedrigen studentischen Nachfrage und dem politischen Umfeld entsprechend ist auch das kerntechnische Lehrangebot an den Hochschulen stark rückläufig. Laut Erhebung wird sich das Lehrangebot bis zum Jahr 2010 im Vergleich zu 1995 von 22 auf 10 kerntechnische Fächer, d.h. um mehr als die Hälfte reduzieren. Spätere Nachfragen vom Juni 2002 und Januar 2004 haben ergeben, dass sich dieser rückläufige Trend noch weiter verstärkt hat.

4.2 Verstärkte Kooperationen zwischen den Forschungszentren und den Hochschulen

Um diesem Negativ-Trend entgegenzuwirken, fördert der Kompetenzverbund eine Intensivierung der Kooperationen zwischen den Forschungszentren und den Hochschulen. Dabei kann der Verbund erste Erfolge aufweisen: Die *Universität Heidelberg* und *FZK* haben in einem gemeinsamen Berufungsverfahren eine Neubesetzung des *Lehrstuhls für Nukleare Entsorgung* erreicht und sind bestrebt, den Lehrstuhl für Radiochemie über eine C3-Stiftungsprofessur wieder zu besetzen. Die *Universität Stuttgart* und *FZK* streben an, den *Lehrstuhl für Kernenergetik und Energiesysteme* (*IKE*) über ein gemeinsames Berufungsverfahren weiterzuführen. *TU Dresden*, *FH Zittau* und *FZR* führen gemeinsame Berufungsverfahren durch. Zur Effizienzsteigerung ihrer FuE-

Aktivitäten haben die drei Institutionen unter dem Dach des Kompetenzverbunds das „*Kompetenzzentrum Ost*“ etabliert.

4.3 Abstimmung und Bündelung der FuE-Vorhaben

Eine weitere Empfehlung der *Evaluierungskommission* lautete: *„Die fachliche und arbeitsteilige Zusammenarbeit in Deutschland auf dem Gebiet der Reaktorsicherheits- und Endlagerforschung mit dem Ziel einer weiteren Effizienzsteigerung sollte mit Nachdruck verfolgt werden. Der Kompetenzverbund sollte durch fachlich-inhaltliche Aufgabenabstimmung hierzu einen wichtigen Beitrag erbringen.“* Der Kompetenzverbund hat die Empfehlung mit Nachdruck aufgegriffen und die Projektträger des *BMWA für Reaktorsicherheit und für Entsorgung* gebeten, diese Empfehlung als Aufgabe zu übernehmen und in Zusammenarbeit mit den Forschungseinrichtungen aufzuarbeiten. Zwei entsprechende Arbeitsgruppen haben ihre Ergebnisse in Berichten zusammengefasst, in denen für den Zeitraum 2002 bis 2006 die mit öffentlichen Mitteln geförderten FuE-Vorhaben zur Reaktorsicherheit und zur Endlagerung radioaktiver Abfälle beschrieben und die Forschungseinrichtungen aufgeführt werden, welche die Themen in kooperativer Abstimmung bearbeiten. Die Berichte vermitteln nicht nur einen detaillierten Überblick über den Status quo der laufenden Aktivitäten, sondern sind gleichzeitig eine wertvolle Orientierungshilfe für die mittelfristige Ausrichtung der FuE-Programme der Forschungseinrichtungen und der komplementären Projektförderung des Bundes.

4.4 Förderung von qualifiziertem, kerntechnischen Nachwuchs

Die Erhaltung der Fachkompetenz im kerntechnischen Bereich ist ein zentrales Thema im Aktionsprogramm des Kompetenzverbunds. In diesem Zusammenhang ist auch die internationale „*Convention on Nuclear Safety*“ (Article 11) zu sehen, in der die Mitgliedsstaaten die völkerrechtlich verbindliche Selbstverpflichtung eingehen, geeignete Schritte zu unternehmen um sicher zu stellen, dass geeignet qualifiziertes und erfahrenes Personal in ausreichender Anzahl für alle sicherheitsrelevanten Aktivitäten in und für jede nukleare Anlage während der gesamten Lebensdauer zur Verfügung steht. In dieser Hinsicht unterstützt der Verbund die Regierung bei der Bereitstellung der notwendigen Fachkompetenz durch geeignete Initiativen in Studentenkreisen, durch Vermittlung und Bereitstellung von Doktorandenstellen in den Forschungseinrichtungen und durch kerntechnische Kursangebote der Forschungszentren zur Aus- und Fortbildung des technisch-wissenschaftlichen Personals. Eine spezielle Ansprache der Student(inn)en erfolgt beispielsweise in enger Zusammenarbeit mit dem *Deutschen Atomforum (DAtF)*, das zu diesem Zweck regelmäßig (zweimal im Jahr an wechselnden Orten) zu einem Kolloquium „*Perspektiven*

in der Kerntechnik“ einlädt. Auf europäischer Ebene ist eine solche Initiative die Gründung der *European Nuclear Education Network (ENEN) Association* im September 2003 (mit Sitz in Saclay). Der *ENEN-Verbund* verfolgt als Ziel den Aufbau einer Virtuellen Europäischen Nuklearuniversität, die den Studiengang zu einem European Master of Science in Nuclear Engineering als Zusatz-Diplom anbietet. Von deutscher Seite arbeiten an dieser Initiative die *TU München* und die *Uni Stuttgart* mit. Eine weltweite Initiative stellen die Aktivitäten der *International Atomic Energy Agency (IAEA, Wien*) zum „*Managing Nuclear Knowledge*“ und die am 4. September 2003 in London gegründete „*World Nuclear University*“ dar. Beide Initiativen werden vom Kompetenzverbund kooperativ unterstützt und von den Student(inn)en interessiert wahrgenommen.

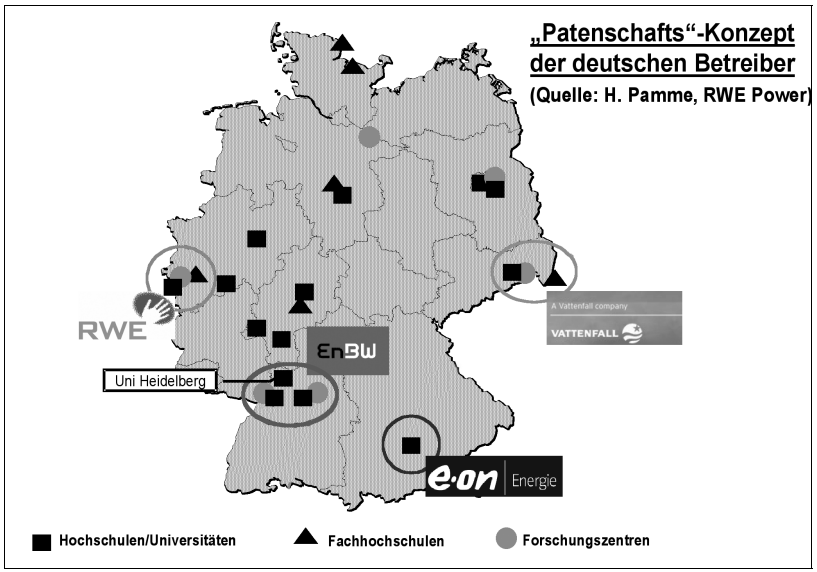

Abb. 3: Patenschaftskonzept der deutschen Betreiber

Komplementär dazu hat die enge Kooperation des Kompetenzverbunds mit den KKW-Betreibern und -Herstellern die Entwicklung eines regionalen „*Patenschafts*“-Konzepts der deutschen Betreiber mit kerntechnischen Lehr- und Forschungseinrichtungen gefördert. Das in Abb. 3 illustrierte Konzept markiert in dieser Hinsicht gewisse Präferenzen der einzelnen Betreiber (*EnBW, E.ON, RWE, Vattenfall*) für die Forschungsinstitutionen in ihrer näheren Umgebung. In diesem inzwischen mehrfach praktizierten Modell finanzieren einzelne Betreiber und Hersteller (*Framatome ANP, WTI/GNS*) qualifizierte Hochschulabsolventen als Doktoranden in einer Forschungseinrichtung. Dazu stellen sie geeignete Mitarbeiter ein und delegieren sie unmittelbar in

eine Forschungseinrichtung mit der Vorgabe, nach erfolgreicher Promotion in das Entsendehaus zurückzukehren. Auf besondere thematische Möglichkeiten dieser Promotion wird im Folgenden näher eingegangen.

4.5 Wirksame Beteiligung an internationalen Projekten

In der Diskussion innerhalb der Evaluierungskommission war als interessanteste Möglichkeit, Interesse bei Hochschulabsolventen zu wecken, die Beteiligung an internationalen Projekten identifiziert worden. Hierzu lautete die einstimmig gefasste Empfehlung der Evaluierungskommission [1]: *„Es sollte sichergestellt werden, dass Deutschland weiterhin an wichtigen internationalen Aktivitäten und Projekten zum Erhalt und der Weiterentwicklung der Reaktorsicherheits- und Endlagerforschung wirksam beteiligt ist“.* In der Zwischenzeit ist diese Empfehlung durch den rot-grünen Koalitionsvertrag vom 16. Oktober 2002 eingeengt worden. Dort heißt es: *„Die Forschung zur Erhöhung der Sicherheit vorhandener Reaktoren wird unterstützt“*. Und wenig später: „*Die staatliche Förderung der Entwicklung von nuklearen Techniken zur Stromerzeugung wird beendet“.* Damit ist eine wirksame Beteiligung deutscher Wissenschaftler aus öffentlich geförderten Forschungseinrichtungen mit öffentlichen Mitteln an internationalen Projekten wie *„Generation IV International Forum (GIF)“*, das auf einer Initiative des U.S.DOE aufgebaut ist, und dem *„International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO)“* der *IAEA* nicht mehr möglich. In seiner Stellungnahme vom 16. Juli 2003 an das *BMWA* hält der Kompetenzverbund eine Mitwirkung deutscher Wissenschaftler aus öffentlich geförderten Forschungseinrichtungen an Generation IV und vergleichbaren internationalen Projekten für notwendig, um sich an dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik orientieren und die Übertragbarkeit innovativer Sicherheitsansätze für zukünftige Reaktoren und weiterer „*Spin-off's*“ auf bestehende Reaktoranlagen in Deutschland überprüfen zu können. Da sich diese Einschränkung allerdings nur auf diejenigen Mitarbeiter, die aus öffentlichen Mitteln bezahlt werden, bezieht, wurden Möglichkeiten der externen Finanzierung geprüft. Im Ergebnis können die über die Betreiber und die Hersteller finanzierten Doktoranden genau diese attraktiven Themen bearbeiten. Inzwischen ist auch eine deutsche Mitwirkung an Generation IV über die Mitgliedschaft der *EU* an *GIF* (seit 30.07.2003) und über eine Drittmittelfinanzierung der deutschen Beiträge zu Generation IV durch die *EU* und die Industrie ermöglicht worden. So sind Führungskräfte aus dem *FZK* und *FZJ* in den Lenkungsausschüssen für das Supercritical-Water-Cooled Reactor System (SCWR) und das Very-High-Temperature Reactor System (VHTR) mit einer *EU*-Finanzierung vertreten und bereiten mit industrieller Unterstützung im Rahmen des 6. Forschungsrahmenprogramms der *EU* anspruchsvolle Beiträge zu den Projekten vor. Dies öffnet auch potentiellen Doktoranden eine Tür an die Front von Wissenschaft und Technik und einen Zugang zur internationalen Nuclear Community. Somit können – wenn auch über einen komplizierten Umweg – zumindest teilweise auf Sicherheitskonzepte zukünftiger Anlagen im Ausland Einfluss genommen und eventuell neue Erkenntnisse auf eine Anwendbarkeit in Deutschland überprüft werden. Diese zweitbeste Lösung ist nach Ansicht des Kompetenzverbunds verbesserungsbedürftig, da die Sicherstellung des Betriebs der nuklearen Anlagen nach dem aktuellen internationalen Stand von Wissenschaft und Technik zuallererst eine staatliche Aufgabe ist.

Um die Bedeutung und die technischen Inhalte des schon erwähnten, internationalen Generation IV Programms auf die Nuclear Community, und damit auch auf potentiellen Nachwuchs, deutlicher herauszustellen, soll nachfolgend etwas detaillierter auf dieses Programm eingegangen werden.

5. Zukünftige Reaktorkonzepte im Rahmen der Generation IV

Die Nachfrage nach Energie wird in den nächsten Jahrzehnten weiter zunehmen. Die Weltbevölkerung wird daher zunehmend eine sichere, saubere, aber trotzdem wirtschaftliche Energieversorgung fordern. Kann Kernenergie dazu einen wichtigen Beitrag liefern? Dabei ist nicht nur an die Stromversorgung zu denken: Wasserstoff aus Kernenergie kann Benzin ersetzen und damit die Abhängigkeit von Erdöl begrenzen. Süßwasser ist heute schon rar in vielen Ländern; mit Kernenergie lässt sich auch Meerwasser entsalzen.

Um morgen derartige Systeme verfügbar zu haben, ist heute die Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu leisten. Viele Nationen, sowohl Industrieländer als auch Schwellenländer, haben sich deshalb zu einem neuen, weltweiten Forschungs- und Entwicklungsprogramm „Generation IV“ zusammengetan [4]. Generation IV umfasst das gesamte System der Kernenergie, von der Urangewinnung bis zur Entsorgung, darunter natürlich auch Kernreaktoren und der nukleare Brennstoffkreislauf. Dabei besitzen vier politische Ziele höchste Priorität:

- *Nachhaltigkeit,*
- *Sicherheit und Zuverlässigkeit,*
- *Proliferationsbarrieren und physikalischer Selbstschutz, sowie*
- *Wirtschaftlichkeit.*

Nachhaltigkeit bedeutet hier, Kernenergie heute derart zu nutzen, dass künftigen Generationen die Möglichkeit zur Nutzung der Kernenergie im gleichen Umfang wie heute erhalten bleibt. Darunter wird nicht nur die nachhaltige Nutzung der Uranressourcen verstanden, sondern darüber hinaus auch ein entsprechend nachhaltiges Abfallmanagement. Bausteine dieses Konzepts sind:

1.) Sicherstellung der künftigen Brennstoffversorgung durch Rezyklierung des Brennstoffs und durch Konvertierung von 238-U zu weiteren, neuen Brennstoffen.
2.) Schonung der Atmosphäre und der fossilen Brennstoffvorräte durch Kernenergie und durch nuklear erzeugten Wasserstoff.
3.) Eine wesentliche Reduktion des Abfalls und seiner Nachzerfallswärme derart, dass die heute vorhandenen Endlagerkapazitäten noch viele Jahre lang genutzt werden können.
4.) Eine signifikante Reduzierung der Halbwertszeit und der Toxizität der radioaktiven Abfälle derart, dass für eine Langzeitsicherheit der Endlager (>1000 Jahre) keine besonderen Maßnahmen erforderlich sein werden.

Die *Sicherheit und Zuverlässigkeit* künftiger Kernenergiesysteme hat hohe Priorität in diesem Programm. Dazu gehören der sichere und zuverlässige Betrieb der Anlagen, ein verbessertes Unfallmanagement, Minimierung der Unfallfolgen, Gebäudeschutz und Konzepte, die Schutzmaßnahmen außerhalb der Anlage nicht weiter benötigen. Diese Ziele sollen technisch erreicht werden durch: Vermehrte Nutzung von Konzepten mit inhärenten Sicherheitseigenschaften, einer robusten Konstruktion und durch Sicherheitskonzepte, die auch Fachfremden verständlich sind. Darüber hinaus soll das öffentliche Vertrauen in die Sicherheit der Kernenergie verbessert werden.

Terroristische Angriffe bisher unbekannten Ausmaßes waren u. a. der Anlass für das dritte genannte Forschungs- und Entwicklungsziel. Der verbesserte Schutz der kerntechnischen Anlagen als auch eine Gewährleistung, dass Spaltmaterial nicht zu militärischen oder terroristischen Zwecken weiterverbreitet und missbraucht werden kann, soll erreicht werden durch konstruktive und konzeptionelle Maßnahmen, die eine Entwendung und Weiterverbreitung von Spaltmaterial erschweren, sowie dem Schutz der Anlage vor terroristischen Angriffen durch eine solide Gebäudekonstruktion.

Die *wirtschaftlichen Ziele* des Programms beinhalten sowohl wettbewerbsfähige Kosten als auch eine Minimierung der finanziellen Risiken der Kernenergie. Dazu gehören:

1.) Wettbewerbsfähige Stromentstehungskosten künftiger Kernkraftwerke und ein wirtschaftlicher Brennstoffkreislauf durch Erhöhung des Wirkungsgrads, durch konstruktive Vereinfachungen und durch eine Optimierung der Anlagengröße.
2.) Reduzierung der wirtschaftlichen Risiken kerntechnischer Anlagen durch innovative Herstellverfahren und modulare Konstruktionsweisen.
3.) Kombination der nuklearen Stromerzeugung mit Wasserstofferzeugung, Meerwasserentsalzung, Fernwärmeauskopplung oder anderer Energieformen soweit benötigt.

5.1 Für was steht Generation IV?

Das Forschungs- und Entwicklungsprogramm „Generation IV“ ist eine Initiative von 10 Staaten: Argentinien, Brasilien, Kanada, Frankreich, Japan, Südkorea, Südafrika, Schweiz, das Vereinigte Königreich und die Vereinigten Staaten, die sich im Jahr 2000 auf einen Rahmen zur internationalen Zusammenarbeit in der Kerntechnik einigten. Im Juli 2003 unterschrieb Euratom als 11. Mitglied den Vertrag zur Zusammenarbeit in GIF und ermöglichte somit allen Euratom-Mitgliedern die Mitarbeit in diesem Forum. Deutschland ist derzeit aufgrund des Ausstiegsbeschlusses der deutschen Bundesregierung mit öffentlichen Forschungsgeldern die Mitarbeit an Generation IV nicht gestattet. Deshalb stellt für deutsche Forschungseinrichtungen die Mitarbeit über Euratom einen wichtigen Schritt dar.

Unter der Generation I werden dabei die frühen Prototyp-Reaktoren der 50er und 60er Jahre verstanden. Generation II bilden die großen, kommerziellen Reaktoren seit den 70er Jahren, die heute noch in Betrieb sind. Generation III werden die fortschrittlichen Reaktoren genannt, die derzeit in neuen Projekten angeboten werden und z. T. bereits in Bau sind, so z.B. in Europa der EPR. Sie zeichnen sich vor allem durch verbesserte Sicherheitseigenschaften aus, sowie durch eine höhere Wirtschaftlichkeit.

Die Generation IV sind Reaktoren, oder besser Kernenergiesysteme, die sich erheblich von der Generation III unterscheiden. Ziel ist, Kernenergiesysteme einer zukünftigen Generation zu entwickeln, die wettbewerbsfähige und zuverlässige Energieprodukte, also nicht ausschließlich Strom, liefern können. Sie sollen künftige Anforderungen an Sicherheit, Entsorgung, Proliferation und öffentliche Akzeptanz hinreichend erfüllen. Zur Ausarbeitung und Umsetzung der Entwicklung von Generation IV Kernenergiesystemen schlossen sich die oben genannten Länder zu dem bereits erwähnten Generation IV International Forum (GIF) zusammen.

Nach einem umfangreichen Evaluationsverfahren wurden schließlich im Juli 2002 die folgenden 6 Kernenergiesysteme durch das GIF unter Beteiligung der Nuclear Energy Agency der OECD, der Europäischen Kommission und der IAEA ausgewählt:

- Gasgekühlte Höchsttemperatur-Reaktorsysteme
- Gasgekühlte schnelle Reaktorsysteme
- Wassergekühlte Reaktorsysteme mit überkritischen Dampfzuständen
- Bleigekühlte schnelle Reaktorsysteme
- Salzschmelze Reaktorsysteme
- Natriumgekühlte Reaktorsysteme

5.2 Der Euratom Beitrag zu Generation IV International Forum (GIF)

Wie bereits erwähnt, unterzeichnete die Europäische Kommission am 30. Juli 2003 den Zusammenarbeitsvertrag mit GIF. Im Rahmen des Euratom-Abkommens hat die Europäische Kommission die Möglichkeit, Forschungs- und Entwicklungsvorhaben in der Kerntechnik innerhalb Europas zu initiieren und zu fördern. Sie führt dies in Form von mehrjährigen Rahmenprogrammen zur Kernspaltung und zum Strahlenschutz aus. Die FuE-Finanzierung erfolgt auf zweierlei Wegen:

1.) als direkte Finanzierung von FuE-Programmen in den Joint Research Centres (JRC) der Europäischen Kommission,
2.) als indirekte Teil- oder Vollfinanzierung von FuE-Projekten von Konsortien der Mitgliedsstaaten in Form von integrierten Projekten, Netzwerken oder spezifisch ausgerichteten Forschungsprojekten.

Ein direkter Beitrag der Euratom könnte z. B. in ihren Joint Research Centres in Petten und Karlsruhe liegen. Als Initiative zur indirekten Förderung ist ein Beitrag der Euratom zu GIF gedacht, der ein Fördervolumen von ca. 10 M€ im Zeitraum 2004 bis 2006 hat. Um diese Forschungsmittel effektiv einzusetzen, sollen jedoch nur 3 der 6 von GIF vorgeschlagenen Kernenergiesysteme gefördert werden. Der Aufruf umfasst: 1.) Hoch- und Höchsttemperaturreaktoren mit dem Ziel einer weiteren Bewertung und Entwicklung der Technologien, die benötigt werden für die Auslegung und Genehmigung von Hochtemperaturreaktoren mit modularem direktem Kreislauf (HTR mit Betriebstemperaturen um 860 °C) und für Höchsttemperaturreaktoren (VHTR mit Betriebstemperaturen um 1000 °C). 2.) Gasgekühlte schnelle Reaktoren (GFR), mit dem Ziel einer Bewertung der potentiellen Auslegungskonzepte für die Verwirklichung sowie Ermittlung und Entwicklung der erforderlichen Schlüsseltechnologien. 3.) Wassergekühlte Reaktoren mit überkritischen Dampfzuständen (SCWR) mit dem Ziel einer gründlichen Bewertung des Systems im Hinblick auf die Feststellung seines künftigen Potentials.

Dieser mit 10 M€ relativ kleine Beitrag der Euratom zum GIF wird hoch belohnt durch Forschungsergebnisse anderer Länder, die die Partner kostenlos austauschen. Im Ganzen gesehen ist die Zusammenarbeit im Generation IV International Forum damit sicherlich für alle Beteiligten ein Gewinn.

Diese drei ausgewählten Kernenergiesysteme werden in den nachfolgenden Abschnitten etwas näher beleuchtet.

5.2.1 Höchsttemperaturreaktor (VHTR)

Der VHTR (englisch: Very-High-Temperature Reactor) ist ein weiterer Schritt in der Entwicklung von gasgekühlten Hochtemperaturreaktoren (Abb. 4).

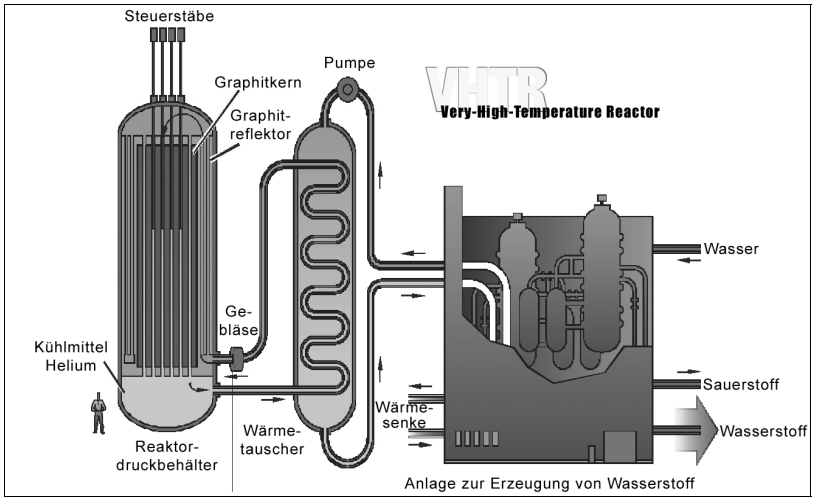

Abb. 4: Höchsttemperaturreaktor (VHTR)

Der VHTR kann Wasserstoff durch Anwendung des thermochemischen Jod-Sulfat-Prozesses aus Wärme und Wasser herstellen. Wasserstoff kann auch aus Wärme, Wasser und Erdgas durch nukleare Dampfreformation erzeugt werden. Die dazu notwendige Kernaustrittstemperatur beträgt dabei mehr als 1000 °C. Ein für die Produktion von Wasserstoff gedachter Hochtemperaturreaktor mit 600 MWth kann über zwei Millionen Kubikmeter Wasserstoff pro Tag produzieren. Der VHTR kann ebenfalls Elektrizität mit hohem Wirkungsgrad über 50 % bei 1000 °C herstellen. Verglichen dazu liegt der Wirkungsgrad der Generation III Konzepte, GT-MHR (Gasturbine Modular Helium Reactor) oder PBMR (Pebble Bed Modular Reactor) bei einer Temperatur von 850 °C bei 47 %. Durch die Möglichkeit der gleichzeitigen Produktion von Wärme und Leistung wird der VHTR zu einer attraktiven Wärmequelle für große Industriekomplexe. Der VHTR kann in Raffinerien und in der petrochemischen Industrie zur Anwendung kommen, um große Mengen an Prozesswärme bei unterschiedlichen Temperaturen bereitzustellen und um Wasserstoff herzustellen, um Schwer- und Rohöl mit einem hohen Schwefelgehalt aufzubessern. Kernaustrittstemperaturen höher als 1000 °C würden Forderungen nach nuklearer Wärme für Prozesse wie Stahl-, Aluminiumoxid und Aluminium-Produktion erfüllen können. Der VHTR ist ein Graphit moderierter und Helium gekühlter Reaktor mit einem thermischen Neutronenspektrum. Der Reaktortyp

des VHTR kann aus einem prismatischen Kern wie der japanische HTTR bestehen oder ein Kugelhaufenreaktor wie etwa der deutsche THTR sein. Für die Bereitstellung von Elektrizität wird ein direkter Kreislauf vorgesehen, d.h. die mit Helium angeströmte Turbine wird direkt im Primärkreislauf integriert. Den Bedarf nach nuklearer Wärme, wie z.B. in Raffinerien, in der Petrochemie, in der Metallurgie und der Wasserstoffproduktion, versorgt ein Wärmetauscher in einem indirekten Kreislauf.

Der VHTR profitiert von den Erfahrungen mit dem gasgekühlten Hochtemperaturreaktor, der Ausgangspunkt des VHTR ist. Die Basistechnologie hat sich in früheren HTR-Anlagen wie z.B. Dragon, Peach Bottom, AVR, THTR und Fort St. Vrain bewährt. Sie ist zudem noch in Konzepten wie dem GT-MHR und dem PBMR weiterentwickelt worden. Das bereits laufende Projekt eines 30-MWth-HTTR in Japan wird die Realisierbarkeit von Austrittstemperaturen bis zu 950 °C gekoppelt mit einer Prozesswärmenutzung demonstrieren. Der HTR-10 in China wird eine Wärme-Kraft-Kopplung bei einer Leistung von 10 MWth demonstrieren. Das Know-how aus den früheren Projekten in Deutschland und Japan unterstützt die Entwicklung des VHTR.

Der Kern des VHTR stellt aber noch eine Reihe von signifikanten technischen Herausforderungen dar. Neuartige Brennstoffe und Materialien müssen so entwickelt werden, dass ein Anstieg der Kernaustrittstemperatur von 850 °C bis zu 1000 °C, oder möglichst noch höher, realisierbar ist; die maximale Brennstofftemperatur bei denkbaren Störfällen darf eine Temperatur von 1800 °C erreichen und ein maximaler Abbrand von 150 – 200 GWd/tHM wird angestrebt.

Zur Wasserstofferzeugung werden Hochtemperaturlegierungen und Beschichtungen benötigt, die gegen korrosive Gase wie Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Methan resistent sind. Auch der Jod-Schwefel-Prozess muss noch anhand von Pilotanlagen und größeren Anlagen demonstriert werden. Eine Modulbauweise des Reaktors und ein System zur Wärmeauskopplung sind weitere zu lösende Herausforderungen, um den VHTR für den internationalen Markt interessant zu machen. Letztlich muss auch noch eine Hochtemperatur-Heliumturbine entwickelt werden.

5.2.2 Gasgekühlter, schneller Reaktor (GFR)

Das GFR System (englisch: Gas-Cooled Fast Reactor) besteht aus einem Helium gekühlten Reaktor mit schnellem Neutronenspektrum und einem geschlossenen Brennstoffkreislauf (Abb. 5). Wie bei anderen innovativen, gasgekühlten Reaktoren (siehe VHTR), ermöglicht die hohe Austrittstemperatur des Kühlmittels Helium, elektrische Energie, Wasserstoff oder Prozesswärme mit hoher Umwandlungseffizienz anzubieten. Der GFR verwendet eine Heliumturbine im Direktkreislauf eines rekuperativen, zwischengekühlten Brayton-Prozesses, wie in Abb. 5 skizziert.

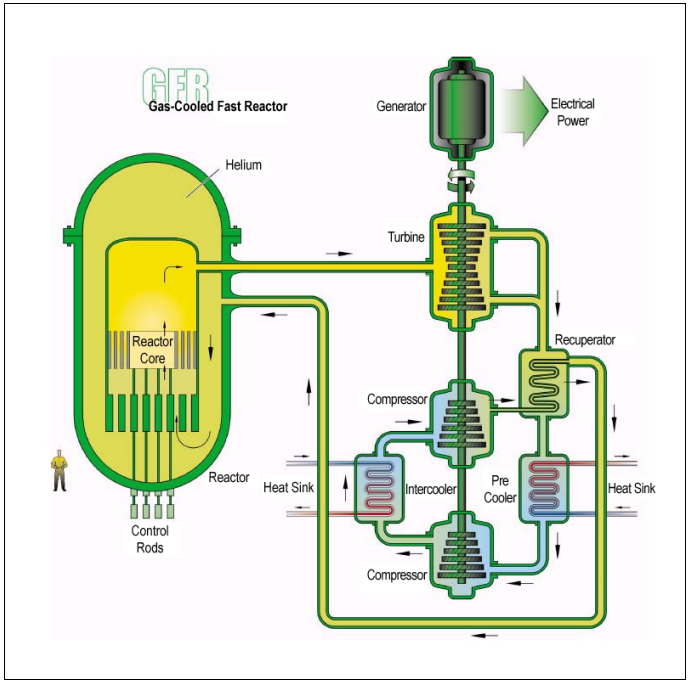

Abb. 5: Gasgekühlter schneller Reaktor (GFR)

Wesentliches Ziel dieses schnellen Reaktors ist, ebenso viel neuen Spaltstoff zu erbrüten wie er verbraucht, um den Brennstoff damit um mehr als zwei Größenordnungen besser ausnutzen zu können als heutige thermische Reaktoren. Darüber hinaus soll das schnelle Neutronenspektrum genutzt werden, um minore Aktinide, die beim Abbrand entstehen, vollständig wiederzuverwerten, wodurch die Produktion von langlebigem radioaktivem Abfall minimiert wird. Für diesen gasgekühlten schnellen Reaktor wird eine integrierte Brennstoffwiederaufarbeitung vor Ort angestrebt, um die Proliferation von Plutonium zu erschweren. Der GFR beruht technologisch auf einer Reihe von gasgekühlten Reaktoranlagen, wie sie auch in dem VHTR Abschnitt genannt sind. Der GFR kann von den früheren Entwicklungen dieser Technologie profitieren, ebenso aber auch von innovativen Entwicklungen im Bereich des Brennstoffs und der Hochtemperatur- materialen des VHTR. Die Entwicklung kann schrittweise von thermischen zu schnellen gasgekühlten Systemen erfolgen.

Zur Demonstration der Machbarkeit erfordert der GFR eine Reihe von innovativen technischen Entwicklungen. Brennstoff, Brennstoffkreislauf und das Sicherheitssystem stellen die größte

technische Herausforderung dar. Zu den wichtigsten Entwicklungszielen gehören: Brennstoffformen für ein schnelles Neutronenspektrum; Kerndesign mit einem Neutronenspektrum für eine hohe Konversionsrate, jedoch ohne separate Brutzonen; Sicherheitssysteme einschließlich Nachwärmeabfuhrsysteme unter Berücksichtigung der signifikant höheren Energiedichte (im Bereich von 100MWth/m3) und der verminderten thermischen Trägheit; Brennstoffkreislauf mit einer kompakten Wiederaufarbeitung vor Ort. Herausfordernde Forschungs- und Entwicklungsaufgaben des GFR sind weiterhin aber auch: Entwicklung von Werkstoffen, die gegen den hochenergetischen Neutronenfluss unter Hochtemperaturbedingungen resistent sind; Entwicklung einer Hochleistungs-Heliumturbine für eine effiziente Stromerzeugung; Entwicklung von Kopplungstechnologien für Prozesswärmeanwendungen unter Nutzung der nuklearen Hochtemperaturwärme des GFR. Das Konzept und ein Konstruktionsentwurf des gesamten Systems sollen bis 2019 entwickelt werden, so dass eine Prototypenanlage bis 2025 gebaut werden könnte.

5.2.3 Leichtwasserreaktor mit überkritischen Dampfzuständen (SCWR)

Der Leichtwasserreaktor (LWR) mit überkritischen Dampfzuständen (engl.: SuperCritical Water-cooled Reactor, SCWR, Abb. 6) ist ein wassergekühlter Hochtemperatur- und Hochdruckreaktor, der über dem thermodynamisch kritischen Punkt des Wassers (374 °C, 22.1 MPa) arbeitet. Der Kern dieses Leichtwasserreaktors kann sowohl mit thermischen als auch mit schnellen Neutronen betrieben werden. Gegenüber heutigen Leichtwasserreaktoren hat der SCWR einige signifikante Vorteile: Der SCWR kann einen höheren thermischen Wirkungsgrad von 44% erreichen, verglichen mit 33 – 35% der heutigen LWRs. Durch die höhere Aufheizung des Wassers in Kern ergibt sich ein kleinerer Massenstrom des Kühlmediums bei gleicher thermischer Leistung. Dadurch kann die Größe der Kühlmittelpumpen, der Rohrleitungen, der dazugehörigen Ventile und die Leistung der Pumpen reduziert werden. Der direkte Kreislauf (wie beim Siedewasserreaktor) ermöglicht ein kompaktes Containment. Es existiert keine Siedekrise (z.B. durch das „Austrocknen“ des Wasserfilms), da der SCWR-Reaktor im überkritischen Dampfbereich, also einphasig, arbeitet. Dadurch werden Bereiche eines nicht kontinuierlichen Wärmeübergangs im Kern während des normalen Betriebs vermieden. Dampftrockner, Dampfabscheider, Rezirkulationspumpen und Dampferzeuger werden nicht mehr benötigt. Deshalb werden von einem SCWR geringere Anlagenkosten erwartet.

Der SCWR kann auch als schneller Reaktor ausgelegt werden. Der grundlegende Unterschied zwischen der Version mit thermischen oder schnellen Neutronen ist die Menge an Moderatormaterial im Kern des SCWR. Die Basis für die Entwicklung des Leichtwasserreaktors mit überkritischen Dampfzuständen sind die zur Zeit existierenden Leichtwasserreaktoren (z.B. Druckbehälter, Sicherheitsbehälter, Brennelemente, Kontrollstäbe, Sicherheitssysteme) und die kommerziellen, fossil-gefeuerten Kraftwerke mit überkritischen Dampfzuständen, so dass z.B. Turbinen, Speisewasserpumpen und das Wasseraufbereitungssystem bekannt sind.

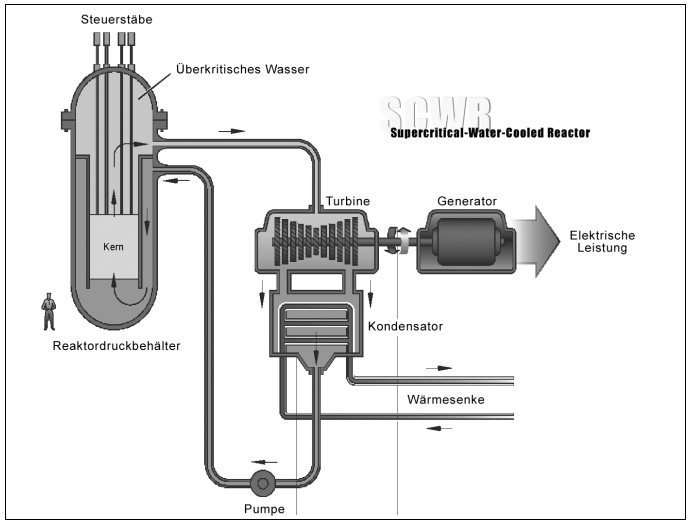

Abb. 6: LWR mit überkritischen Dampfzuständen (SCWR)

Die wichtigsten technologischen Herausforderungen liegen in den Bereichen Werkstoffe, insbesondere Hüllrohrwerkstoffe, bezüglich Korrosion, Spannungs-Riss-Korrosion, Zeitstandfestigkeit und Versprödung und der Sicherheit bei Störfällen, insbesondere auch hinsichtlich des kleineren Wasserinventars im Vergleich zu konventionellen LWR.

5.3 Reduzierung der Radiotoxizität

Eines der wichtigsten Ziele innerhalb des Generation IV Programms ist die Reduzierung der Radiotoxizität des nuklearen Abfalls. Gemeint ist damit, dass die Radiotoxizität des Abfalls so schnell abklingt, dass die Sicherheit des Endlagers nicht über geologische Zeiträume von mehreren hunderttausend Jahren gewährleistet werden muss, sondern nur für historische Zeiträume von kleiner tausend Jahren. Für diesen Zeitraum stehen schon heute ausschließlich technische Barrieren zur Verfügung, so dass von einem sicheren technischen Einschluss ausgegangen werden kann. Diese drastische Verringerung der notwendigen Einschlusszeiten in einem Endlager für radioaktiven Abfall ist aber nicht nur für Konzepte einer neuen Generation von großer Bedeutung,

sondern natürlich auch interessant für die bereits existierenden Reaktoren. Dementsprechend sind diese Strategien auch für Länder von großer Bedeutung, deren derzeitige Regierungen beschlossen haben, die friedliche Nutzung der Kernenergie zu beenden oder planen, dies zu tun. Um eine signifikante Reduzierung der Radiotoxizität des nuklearen Abfalls zu erreichen, müssen die Elemente aus dem Abfall abgetrennt (Partitioning) und umgewandelt (Transmutation) werden, die langfristig die Radiotoxizität dominieren: Im Wesentlichen die langlebigen Spaltprodukte und Plutonium zusammen mit den Minoren Aktiniden.

5.4 Strategien für den Kernbrennstoffkreislauf unter Berücksichtigung von PuT

Die verbreitete Sorge über die radioaktive Abfallentsorgung hat im vergangenen Jahrzehnt zu einem wachsenden Interesse an Partitioning- und Transmutationsstrategien (PuT) geführt, mit denen die Auslastung zukünftiger tiefer geologischer Endlager gemildert werden soll [5], [6].

Die größte vom abgebrannten Brennstoff ausgehende, langfristige Gefahr resultiert aus wenigen chemischen Elementen – Plutonium, Neptunium, Americium, Curium und einige langlebige Spaltprodukte, wie z.B. Jod und Technetium, deren Konzentrationen wenige Gramm pro Tonne erreichen. Gegenwärtig werden in der EU jährlich etwa 2500 t abgebrannte Brennstoffe erzeugt. Diese enthalten etwa 25 t Plutonium, 3,5 t Minore Aktiniden wie Neptunium, Americium und Curium sowie 3 t langlebige Spaltprodukte (von insgesamt etwa 100 t Spaltprodukten). In Deutschland wird das Inventar für 2022 auf etwa 130 t Pu und etwa 35 t Minore Aktiniden geschätzt.

Ein Maß für die Gefahr dieser Elemente ist die Toxizität und insbesondere die Radiotoxizität, die mehr aus deren Radioaktivität, denn aus ihrer chemischen Form resultiert. Die Bezugsgröße ist die Radiotoxizität des für die Herstellung von 1 t angereichertem Uran benötigten Rohstoffs, einschließlich nicht nur der Uranisotope, sondern aller radioaktiver Folgeprodukte. Die Radiotoxizität der Spaltprodukte dominiert die Gesamtradiotoxizität während der ersten 100 Jahre. Danach nimmt deren Radiotoxizität ab und erreicht die Bezugsgröße nach etwa 300 Jahren. Die Langzeitradiotoxizität wird allein von den Aktiniden über mehr als 100.000 Jahre dominiert, vornehmlich von den Plutonium- und Americiumisotopen (s. Abb. 7). Diese radioaktiven Nebenprodukte liegen im abgebrannten Brennstoff zwar nur in relativ geringen Konzentrationen vor, müssen aber in stabilen tiefen geologischen Formationen, isoliert von der Biosphäre, für sehr lange Zeiträume endgelagert werden.

Partitioning und Transmutation (PuT) gelten als eine Möglichkeit zur Reduzierung der Auslastung eines geologischen Endlagers. Da Plutonium und die Minoren Aktiniden vornehmlich für

die Langzeittoxizität verantwortlich sind, führen die Abtrennung dieser Nuklide vom Abfall (Partitioning) und deren Umwandlung (Transmutation) dazu, dass der übrige Abfall einen großen Teil seiner Langzeitradiotoxizität verliert. Dieses kann ein wichtiger Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung im Falle einer weiteren kontinuierlichen Nutzung der Kernenergie sein, ist aber auch bei einem Ausstiegsszenario aus der Kernenergie von entscheidender langfristiger Bedeutung.

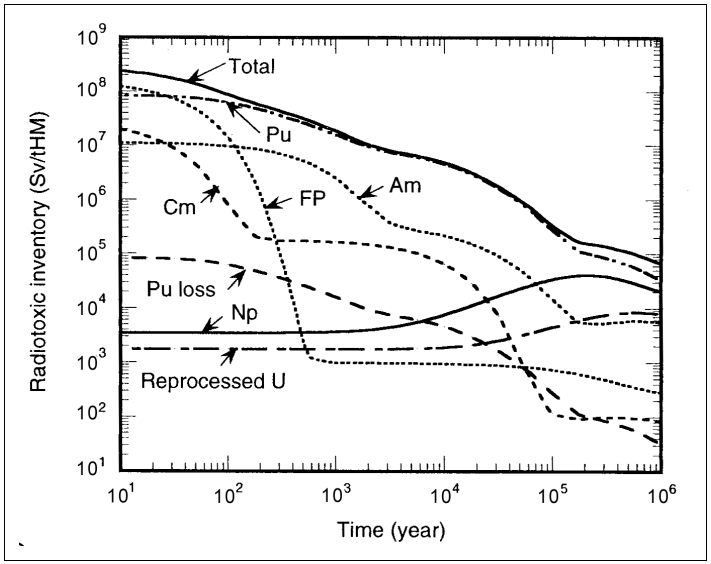

Abb. 7: Radiotoxizitätsinventar von UOX-Brennstoff in Abhängigkeit von der Zeit (Grundlage: abgebrannter Brennstoff aus einem UOX-LWR mit 3,7 % 235U, 45 GWd/tHM).

Das Radiotoxizitätsinventar kann um bis zu einem Faktor von 10 reduziert werden, wenn das gesamte Pu rezykliert und gespalten wird. Reduktionsfaktoren größer 100 lassen sich erreichen, wenn zusätzlich die Minoren Aktiniden (MA) umgewandelt werden. Eine Voraussetzung dafür ist die nahezu vollständige Spaltung der Aktiniden, wozu es eines Multirezyklierverfahrens bedarf. Verluste während der Wiederaufarbeitung und Wiederherstellung sollten weit unter 1%, wahrscheinlich im Bereich von 0,1%, liegen.

Die Wichtigkeit einer substantiellen Verringerung der potentiellen Radiotoxizitätsquelle in einem Endlager wurde bereits unterstrichen. Mit der PuT-Strategie können jedoch grundsätzlich die zu lagernden Radionuklidmassen und die damit verbundene Nachwärme und damit auch das Volu-

men und die Kosten des Endlagers verringert werden. Vorläufige Ergebnisse für ein bestimmtes Endlager (Yucca Mountain) deuten darauf hin, dass die Abtrennung (und Transmutation) bestimmter Elemente sehr vorteilhaft für die Auslegung und den Betrieb des Endlagers von Yucca Mountain sein könnte, d.h. die Abtrennung von Plutonium und Americium für die Langzeitwärmebelastung, die von Cäsium und Strontium für die kurzzeitige Wärmeabfuhr und die von Neptunium für die Reduzierung der maximalen Dosisleistung. Im Ergebnis können die Größe des Endlagers (um Faktoren von bis zu 10 bis 20 und mehr) und auch die maximale Dosis (um einen Faktor größer 100) reduziert werden.

Natürlich ist es nicht möglich, diese Ergebnisse direkt auf andere Endlagertypen zu übertragen, da sie von den spezifischen Merkmalen des Endlagers und seiner Auslegung abhängig sind. Allerdings deuten die Ergebnisse dieser Studien darauf hin, dass es noch einen weiteren möglichen Vorteil von PuT gibt, der gesonderter Untersuchungen bedarf. Denn auch die Nichtweiterverbreitungssicherheit (Proliferationssicherheit) des gesamten Brennstoffkreislaufes, einschließlich des Endlagers, wird durch die PuT-Strategien gefördert. In diesem Bereich hängt die Weiterverbreitungsgefahr, auch wenn sie schwer zu quantifizieren ist, mit der Masse des Pu im Gesamtbrennstoffkreislauf zusammen und ist zeitabhängig. Eine drastische Reduzierung der Mengen durch PuT hat eine drastische Reduzierung des Weiterverbreitungsrisikos zur Folge, selbst wenn man den vorübergehenden (über wenige Jahrzehnte) bescheidenen Anstieg aufgrund der Abtrennung von Pu vom Kernbrennstoff für die Transmutation in bestimmten Reaktoren berücksichtigt.

5.5 Nutzung Beschleuniger getriebener Systeme (ADS)

Die Transmutation der Transuran-Elemente (TRU) kann sowohl in thermischen als auch in schnellen Reaktoren erfolgen. Allerdings ist der „Preis“ der Nutzung vorhandener thermischer Reaktoren sehr hoch, weil die U-235-Anreicherung erhöht wird (um weiterhin Neutronen für die Neutronenbilanz zu liefern und den „Vergiftungseffekt“ der meisten TRU in einem thermischen Spektrum auszugleichen). Auch die Folgen für den Brennstoffkreislauf sind beträchtlich, da hohe Mengen an TRU produziert werden, die zu einer Zunahme der Neutronenquellen bei der Brennstoffherstellung führen. Wird die effektivste TRU-Transmutation mittels homogenem Rezyklieren der gesamten (nicht abgetrennten) TRU in einem schnellen Reaktor erzielt, so kann auch eine alternative Strategie gewählt werden, insbesondere, wenn sich die Einführung schneller Reaktoren verzögert. Diese Strategie wird auch „double strata Verfahren“ genannt. Bei diesem Verfahren werden Pu in vorhandenen LWR multi-rezykliert und die MA in einem so genannten ADS (Accelerator Driven System) mit einem schnellen Spektrum transmutiert. Die Nutzung von ADS ist gerechtfertigt, weil ein kritischer Reaktor mit MA-dominiertem Brennstoff sehr ungünstige Reaktivitätskoeffizienten und eine inakzeptabel geringe Menge an verzögerten Neutronen aufweist. Die Nutzung von ADS wird dementsprechend auch für Ausstiegsszenarien zur Verbrennung aller TRU vorgeschlagen.

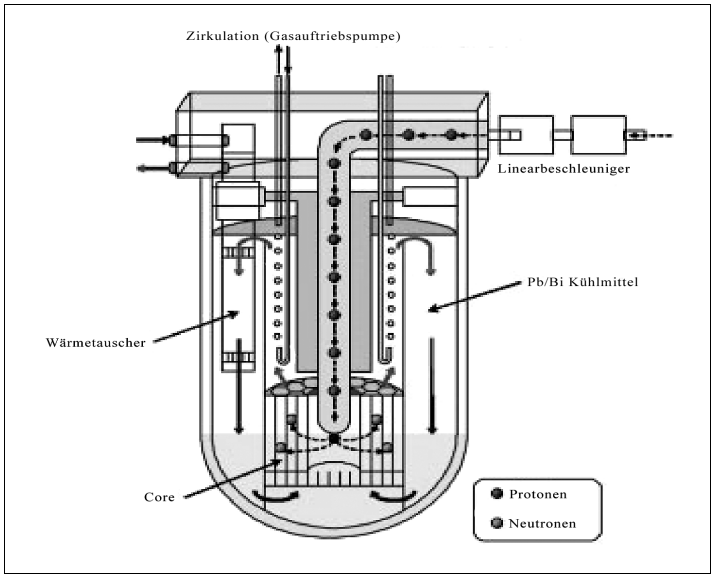

Abb. 8: Schemazeichnung eines ADS

Ein ADS besteht im Wesentlichen aus drei Komponenten (s. Abb. 8): Einer neutronenphysikalisch unterkritischen Anordnung von Brennelementen, einem Beschleuniger und einem Target, das die externe Neutronenquelle darstellt. Über einen Beschleuniger (Linearbeschleuniger oder Zyklotron) werden hochenergetische Protonen durch ein evakuiertes Strahlrohr auf ein Target, bestehend aus einem schweren Element (z.B. einer Blei-Wismut (Pb-Bi) Legierung) geschossen und über Spallationsreaktionen werden freie Neutronen erzeugt. Die dabei entstehenden, so genannten Quellneutronen dienen der Auslösung und Aufrechterhaltung einer Kettenreaktion in der unterkritischen Anordnung. In Abb. 8 ist der prinzipielle Aufbau dieses Systems dargestellt. Als Spallationsmedium und Kühlflüssigkeit wird die Schwermetalllegierung Pb-Bi benutzt. In der Tat werden verschiedene Targetvarianten untersucht, vom Festkörper bis zum besagten Pb-Bi. Als Kühlmedium für ein ADS wird neben Pb-Bi, Blei und Helium auch Natrium diskutiert. In ADS-Anlagen wird die Vernichtung der Abfälle im Wesentlichen durch Reaktionen mit Neutronen bewirkt. Eine effektive Vernichtung von Transuranen erfolgt hauptsächlich durch Spaltung, während andere Einfangprozesse überwiegend zu einer Verschiebung innerhalb der Zusammensetzung der Transurane führen.

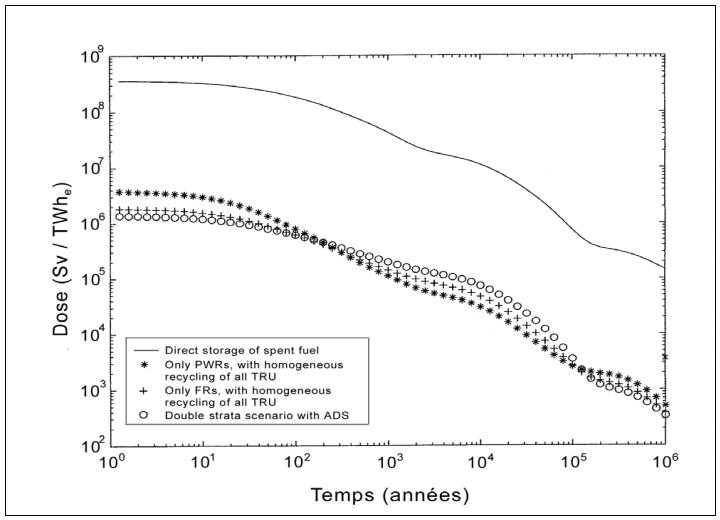

Abb. 9: Verringerung der Radiotoxizität bei den verschiedenen Transmutationsszenarien (Verluste bei der Wiederaufarbeitung: alle TRU 0,1 %)

Eine abschließende Bemerkung betrifft die Wirksamkeit der verschiedenen Transmutationsstrategien hinsichtlich der Reduzierung potentieller Radiotoxizitätsquellen in einem tiefen geologischen Endlager. Alle Strategien sind gleichwertig, wenn die TRU-Abtrennrate bei der Wiederaufarbeitung von abgebranntem Brennstoff die gleiche ist. Werden die Verluste bei der Wiederaufarbeitung auf 0,1 % für alle TRU begrenzt, so wird die potentielle Radiotoxizitätsquelle unabhängig vom Szenario nach etwa 300 Jahren auf den Wert des ursprünglichen Uranerzes, das zur Herstellung des Brennstoffes in den Kernkraftwerken verwendet wurde, reduziert (s. Abb. 9).

5.6 „Regionaler“ Transmutationsansatz

In den vorangegangenen Abschnitten wurde gezeigt, dass die meisten Studien zur Beurteilung des Transmutationspotentials im Rahmen der Abfallentsorgung auf den folgenden drei Hauptszenarien basieren:

1.) Transmutation von nicht abgetrennten TRU (z.B. aus der Wiederaufarbeitung von abgebrannten LWR-Brennstoffen) in schnellen Reaktoren. Unabhängig vom Kühlmittel erlauben die generischen Eigenschaften eines schnellen Neutronenspektrums die Multi-Rezyklierung der TRU. Darüber hinaus ermöglicht die Neutronenbilanz eines schnellen Reaktors Flexibilität in der Auslegung, um je nach den spezifischen Strategiezielen ein Umwandlungsverhältnis niedriger, gleich, oder größer 1 zu erreichen. Dieses Szenario erfüllt sowohl Nachhaltigkeits- als auch Abfallminimierungsanforderungen. Tatsächlich kann das TRU-Inventar je nach Wahl des Umwandlungsverhältnisses stabilisiert oder verringert werden. Die endzulagernde Abfallmenge entspricht dann den Verlusten bei der Wiederaufarbeitung. Dieses Verfahren ist im Hinblick auf zukünftige Nuklearsysteme (z.B. Generation-IV) das attraktivste.

2.) Selektive Abtrennung von TRU und Transmutation von Am (und möglicherweise Np) in MOX-beladenen LWR. Dieses Szenario kann als vorübergehende Option betrachtet werden. Tatsächlich ist die Nutzung mit zahlreichen Nachteilen verbunden: Das Pu-Inventar wird schließlich stabilisiert, das Am-Inventar aber nicht; die Pu-238-Akkumulation ist beträchtlich; Cm muss abgetrennt werden, und es muss eine Strategie für dessen Lagerung und die weitere Nutzung des Pu-240, das sich während des Verfahrens ansammelt, entwickelt werden. Interessant ist die Nutzung vorhandener Reaktoren und Technologien.

3.) Die Nutzung von Beschleuniger getriebenen Systemen (ADS) zur Transmutation der TRU. Damit lassen sich zwei Zielsetzungen verfolgen: a) die Transmutation von MA in einem „double-strata Verfahren“ und b) die Verbrennung aller TRU im Falle eines Ausstiegs aus der Kernenergie.

Die Realisierung jedes der drei Szenarien erfordert die Entwicklung geeigneter Technologien (z.B. Aktiniden-Trennung, Entwicklung bestimmter Brennstoffe und deren Wiederaufarbeitung, ADS-Technologie, usw.). Internationale Kooperationen zum Nachweis der Prinzipien und für Labor- und vorindustrielle Demonstrationen laufen. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt hat sich aber noch kein Land für die vollständige Realisierung einer spezifischen PuT-Strategie entschieden. In Einzelfällen sind für den Zeitraum von 2006 bis 2008 Entscheidungen zu erwarten. Ein wichtiger Faktor ist natürlich die Kosten/Nutzen-Rechnung. PuT-Strategien ermöglichen eine flexible Entwicklung der Kernenergie. PuT wird damit für ein einzelnes Land zu einer Möglichkeit, einen Teil der Entwicklungskosten und Durchführungspläne innerhalb einer größeren Ländergemeinschaft aufzuteilen, wie dies für Deutschland im Kontext der Europäischen Union anzustreben wäre. Bisher wurde aber noch nicht versucht, eine PuT-Strategie weniger als nationale, sondern vielmehr als regionale, Länder übergreifende (z.B. innerhalb der EU) Aufgabe zu verstehen.

6. Schlussbemerkung

Die Kernenergie leistet zurzeit mit 28 % den größten Einzelbeitrag zur Stromversorgung in Deutschland, rund um die Uhr und frei von CO_2-Emissionen. Für die Zukunft hat die rot-grüne Bundesregierung mit dem Ausstiegsgesetz zur Kernenergienutzung der Wissenschaft und Wirtschaft versorgungspolitische Leitplanken vorgegeben, die deren Gestaltungsräume deutlich eingrenzen. Gleichwohl bleibt auch in Deutschland die nukleare Sicherheits- und Endlagerforschung ein notwendiger Bestandteil des verantwortungsvollen Umgangs mit dem Risiko, das mit der zivilen Nutzung der Kernenergie verbunden ist, und ist damit ein unverzichtbarer Teil der gesellschaftlichen Vorsorgeforschung.

Aus diesem Grund ist die Mitwirkung deutscher Wissenschaftler aus öffentlich geförderten Forschungseinrichtungen an internationalen Kooperationen zu neuen Reaktorkonzepten (wie z.B. IAEA Vorhaben INPRO oder Generation IV) wünschenswert und dringend geboten. Ein Zugang zu den dort erarbeiteten Ergebnissen im Bereich Reaktorsicherheit und Endlagerforschung und daraus resultierende potenzielle Spin-Offs sollte für Deutschland in Zukunft wieder gegeben sein.

PuT-Strategien können zur radioaktiven Abfallentsorgung beitragen, sofern geeignete Technologien entwickelt werden. Der beste Weg besteht zweifellos in der Nutzung der Transmutation im Rahmen der Entwicklung einer nachhaltigen Kernenergie auf der Grundlage des Einsatzes schneller Reaktoren, wie sie im Rahmen der Generation IV Studien untersucht werden. Diese Art von Reaktoren ermöglicht eine hohe Flexibilität im Hinblick auf die Entsorgung von TRU-Inventaren. Der Nutzen der ADS zeigt sich vor allem im Falle eines geplanten Ausstiegs aus der Kernenergie oder einer verzögerten Einführung schneller Reaktoren. ADS bieten außerdem Flexibilität für die Anpassung ursprünglicher Ziele an neue Bedingungen oder Anforderungen. Dieser letzte Punkt ist von großer Bedeutung, wenn die internationale Zusammenarbeit von Ländern mit unterschiedlichen kerntechnischen Zielrichtungen auf dem Gebiet der Minimierung radioaktiven Abfalls effektiver gestaltet werden soll.

Literatur

[1] Th. W. Tromm, C. Weßelmann: *Kernenergie*, BWK, Das Energie-Fachmagazin, 04/2005, S. 76-86

[2] P. Fritz, B. Kuczera*: Kompetenzverbund Kerntechnik, eine Zwischenbilanz über die Jahre 2000 bis 2004*, International Journal of Nuclear Power (atw) 06/2004

[3] *Nukleare Sicherheits- und Endlagerforschung*, Bericht der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) berufenen Arbeitsgruppe (Evaluierungskommission) vom 21. Januar 2000, www.grs.de/publikationen (Evaluierungsbericht)

[4] L. Behnke, J. Hofmeister, M. Löwenberg, T. Schulenberg: *Was ist Generation IV?,* FZKA 6967, Wissenschaftlicher Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe, 2004

[5] M. Salvatores et al.: *The Physics of TRU Transmutation - A Systematic Approach to the Intercomparison of Systems*, Proc. Internat. Conf. PHYSOR 2004, Chicago, April 25-29, 2004

[6] K. Kugeler et al.: *Zukünftige Optionen für die Entsorgung von hochradioaktiven Abfällen*, in *Perspektiven für die Energie der Zukunft*, Deutsche Physikalische Gesellschaft – Arbeitskreis Energie (13 Vorträge der Münchner Tagung, 2004), S. 25-54

BIOGENE SYNTHETISCHE KRAFTSTOFFE – BASIS NACHHALTIGER MOBILITÄT

Wolfgang Steiger[1]
Konzernforschung, Volkswagen AG, Wolfsburg

1. Triebfedern des Wandels

Die nachhaltige Sicherstellung zukünftiger Mobilität ist eine der größten Herausforderungen denen wir uns heute stellen müssen. So wie die persönliche Mobilität fester Bestandteil unseres Lebens ist, so wichtig ist sie für die wirtschaftliche Entwicklung eines Landes. Gerade Schwellenländer wie China und Indien sind es daher, die uns die Grenzen der Verfügbarkeit unserer fossilen Energien zukünftig aufzeigen werden.

Aber auch die mit der heutigen Mobilität verbundenen Umweltbelastungen werden in diesen Ländern in einem Maße aufgezeigt, wie es in den entwickelten Ländern schon fast in Vergessenheit geraten ist. Smogvorläufersubstanzen und Schwebstoffe aus den Auspuffroheren veralteter Fahrzeugtechnik sind allgegenwärtig. Durch die verstärkte Nutzung kohlenstoffhaltiger fossiler Brennstoffe wird aber auch die Anreicherung von Kohlendioxid in der Atmosphäre begünstigt. Auch die Mobilität trägt dazu, wenngleich auch in einem eher geringeren Umfang, bei. Dieser schleichende Prozess wird heute hauptverantwortlich gemacht für den Treibhauseffekt und den daraus zu erwartenden Klimawandel.

Diese drei Problemstellungen sind die Triebfedern eines Energiewandels, der insbesondere die steigende Berücksichtigung regenerativer Energieformen beinhaltet.

1.1 Lokale Schadstoffbelastung

Unter Umweltgesichtspunkten wird die Entwicklung von Kraftfahrzeugen und ihren Antrieben weiterhin durch ständig verschärfte Abgasstandards bestimmt, die beispielsweise in Kalifornien auch für konventionelle Antriebe praktisch die Null-Emission fordern. Aber auch in Europa setzt bereits die ab dem Jahr 2005 gültige Euro 4 Norm Standards, bei denen ein Fahrzeug mit Ottomotor bereits wenige Sekunden nach dem Kaltstart im Abgas niedrigere Konzentrationen limitierter Bestandteile aufweist als in der Umgebungsluft vorliegen. An der Luftqualität unserer Innenstädte ist dieser Einfluss bereits deutlich zu erkennen. (Abb.1) In zahlreichen Mega-Cities der Erde sieht dies allerdings noch anders aus. In Städten wie Kairo, Neu Delhi und Peking ist man weit von solchen Luftqualitäten entfernt. Alte Fahrzeuge in desolatem Zustand, keine Wartungssysteme und schlechte Kraftstoffe bei gleichzeitig extremem Verkehrsaufkommen und ungenügender Verkehrslenkung sorgen zusammen mit den Emissionen aus Privathaushalten und Industrie für diese Zustände.

[1] Wegen Verhinderung von Herrn Wolfgang Steiger wurde der Vortrag von Herrn Frank Seyfried, Konzern-Forschung, Volkswagen AG, gehalten

1.2 Globaler CO_2-Ausstoß

Darüber hinaus gewinnen aber auch Maßnahmen zur Reduktion von Verbrauch und CO_2-Emissionen einen ständig wachsenden Einfluss auf die Optimierung von Fahrzeug- und Antriebskonzepten. Mit dem dramatisch sinkenden Einfluss der Fahrzeugemissionen auf die Immissionssituation und damit die Luftqualität in den entwickelten Ländern wird sich dort voraussichtlich die Balance zwischen der Emission klassischer Abgasschadstoffe wie CO, HC und NOx und der Emission von CO_2 in Richtung zunehmender Wichtigkeit des CO_2 verschieben. Dies vor allem, da der Treibhauseffekt inzwischen weitgehend als Realität akzeptiert wird, obwohl ein objektiver Beweis noch aussteht.

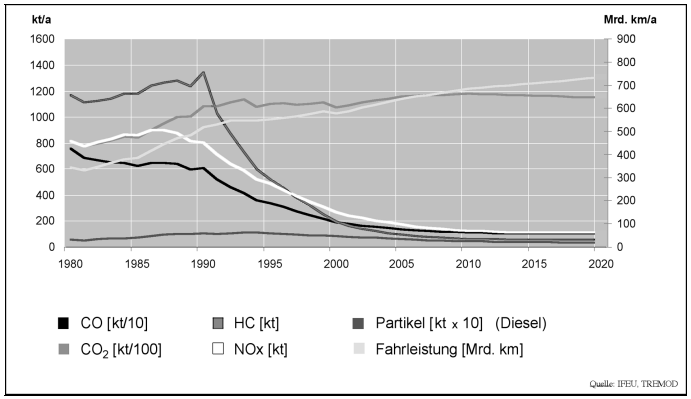

Abb. 1: Entwicklung der Pkw-Emissionen in Deutschland bis 2020

Erheblicher Druck wird auf die Automobilindustrie ausgeübt, da die verkehrsbedingten CO_2-Emissionen entgegen dem Trend der übrigen Schadstoffe noch weiter ansteigen werden. Rein objektiv betrachtet, spielt dies jedoch nicht die dominierende Rolle, da der Anteil der durch den Straßenverkehr erzeugten CO_2-Emissionen an den gesamten anthropogenen Emissionen z.B. in Deutschland nur ca. 11,5% beträgt und andere Emittenten wie die Industrie und Haushalte deutlich höhere Anteile halten. Bei der Betrachtung der CO_2-Emissionen verlassen wir die lokale Betrachtung und müssen den Bewertungsrahmen global und über die gesamte Produktkette von Herstellung, Verteilung, Betrieb und Verwertung ausdehnen. Eine objektive Bewertung von Alternativen wird damit ungleich schwerer gegenüber einer rein lokalen Betrachtung. Einzelmaßnahmen und -bewertungen verlieren daher ihre Wirksamkeit auf die Gesamtbelastung und können zu erheblichen Verzerrungen führen. Es daher notwendig einen

globalen Konsens herbeizuführen um dieser Aufgabenstellung gerecht zu werden, ansonsten drohen erhebliche Ungleichgewichte besonders in der Wirtschaftlichkeit unserer Industrieleistungen.

1.3 Primärenergieverbrauch

Eine weitere wichtige Facette in diesem Bild stellt die weltweit steigende Energienachfrage bei sich gleichzeitig abzeichnender sinkender Verfügbarkeit von preiswerten fossilen Primärenergieträgern, insbesondere von Mineralöl, dar. Vor allem die extreme Konzentration auf Erdöl als Primärenergieträger birgt erhebliche Risiken für die Zukunft. Die Mobilitätswirtschaft ist davon in besonderem Maße betroffen ist sie doch nahezu 100%ig abhängig von Erdölprodukten.

Um diese Vorkommen konkurrieren in Zukunft nun nicht nur die alten Industriestaaten, sondern zunehmend auch Aufsteigernationen wie China und Indien. Allein der tägliche Ölimport Chinas war im Februar dieses Jahres um rund 50 Prozent höher als im Durchschnitt des vergangenen Jahres. Ähnlich rasant entwickelt sich die indische Ölnachfrage.

Eine langfristig sichere Versorgung mit Energieträgern für den Individualverkehr, besonders vor dem Hintergrund politischer Instabilitäten in den Förderregionen, setzt deshalb neben einem möglichst sparsamen Umgang mit Kraftstoff, mittel- und langfristig eine Diversifizierung der für die Kraftstofferzeugung eingesetzten Energiequellen voraus, insbesondere die Einbeziehung alternativer und regenerativer Vorkommen.

2. Strategie

Aus den dargestellten Rahmenbedingungen ergeben sich drei konkrete Handlungsfelder in der Entwicklung zukünftiger Antriebskonzepte:

- Die konsequente weitere Erhöhung der Effizienz der Antriebsaggregate
- Die Einbeziehung alternativer Energiequellen zur Kraftstoffherstellung
- Die Entwicklung von CO_2-neutralen Pfaden zum Fahrzeugbetrieb

Auf dem Gebiet der Effizienzsteigerung wurden bereits in der Vergangenheit erhebliche Erfolge erzielt [1]. Im Vergleich der verschiedenen Verkehrsmittel zeigen sich die heutigen Pkw bereits als durchaus wettbewerbsfähig. Der mit modernster Antriebstechnologie ausgestattete Volkswagen 3L-Lupo stellt im Nahverkehr bereits das effizienteste Verkehrsmittel dar [2]. Dennoch geht die Entwicklung zu noch sparsameren Antriebssystemen weiter, wie das 1L-Auto der Volkswagen Forschung demonstrierte [3].

Die beiden weiteren Handlungsfelder beziehen sich auf die Kraftstoffe und sind mit den heutigen Ansätzen der Kraftstoffversorgung nicht zu lösen. Es ist daher notwendig ein neues innovatives System der Kraftstoffbereitstellung zu entwickeln.

Der Kern einer innovativen nachhaltigen Kraftstoffstrategie ist insbesondere eine Diversifizierung der Energiequellen. Eine Vielzahl von Rohstoffen soll der Erzeugung von Kraftstoffen dienen, die an bereits bestehenden Tankstellen vertrieben und von heutigen und zukünftigen Fahrzeugen genutzt werden können (Abb. 2).

Das Ziel ist vor allem die verstärkte Nutzung CO_2-neutraler regenerativer Energien wie Biomasse, neben Rohöl und Erdgas, zur Erzeugung flüssiger Kraftstoffe, die den heutigen Otto- und Dieselkraftstoffen ähneln. Der Vorteil: volle Kompatibilität mit der heute zur Verfügung stehenden Tankstelleninfrastruktur sowie den im Markt vorhanden Fahrzeugen bei gleichzeitiger deutlicher Reduktion der Emissionen, des Treibhausgasausstoßes sowie der Erdölabhängigkeit.

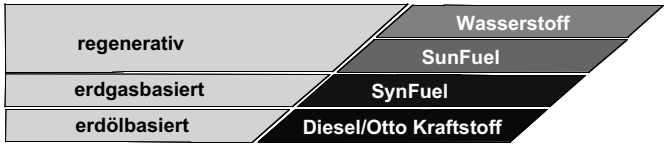

Abb. 2: Nachhaltige Kraftstoffstrategie

In einem zweiten Schritt werden die neuen Herstellungsprozesse dazu genutzt, den Kraftstoffen ganz gezielte Eigenschaften zu verleihen. Man spricht dann von Designerkraftstoffen. Diese werden in Zukunft als konstruktives Element bei der Motorenentwicklung genutzt. Neue Brennverfahren, die den Verbrauch und die Emissionen nochmals deutlich reduzieren, werden hierdurch ermöglicht. Aus der Kraftstoffstrategie wird eine Kraftstoff- und Antriebsstrategie. Die gemeinsame Entwicklung und Optimierung von Kraftstoffen und Antrieben gehen dann Hand in Hand.

Dieser Weg wird auch in weiterer Zukunft konsequent weiter beschritten. Sobald die technischen und wirtschaftlichen Herausforderungen gemeistert werden können, werden neben den Verbrennungsmotoren auch Brennstoffzellenfahrzeuge, mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff betrieben, im Markt auftauchen.

2.1 Konventionelle Diesel- und Ottokraftstoffe

Bei allen Zukunftsvisionen darf man die Gegenwart nicht außer Acht lassen. Kraftstoffe, die aus Mineralöl hergestellt werden, bestimmen unsere Mobilität heute, und werden dazu auch

noch in den kommenden Jahrzehnten einen wesentlichen Beitrag leisten. Weitere Verbesserungen wie z.B. die weltweite Reduzierung des Schwefelanteils sowie des Aromatenanteils beim Dieselkraftstoff werden die Emissionen der Fahrzeuge erheblich senken. Darüber hinaus können neue Motorentechnologien wie z.B. der direkt einspritzende Ottomotor (FSI®) sowie der direkt einspritzende Dieselmotor (TDI®) in allen Regionen der Welt eingeführt werden. Es sind bereits bewährte Technologien, die sowohl den Kraftstoffbedarf als auch die Abgasemissionen deutlich reduzieren.

2.2 Synthetische Kraftstoffe

Bei den herkömmlichen Kraftstoffen wird die Qualität des Kraftstoffs maßgeblich von der Zusammensetzung des Rohöls beeinflusst. Um sich davon zumindest teilweise abzukoppeln und den Anforderungen heutiger Motoren gerecht zu werden, müssen in den Raffinerien bereits heutige aufwendige Nachbearbeitungsverfahren überwiegend mit Hilfe von Wasserstoff eingesetzt werden. Eine völlige Abkopplung von der eingesetzten Primärenergie wird bei den synthetischen Kraftstoffen erreicht. Dazu wird der primäre Energieträger im Wesentlichen in zwei Molekühle CO und H_2 zerlegt und anschließend in einem Syntheseverfahren zu einem Kohlenwasserstoff unter Abgabe von Wasser umgewandelt. Man unterscheidet synthetische Kraftstoffe nach verschiedenen Kategorien (Abb.3).

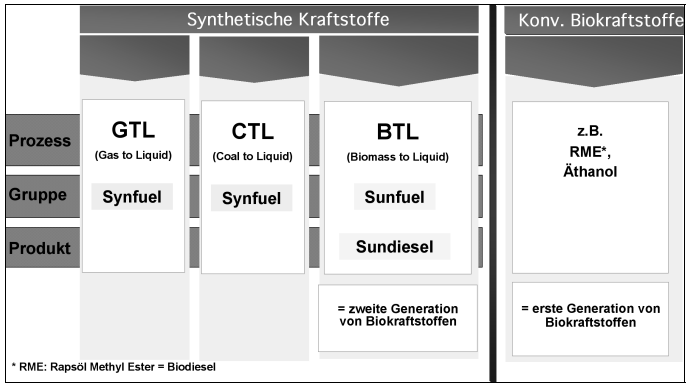

Abb. 3: Systematisierung synthetischer Kraftstoffe

Eine erste Systematisierung richtet sich nach dem Ausgangsstoff. Danach gibt es die Klassen Gas-to-Liquid GtL, Coal-to-Liquid CtL und Biomass-to-Liquid BtL. Eine andere Darstellung fasst die auf fossiler Energie basierenden Kraftstoffe unter dem Begriff SynFuel und die auf regenerativer Energie basierenden als SunFuel zusammen.

2.2.1 SynFuel

In den nächsten Jahren wird insbesondere ein verstärkter Einsatz von Erdgas, hervorgerufen z.B. durch die deutliche Steuerermäßigung in Deutschland, erfolgen. Erdgas kann und wird direkt zum Fahrzeugantrieb genutzt werden. Allerdings ist wegen der bekannten Nachteile bezüglich Reichweite und Platzbedarf für den Tank, die für alle gasförmigen Kraftstoffe gelten, und des zunehmenden Aufwandes für die Abgasnachbehandlung zur Erfüllung strenger Abgasgrenzwerte wie Euro IV, kein Ersatz der heutigen Kraftstoffe durch Erdgas zu erwarten, sondern nur eine begrenzte Ergänzung. Aus Erdgas können aber auch mit bekannten und großtechnisch erprobten Verfahren wie der Shell-Mittel-Destillat-Synthese (SMDS) andere Sekundärenergieträger hergestellt werden.

Erdgas wird dazu in einer ersten Verfahrensstufe mittels einer Dampfreformierung in ein Synthesegas, eine Mischung aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid umgewandelt. Aus diesem Synthesegas kann über eine Fischer-Tropsch-Synthese konventioneller Kraftstoff, insbesondere Dieselkraftstoff hoher Qualität, ohne Schwefel- und Aromatengehalt, hergestellt werden. Diese sogenannte Gas-To-Liquid Technologie (GTL) ist beim heutigen Rohölpreis-Niveau in vielen Regionen der Erde, in denen kostengünstig Erdgas oder Erdölbegleitgas anfällt, höchst wirtschaftlich. Bis zu einer stabilen und relevanten Versorgung mit diesen synthetischen Kraftstoffen werden sicherlich noch 5 bis 8 Jahre vergehen, die notwendig sind für die Investitionen und den Bau der Syntheseanlagen. Dies stellt daher eine kurz- bis mittelfristige Lösung dar.

2.2.2 SunFuel

Die bei der Herstellung synthetischer Kraftstoffe anfallende Zwischenstufe Synthesegas ermöglicht nun zusätzlich den Einsatz auch regenerativer Energieträger, wie Restholz, Reststroh, Energiepflanzen oder Biomüll. Entscheidend ist, dass dabei die Qualität des Endproduktes nicht von der Beschaffenheit der eingesetzten Primärenergie abhängig ist. Mit dieser Lösung werden die endliche Verfügbarkeit und die CO_2-Emission der synthetischen Kraftstoffe beseitigt.

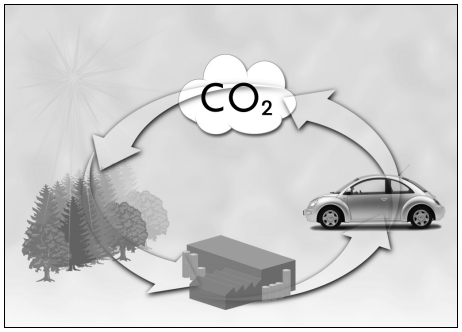

Abb. 4: CO_2-Kreislauf mit SunFuel

Die im jährlichen Pflanzenwachstum auf der Erde gespeicherte Energie entspricht etwa dem zehnfachen Energieverbrauch der Menschheit, d.h. es existiert ein enormes Ersatzpotential. Auch aus politischer Sicht ergibt sich durch den Einsatz von Biomasse eine Entspannung auf dem Versorgungssektor, da gegenüber den fossilen Energieträgern die Biomasse relativ gleichmäßig über die Erde verteilt ist. Die CO_2-Emission wird damit lokal nicht zu Null, aber es wird ein nahezu CO_2-neutraler Kreislauf geschaffen, dessen Antriebsenergie die Sonne liefert (Abb. 4). Aus diesem Grund bezeichnet man ein so erzeugtes SynFuel als „SunFuel®“. Damit integrieren wir den Kraftstoffzyklus in den natürlichen CO_2-Kreislauf, der ca. 98% der gesamten CO_2-Emissionen beinhaltet.

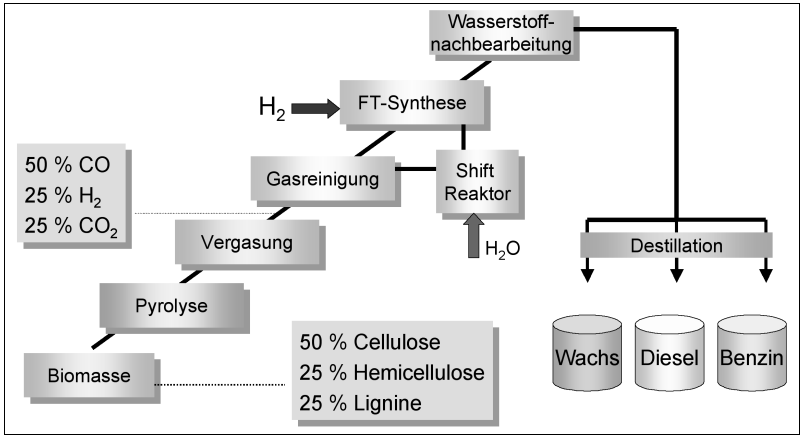

Abb. 5: Schematische Darstellung eines BtL-Verfahrens

Abbildung 5 beschreibt schematisch eine Anlage zur Erzeugung von SunFuels. Dabei wird die Biomasse in einem ersten Schritt mittels Pyrolyse in eine Mischung aus gasförmigen und

flüssigen Kohlenwasserstoffen umgewandelt. In einem weiteren Schritt mittels Vergasung dann das Synthesegas erzeugt. Die dabei anfallende Schlacke enthält unter anderem alle mineralischen Bestandteile der Pflanzen, die während des Wachstums aufgenommen wurden. Das Synthesegas wird anschließend z.B. in einer Fischer-Tropsch-Synthese mit nachfolgender Wasserstoffnachbearbeitung in hochwertigen Kraftstoff umgewandelt.

Dieser Lösungsansatz eines biomassebasierten SunFuels® kann als mittelfristig bezeichnet werden, da er heute noch nicht wirtschaftlich tragbar ist. Im Vergleich zu erdöl- oder erdgasbasiertem Kraftstoff (ca. 30 €-Cent/Liter) ergibt sich ein Kostennachteil von ca. 15 bis 25 €-Cent/Liter in den reinen Herstellungskosten ohne Steuern (basierend auf einer Anlagengröße von 200 $MW_{th)}$. Jedoch liegen die Herstellungskosten deutlich unterhalb heutiger Tankstellenpreise in Europa, so dass es in der Hand der Politik liegt, durch entsprechende Steuergesetzgebung die Verfahrensentwicklung und eine erste Einführung dieser Kraftstoffe zu fördern, bis die wirtschaftliche Machbarkeit dargestellt werden kann. Die derzeit für Deutschland beschlossene Steuerbefreiung bis 2009 wird alleine nicht ausreichen, um dies zu gewährleisten.

Sobald kostengünstiger regenerativ erzeugter Wasserstoff zur Verfügung steht, könnte dieser auch dem SunFuel Herstellungsprozess zugefügt werden. Hierdurch ließe sich dessen Ausbeute an Kraftstoff nahezu verdoppeln. Dies bedeutet auch, dass die Implementierung einer Wasserstoffwirtschaft nicht zwangsläufig die Nutzung von Wasserstoff in der Mobilitätswirtschaft zur Folge hat. Gerade im Sinne einer Nachhaltigkeit könnten sich synthetische Kraftstoffe auf Basis von Biomasse unter ganzheitlicher Betrachtung als sinnvoller erweisen.

2.2.3 Pflanzenbasis für SunFuels

Die zur Verfügung stehende Biomasse kann im Wesentlichen auf die zwei Bereiche Reststoffe und den Anbau von Energiepflanzen konzentriert werden (Abb.6). Durch die besondere Art der Herstellung synthetischer Kraftstoffe sind dabei grundsätzlich sowohl Hölzer, als auch Gräser und Halmgüter geeignet.

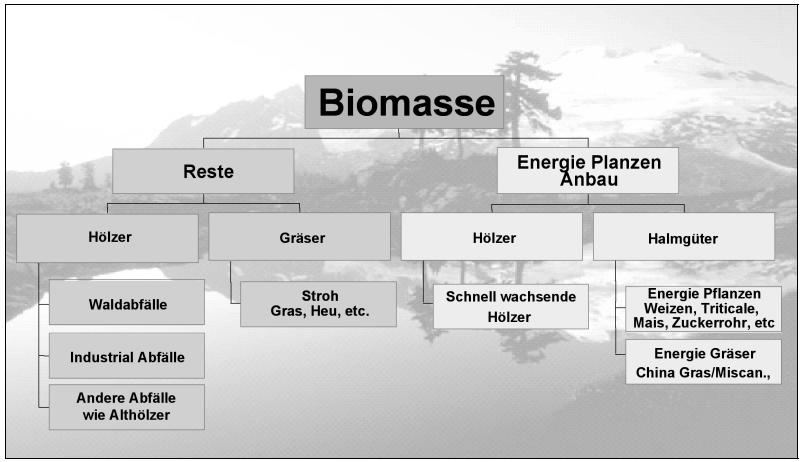

Abb. 6: Klassierung von Biomasse zur energetischen Nutzung

Bei den holzartigen Reststoffen kommen sowohl die Waldholzreste als auch die aus der industriellen Nutzung entstehenden Reste in Frage. Besonders die industriellen Reste sind aufgrund ihres zentralen Anfalls gut geeignet. Sowohl beim Holzeinschlag, als auch bei der Weiterverarbeitung fallen jeweils ca. 30% Restholz ab. Da zudem in Europa deutlich mehr Holz nachwächst als eingeschlagen wird, ergibt sich hieraus ein erhebliches technisches Potential.

Gras und Halmgutabfälle stellen ein weiteres Potential dar. Stroh ist für die Vergasung besonders gut geeignet, da es über eine niedrige Schmelztemperatur verfügt und somit den Schlackeabfluss im Vergaser begünstigt. Ebenso können industrielle und kommunale biogene Abfälle genutzt werden, die heute vor allem in Kompostierungsanlagen verarbeitet werden. Eine ökologisch sinnvollere Alternative, da die Kompostierung letztlich die Vergeudung biogener Energie unter nicht unerheblicher Aufwendung fossiler Energie bedeutet.

Reststoffe stellen insgesamt eine finanziell attraktive aber allein nicht ausreichende Energieressource dar. Zum Beispiel werden heute bereits ca. 50% der Holzreste, zumeist als Brennstoff, genutzt, stehen daher nicht für die Kraftstoffproduktion zur Verfügung. Genauere Mengeangaben sind schwer zu erhalten. Schätzungen gehen meist weit auseinander. Als relativ gesichert kann aus Reststoffen ein Substitutionspotential in Europa von mehr als 5 % des Kraftstoffbedarfs abgeschätzt werden.

Langfristig benötigt die ganzjährige sichere Versorgung der Produktionsanlagen zusätzlich den gezielten Anbau von geeigneten Energiepflanzen. Dabei ist durch die Mischung der Pflanzenarten und Vegetationsperioden eine mit geringen Lagerkapazitäten und unterschiedlichen Witterungsbedingungen auskommende landwirtschaftliche Erzeugung das Ziel. Auch bei den Energiepflanzen kann zwischen den holz- und gras- bzw. halmgutartigen Pflanzen unterschieden werden. Bei den Hölzern kommen neben der Nutzung konventioneller Hölzer aus der Waldwirtschaft vor allem Schnellwachsende Holzarten aus Plantagen in Frage. Weide und Pappel sind hierbei die am häufigsten genannten Arten. In zwei oder dreijährigen Schnittperioden lassen sich damit Hektarerträge von bis zu 12 Tonnen pro Jahr erzielen. Der Pflegeaufwand ist gering, da eine Bodenbearbeitung und auch Düngung während der Kultivierungsphase weitgehend nicht notwendig ist. Gesicherte Ergebnisse konnten hierzu bereits in verschiedenen Projekten ermittelt werden.

Die wohl interessanteste Alternative stellen allerdings die Agrarbiomassen dar. Anders als bei der bisherigen Herstellung von Biokraftstoffen wie Biodiesel und Bio-Ethanol sind keine Monokulturen erforderlich. Vielmehr liegt der Reiz in einer optimierten Diversifizierung der Biomassen zu einem optimalen Gesamtkonzept. Ziel der Optimierung sind dabei vor allem die Ertragssteigerung, ganzjährige Versorgungssicherheit, Vermeidung von Ausfällen bei sich ändernden Witterungsbedingungen und die Kostenoptimierung auch durch den reduzierten Einsatz von Düngemitteln und Pestiziden.

Von besonderem Interesse ist der Mehrfachanbau, wie er z.B. von Prof. Scheffer von der FH Kassel verfolgt wird [4]. Dieses neue Anbausystem beruht auf der Ernte von möglichst zwei Kulturen pro Jahr. Eine Zweifachnutzung wird möglich, da die Ausreife der Erstkulturen nicht abgewartet und somit Vegetationszeit für den Anbau einer Zweitkultur gewonnen wird. Die Zweitkultur wird nach der Ernte der Erstkultur ohne Bodenbearbeitung zwischen die Stoppeln gesät. Die Stoppeln der Vorfrucht bieten einen idealen Schutz vor Bodenerosion. Beispiele für überwinternde Kulturen sind die heimischen Getreidearten, des weiteren Raps und Rübsen, Futterpflanzen und Stickstoff fixierende Winterleguminosen. Als Folgekulturen können die hochproduktiven Pflanzen Mais, Hirse, Sonnenblumen, Hanf, Ölrettich und Gräser angebaut werden.

Artenvielfalt und Nutzung pflanzengenetischer Ressourcen sind in beliebiger Vielfalt möglich. Da Reifetermine nicht abgewartet werden müssen, kann fast jede Form von Sorten- und Artenmischungen gewählt werden. An die Pflanzenarten werden keine besonderen Qualitätsansprüche gestellt. Damit erweitert sich das Spektrum der nutzbaren Herkünfte bis hin zur Nutzung vieler sonst nur in Genbanken aufgehobener pflanzengenetischer Ressourcen. Wie Versuche mit Gerste und Weizen gezeigt haben, können alte Sorten einen höheren Gesamtertrag als moderne Sorten bringen. Ackerwildpflanzen (Unkräuter) sind für Kulturpflanzen nicht nur Konkurrenten um Standort, Wasser und Nährstoffe sowie Wirtspflanzen und Zwischenwirte für Krankheiten und Schädlinge, sondern auch mit ihren Blüten und Blättern Nahrungsgrundlage für viele Nützlinge eines Agrarökosystems. Sie sind somit Teil der Artenvielfalt, die angestrebt wird. Bei dem Zweikulturnutzungssystem und der thermischen Verwertung der Biomasseaufwüchse können im Gegensatz zu anderen Anbauverfahren und Ver-

wertungsrichtungen die Ackerwildpflanzen weitgehend toleriert werden, weil diese Pflanzenarten einen Teil des Gesamtertrages ausmachen. Neben Herbiziden scheidet auch die Anwendung von Fungiziden und Insektiziden aus, weil bei früher Ernte Schaderreger wenig Ertragsverluste hervorrufen. Dieses Anbaukonzept mit seiner Artenvielfalt ist nur dann zu realisieren, wenn die Biomasse feucht geerntet und feucht konserviert wird.

Die jährlichen Erträge an Trockenmasse liegen bei ausreichenden Niederschlägen und guter Bodenqualität um mindestens 50 % höher als bei konventionellem Anbau von Energiepflanzen wie Triticale. Die von Scheffer et alt. erzielten Erträge von 20 bis 28 t TM/ha entsprechen einem Heizöläquivalent von ca. 8.000 bis 12.000 Liter/ha.

Diesem gesamten Themenkomplex widmet sich eine Kooperation zwischen den Bundesländern Brandenburg, Niedersachsen, Hessen und der Volkswagen AG. In den nächsten drei Jahren sollen in verschiedenen Projekten die Darstellung einzelner Systeme zur Energiepflanzenerzeugung optimiert und bewertet werden.

Insgesamt besteht nach heutigem Wissensstand ein gesichertes mittelfristiges Potential um auf ca. 10% der landwirtschaftlichen Nutzfläche der EU25 15 bis 20% des Kraftstoffbedarfs der EU25 darzustellen. Dabei bleibt das noch nicht erschlossene Potential einer Wirkungsgradsteigerung der Prozesse und vor allem der Biomassengewinnung unberücksichtigt.

2.2.4 Motorische Vorteile synthetischer Kraftstoffe

Diese synthetischen Kraftstoffe besitzen ein hohes Potential zur Verbesserung der motorischen Brennverfahren. Die Spezifikation eines synthetischen Dieselkraftstoffs besticht vor allem durch die hohe Cetanzahl und die Aromaten- und Schwefelfreiheit. Als Beispiel sind in Abb.7 die Emissionsverbesserungen des synthetischen Kraftstoffs Shell-GtL gegenüber einem handelsüblichen schwefelfreien Dieselkraftstoff dargestellt.

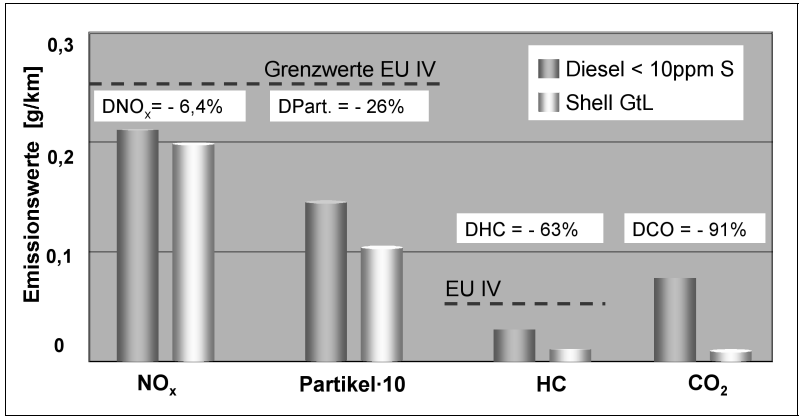

Abb. 7: Synthetischer Kraftstoff im Dieselmotor

Die Ergebnisse wurden anlässlich eines Flottenversuchs mit 25 Golf TDI in Berlin gemessen. Es zeigt sich, dass selbst auf der Basis neuster Technologie, die Golf TDI Fahrzeuge erfüllten auch mit Dieselkraftstoff die Grenzwerte der Euro IV Norm, noch substanzielle Verbesserungen erzielt werden. Mit älteren Konzepten wurden zudem Partikelreduzierungen von mehr als 50% gemessen und all dies ohne Änderung der Kalibrierung. Teilweise können bei der Verwendung dieser Kraftstoffe mit EU III-Fahrzeugen, ohne die Kalibrierung anzupassen, wie es bei einem Einsatz in bereits im Feld befindlicher Dieselmotoren der Fall wäre, ohne weitere Maßnahmen die EU IV -Partikelgrenzwerte unterschritten werden [5].

2.2.5 SynFuels als Designerkraftstoff für neue Brennverfahren

Neben den direkten Vorteilen beim Einsatz in heutigen Motoren bieten synthetisch hergestellte Kraftstoffe die Möglichkeit einer optimalen Anpassung der Kraftstoffeigenschaften an die Verbrennung. Deutliche Verbesserungen der Motorrohemissionen bei gleichzeitig reduziertem Kraftstoffverbrauch erscheinen dadurch möglich. Damit lassen sich sog. Homogene selbstzündende Brennverfahren darstellen die bezüglich ihrer spezifischen Merkmale zwischen den heutigen Diesel- und Ottomotorischen Verfahren ansiedeln lassen.
Grundlage dieser Verfahren ist ein neuer synthetischer Kraftstoff. Soweit heute zu übersehen, ist im Wesentlichen das Verdampfungs- und Zündverhalten, also dessen Komposition von entscheidender Bedeutung. Soll eine stärkere Homogenisierung der Gemischwolke erreicht werden, ohne dass die Selbstzündung zu früh beginnt, benötigt man einen Kraftstoff mit “frühem Siedebeginn und –ende“ sowie “reduzierten Selbstzündungseigenschaften“. Diese Eigenschaften steigen an in der Reihenfolge Diesel→ Kerosin → Naphtha → Ottokraftstoff. In Versuchen wurde die NOx-reduzierende Wirkung dieser Eigenschaften eindeutig nachgewiesen [6][7].

Zur Realisierung dieser Verfahren sind noch zahlreiche Hürden zu überwältigen. Im stationären Betrieb konnten diese bereits sehr stabil dargestellt werden. Der dynamische Betrieb setzt aber die Entwicklung völlig neuer Regelkonzepte, Sensoren und Aktuatoren voraus. Mit einer Markteinführung ist daher in diesem Jahrzehnt nicht mehr zu rechnen.

2.3 Wasserstoff

Das höchste Wirkungsgradpotential als Einzelaggregat zum Antrieb eines Fahrzeugs hat aus heutiger Sicht die mit Wasserstoff betriebene Brennstoffzelle. Vorraussetzung ist allerdings die Verfügbarkeit von Wasserstoff.

Wasserstoff ist ein Energieträger, d.h. er wird aus einer Energiequelle gewonnen ist daher ebenfalls ein synthetischer Kraftstoff. Nutzt man zu seiner Herstellung Erdgas oder andere fossile Energiequellen, verliert er seine bestechenden Vorteile. Ähnlich wie bei einem Elektroauto, das lokal emissionsfrei fährt, kommt der dafür benötigte Strom nicht aus der Steckdose, sondern wird durch Kraftwerke erzeugt. Deren globale CO_2-Emissionen sind größer als die eines effizienten konventionellen Fahrzeugantriebs.

Deshalb gilt: Nur aus regenerativen Energiequellen erzeugter Wasserstoff ist ein Schritt in die Zukunft. Bis jedoch Wasserstoff als Energieträger für die mobile Anwendung zur Verfügung steht, sind einige technische und wirtschaftliche Probleme zu lösen:

- bei der regenerativen Herstellung
- bei der Speicherung im Fahrzeug für praxisgerechte Reichweiten und akzeptablen Wasserstoffverlust
- beim Aufbau eines [noch] sehr kostspieligen Verteilungsnetzes. Dieses muss zudem nicht nur deutschlandweit erstellt werden.

Der Einsatz von Wasserstoff als Energieträger ist daher nur in den sehr effizienten Brennstoffzellen sinnvoll. Die Nutzung von Wasserstoff für Verbrennungsmotoren rechtfertigt nicht die aufwendige Verteilung und Speicherung. Hier ist es sinnvoller, Wasserstoff in der Produktion von SunFuel einzusetzen, wodurch das technisch umsetzbare Potenzial von SunFuel verdoppelt werden kann. Aber auch der Einsatz von regenerativ erzeugtem Wasserstoff in Raffinerien z.B. zur Entschwefelung der konventionellen Kraftstoffe kann einen erheblichen Beitrag zur CO_2-Entlastung bei deutlich geringeren Investitionskosten leisten.

Volkswagen sieht einen sinnvollen Einsatz von Wasserstoff als Energieträger für die Mobilität erst in 20 bis 30 Jahren. Wir brauchen aber eine schneller umsetzbare Lösung, um auch schon in naher Zukunft einen Beitrag zur nachhaltigen Mobilität leisten zu können.

3. Schlussfolgerungen

Mit der Annäherung an die technische Fördergrenze für Erdöl und den steigenden Weltenergiebedarf werden alternative Energieträger in Zukunft schnell an Bedeutung gewinnen müssen. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an die konventionellen Kraftstoffe bezüglich deren Qualität und Reinheit. Die damit verbundenen Kostensteigerungen begünstigen die Einführung in der Regel teurerer Alternativen.

Volkswagen sieht daher in den kommenden Jahren eine Kraftstoffevolution, die von den konventionellen erdölgebundenen Kraftstoffen über synthetisch aus Erdgas erzeugte SynFuels hin

zu biomassebasiertem SunFuel® führt. Erst in ferner Zukunft, wenn alle Technologiebarrieren überwunden sind, kann sich Wasserstoff als Energieträger in der mobilen Anwendung einbringen. Abbildung 8 beschreibt ein solches Szenario. Unter der Randbedingung des heutigen Wissens um die Nutzung landwirtschaftlicher Flächen und die Effizienz der Verfahren erscheint eine Substitution von 15 bis 20% des EU-Kraftstoffbedarfs durch SunFuels möglich.

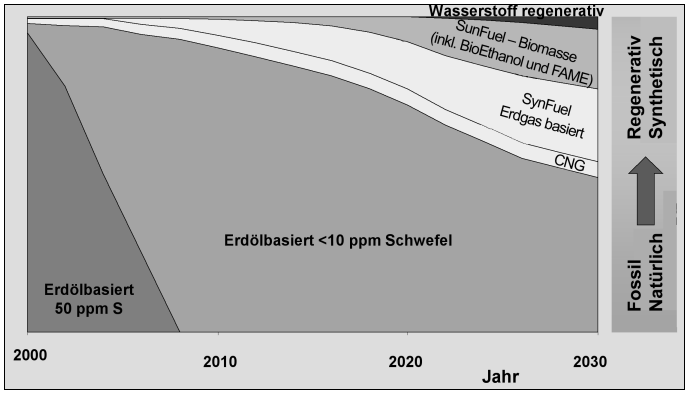

Abb. 8: Szenario Kraftstoffverteilung Europa

Durch Verbesserungen in der Biomassenproduktion, der Verfahren und Logistik erscheinen auch noch höhere Werte realisierbar. Voraussetzung sind allerdings auch stabile Rahmenbedingungen, wie ein nachhaltiges Bekenntnis der Politik für biogene Kraftstoffe.

Es gibt somit eine Basis nachhaltiger Mobilität: SunFuel.

Literatur:

[1] Der Volkswagen, Umweltbericht 2002

[2] Georg W. Schweimer: Sachbilanz des 3L-Autos, Sonderdruck VW-Forschung, Wolfsburg 31. Juli 1998

[3] Das 1L-Auto, Flyer anlässlich der Hauptversammlung des VW Konzerns, Hamburg April 2002

[4] Konrad Scheffer: Optimierte Konzepte für den Anbau und die energetische Nutzung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen, Institut für Nutzpflanzenkunde der Universität Kassel /Witzenhausen

[5] W. Steiger, W. Warnecke, J. Louis : Potentiale des Zusammenwirkens von modernen Kraftstoffen und künftigen Antriebskonzepten, ATZ 2/2003

[6] W. Steiger: Die Volkswagen Strategie zum hocheffizienten Antrieb, 22. Wiener Motorensymposium 2001, 26.+27. April 2001, Wien

[7] W. Steiger: Potentiale synthetischer Kraftstoffe im CCS Brennverfahren, 25. Wiener Motorensymposium 2004, 26.+27. April 2004, Wien

Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie in Deutschland an Land und Offshore bis zum Jahr 2020 (dena-Netzstudie)

durch die Projektsteuerungsgruppe:

Bundesverband Windenergie, ENOVA GmbH, E.ON Netz GmbH, EWE AG, Offshore-Bürger-Windpark Butendiek GmbH & Co. KG, Offshore Forum Windenergie, Plambeck Neue Energien AG, Projekt GmbH, RWE Transportnetz Strom GmbH, Vattenfall Europe Transmission GmbH, VDMA Fachverband Power Systems e.V., Verband der Elektrizitätswirtschaft e.V., Verband der Netzbetreiber e.V., VGB PowerTech e.V., WINKRA-ENERGIE GmbH, Wirtschaftsverband Windkraftwerke e.V., Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e.V., das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit sowie das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Gast)

Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse der Studie

vorgetragen von

Stephan Kohler

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)

Gliederung Seite

1. Hintergrund der dena-Netzstudie 70
2. Ziel und Rahmen der Untersuchung 71
3. Entwicklung der Windenergie 74
4. Netzverstärkung und Netzausbau 75
   Netzausbau an Land 76
   Netzausbau auf See 76
   Sicherheit des Höchstspannungsübertragungsnetzes 77
5. Auswirkungen auf den Kraftwerkspark 78
   Basisszenario ohne CO_2-Aufschlag 78
   Basisszenario mit CO_2-Aufschlag 79
   Alternativszenario mit CO_2-Aufschlag 80
   Regel- und Reserveleistung 80
6. Kostenentwicklung 81
   Veränderung der Kosten für nicht privilegierten Endverbrauch 82
   Veränderung der Kosten für privilegierten Endverbrauch 82
   CO_2-Vermeidungskosten 83
   Netzausbaukosten und Veränderung der Netznutzungsentgelte 83

Anhang mit Tabellen und Abbildungen 84

Anmerkungen 91

Berlin, 23.02.2005

1. Hintergrund der dena-Netzstudie

Die Elektrizitätsversorgung ist ein wichtiger Standortfaktor für die Entwicklung einer Volkswirtschaft. Notwendige energiewirtschaftliche und energiepolitische Entscheidungen von mittel- und langfristiger Tragweite, die ein günstiges Investitionsklima für eine nachhaltige Wirtschaftsentwicklung in einem Industrieland wie Deutschland fördern sollen, müssen langfristig vorbereitet werden.

Derzeit dominieren in Deutschland im aktuellen Energiemix zur Stromerzeugung die nuklearen und fossilen Energieträger. Zur Verringerung von globalen Umweltproblemen, die mit der konventionellen Energiegewinnung aus Gas, Kohle, Öl und nuklearen Brennstoffen verbunden sind (u. a. Treibhauseffekt, Verbrauch endlicher Ressourcen, Luftverunreinigungen und/oder Strahlen- und Endlagerrisiken) und zur Verringerung der Abhängigkeit von endlichen Ressourcen, wird sich die Elektrizitätsversorgung verändern müssen. Die Bundesregierung hat sich das Ziel gesetzt, die gesamten CO_2-Emissionen von derzeit 859 Mio. t/a bis zur Periode 2008/12 auf 846 Mio. t/a zu reduzieren. In den Sektoren Energieerzeugung und Industrie müssen die CO_2-Emissionen von derzeit 503 Mio. t/a auf 495 Mio. t/a bis 2008/12 gesenkt werden. Eine wichtige Strategie, um die CO_2-Minderungsziele zu erreichen, ist eine verstärkte Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien. In Deutschland hat ihr Anteil am Stromverbrauch in 2004 10% erreicht und zeigt eine steigende Tendenz. Die Windenergie hat aufgrund ihres enormen Wachstums und der sich weiter abzeichnenden Entwicklung an Land und auf See sowie aufgrund der sich abzeichnenden Exportpotentiale industriepolitische Bedeutung erlangt.

Die Bundesregierung fördert diese Entwicklung maßgeblich und strebt einen weiteren Ausbau der Erneuerbaren Energien an. Bis zum Jahr 2010 soll der Anteil der Erneuerbaren Energien am Stromverbrauch auf mindestens 12,5% und bis 2020 auf mindestens 20% ansteigen. Bis 2050 sollen weitere deutliche Zuwächse erreicht werden. Zum Erreichen dieser Ziele soll die Windenergie einen maßgeblichen Beitrag leisten. Gemäß der Strategie der Bundesregierung zum Ausbau der Windenergienutzung auf See könnten bis 2010 in Nord- und Ostsee Windenergieanlagen mit einer installierten Leistung von 2 bis 3 GW und bis 2025/30 von 20 bis 25 GW errichtet werden. Aus der Umsetzung dieser Strategie resultiert eine sehr starke räumliche Konzentration von Windenergieleistung in Norddeutschland, einer Region mit geringer Strom-nachfrage. Zudem ist die Stromerzeugung aus Windenergie von starken tages- und jahres-zeitlichen Schwankungen geprägt.

Hieraus ergeben sich neue Anforderungen an den gesamten Kraftwerkspark. Der in den nächsten zwanzig Jahren notwendige Erneuerungs- und Umstrukturierungsprozess in der deutschen Stromwirtschaft schafft den notwendigen Spielraum für die verstärkte Integration von Wind-strom: Von der in Deutschland derzeit installierten Bruttostromerzeugungskapazität in Höhe von rund 121.000 MW werden in den kommenden Jahren und Jahrzehnten altersbedingt und zur Umsetzung des Atomkonsenses zahlreiche Kraftwerke außer Betrieb gehen. Der Ersatz-bedarf liegt bei etwa 40.000 MW bis 2020.

Planungen für die bevorstehenden Ersatzinvestitionen im fossilen Kraftwerksbereich werden auch vom steigenden Anteil regenerativer Energieträger an der Stromerzeugung und der Vorrangregelung des EEGs für Strom aus Erneuerbaren Energien beeinflusst. Die technischen Kraftwerkseigenschaften müssen an den fluktuierenden und vorrangig einzuspeisenden Windstrom angepasst werden.

Die Aufgabe des elektrischen Verbundnetzes ist es, u. a. unterschiedliche Stromerzeugungs- und Verbrauchs-Charakteristiken zu synchronisieren. Spezifische Nachfrageprofile einzelner Ver-braucher (Haushalte/Betriebe) und/oder Regionen (Stadt/Land) müssen dabei mit den unterschiedlichen Kraftwerken, die jeweils eigene Kosten- und Lastcharakteristiken aufweisen, vernetzt werden. Die verbundwirtschaftliche Zusammenarbeit soll die Gesamt-Systemkosten senken, sowie das Zuverlässigkeitsniveau der deutschen Stromversorgung und die Beibehaltung eines sicheren Verbundbetriebes mit den europäischen Partnern gewährleisten. Beeinflusst wird die Entwicklung auch vom Aufbau des europäischen Binnenmarktes und des internationalen Stromhandels.

Die Verantwortung für das sichere und zuverlässige Funktionieren des Verbundsystems tragen die Übertragungsnetzbetreiber. Sie gleichen planbare aber auch unerwartete Lastschwankungen, Kraftwerksausfälle und Engpässe im Übertragungsnetz ihrer Regelzone aus. Reserven für Systemdienstleistungen müssen vorgehalten werden, um den Stromkunden eine hohe Versorgungsqualität u. a. hinsichtlich der Frequenz- und Spannungshaltung zu bieten. Zum Einsatz kommen dabei Primärregel-, Sekundärregel- und Minutenreserve sowie im Einzelfall auch Kraftwerke zur Stundenreserve, die Strom bei länger andauernden Kraftwerksausfällen oder Lastveränderungen in das Netz einspeisen können.

Um Versorgungssicherheit und Netzstabilität zu erreichen, sind in den vergangenen Jahrzehnten die Übertragungsnetze hauptsächlich entsprechend den Anforderungen der fossilen und nuklearen Kraftwerksstandorte ausgebaut worden. Die immer leistungsstärker werdenden Kraftwerksblöcke haben den Netzausbau in der Vergangenheit sehr stark geprägt.

2. Ziel und Rahmen der Untersuchung

Für den weiteren Ausbau der Erneuerbaren Energien ist eine effiziente Integration von Windenergieleistungen an Land und auf See in das elektrische Verbundsystem sehr wichtig, da Windenergie mittelfristig das größte Potential hat, um den Anteil Erneuerbarer Energien am Stromverbrauch zu erhöhen.

Die anstehenden Veränderungen setzen Entscheidungen über kapitalintensive Investitionen voraus, deren Wirkungen sich über mehrere Jahrzehnte erstrecken. Eine verlässliche energiewirtschaftliche Planungsgrundlage und die Verständigung zwischen den beteiligten Akteuren ist eine der Grundvoraussetzungen für möglichst optimale Lösungen. Die von der Deutschen

Energie-Agentur GmbH (dena) in Auftrag[1] gegebene Studie *Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie in Deutschland an Land und Offshore bis zum Jahr 2020* (dena-Netzstudie) soll eine grundlegende und von möglichst vielen Akteuren getragene, langfristige energiewirtschaftliche Planung ermöglichen. Finanziert wurde die dena-Netzstudie anteilig von Verbänden und Unternehmen der Wind-, Netz-, Anlagenhersteller- und konventionellen Kraftwerksbranche, sowie dem Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit[2]. Sie wurden über eine studienbegleitende Projektsteuerungsgruppe und einen Fachbeirat direkt in die Erarbeitung der Studie eingebunden. Alle Entscheidungen wurden im Konsens getroffen. Die dena hat das gesamte Studienprojekt initiiert, leitete die Gremien „Projektsteuerungsgruppe“ und „Fachbeirat“ und war darüber hinaus für das Projektmanagement verantwortlich.

Die Ergebnisse der dena-Netzstudie wurden von zwei Sachverständigen[3] studienbegleitend geprüft. Sie haben die Projektsteuerungsgruppe und den Fachbeirat beraten, sowie Zwischenergebnisse und den Endberichtsentwurf geprüft. Ihre Erkenntnisse legten sie in gutachterlichen Stellungnahmen dar. Die Projektsteuerungsgruppe formulierte diese Zusammenfassung unter Berücksichtigung der Erkenntnisse und Kritik. Die von den Sachverständigen darüber hinaus gehend formulierten Anregungen wurden auch bei der Ausgestaltung der Aufgabenstellung für den Teil II der dena-Netzstudie aufgenommen.

In der dena-Netzstudie wurden zunächst Szenarien einer verstärkten Nutzung regenerativer Energieträger für die Jahre 2007, 2010, 2015 und 2020 erarbeitet. Im Vordergrund stand dabei eine räumlich sehr differenzierte Abbildung des Windenergieausbaus an Land und auf See und die Zuordnung des Windenergieausbaus zu einzelnen Netzknoten. Aufbauend auf den Szenarien zum Windenergieausbau wurden die Auswirkungen der Windenergie auf die Übertragungsnetze und die Auswirkungen der Windenergieeinspeisung auf den übrigen Kraftwerkspark untersucht. Schwachstellen im System wurden aufgezeigt und Lösungen entwickelt.

Die vorgeschlagenen Infrastrukturmaßnahmen für das Gesamtsystem, insbesondere bezüglich der Kapazitäten im konventionellen Kraftwerkssystem und im Übertragungsnetz sollen zur nachhaltigen Entwicklung der Energieversorgung und zur Umsetzung der Empfehlungen des Rates für Nachhaltige Entwicklung beitragen.

Die mit der Energieversorgung verbundenen externen Kosten der Auswirkungen auf Umwelt und Natur wurden in der Studie aus methodischen Gründen nicht in die Kostenberechnung einbezogen.

Während der Bearbeitung der Studie wurde deutlich, dass im Rahmen der Studie nur Lösungen für die Integration der Erneuerbaren Energien in das bestehende Verbundnetz und den Kraftwerkspark bis zu einem Anteil von ca. 20% an der Stromerzeugung (5% Offshore-Wind, 7,5% Onshore-Wind und 7,5% andere Erneuerbare Energien) erarbeitet werden kön-

nen. Eine weitere deutliche Zunahme der räumlich konzentrierten Offshore-Wind-Leistung in Norddeutschland, wie sie nach 2015 geplant ist, erfordert eine aufwändigere Untersuchung, um belastbare Lösungen zu entwickeln.

Die Erkenntnisse aus dem Teil I der dena-Netzstudie für das Windausbauszenario des Jahres 2020 zeigen, dass mit den von der Projektsteuerungsgruppe gesetzten Annahmen und Rahmenbedingungen eine Systemlösung zur Integration des Windstroms nicht erarbeitet werden konnte. Unter geänderten und neuen Rahmenbedingungen sollen Lösungsmöglichkeiten untersucht werden. Für die Erarbeitung belastbarer Aussagen sind weitere Untersuchungen zu grundsätzlichen technischen und energiewirtschaftlichen Fragen durchzuführen. Die dena-Netzstudie wurde daher hinsichtlich des zu betrachtenden Zeithorizontes modifiziert und in zwei Teile aufgeteilt: Der nun vorliegende Bericht zum Teil I deckt den Zeitraum bis zum Jahr 2015 mit einem Anteil der Erneuerbaren Energien an der Stromversorgung von 20% ab. Der im Anschluss geplante Teil II der dena-Netzstudie wird den Zeitraum bis 2025 untersuchen.

Folgende Aspekte sollen in Teil II untersucht werden:

- Ergänzung des bestehenden Verbundnetzes als Transportnetz. Hierzu müssen die verschiedenen Optionen für ein Overlay-Netz verglichen und eine aus technischer und wirtschaftlicher Sicht optimale Lösung gefunden werden
- Umsetzbarkeit und Auswirkungen eines Einspeise- und Erzeugungsmanagements von Windenergieanlagen
- Lastmanagement ausgewählter Verbraucher
- Einsatzmöglichkeiten und neue Betriebsführungsstrategien für vorhandene und neue Speicherkapazitäten im Verbundnetz
- Abhängigkeit der Betriebsmittelbelastbarkeit von Umgebungsbedingungen
- Häufigkeit und Bewertung von Netzengpässen.

Teil II der Studie soll auch Fragen aus dem ersten Studienteil vertiefen und weitere Fragestellungen untersuchen und somit eine Betrachtung des Gesamtzeitraums bis 2025 ermöglichen.

Diese Untersuchungen konnten im geplanten Zeit- und Kostenrahmen der dena-Netzstudie nicht bearbeitet werden. Die Projektsteuerungsgruppe hat deshalb einvernehmlich die Durchführung des zweiten Teils der dena-Netzstudie beschlossen und die dena mit den weiteren Vorbereitungen beauftragt.

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse des Teils I der dena-Netzstudie zusammengefasst dargestellt. Die Ergebnisse gelten nur unter den gesetzten Randbedingungen und Annahmen. Sie werden hier nur partiell erwähnt und können in der rund 500 Seiten umfassenden Studie nachgeschlagen werden

3. Entwicklung der Windenergie

Die Entwicklung der installierten Windenergieleistung wird für die Jahre 2007, 2010 un 2015 und 2020 räumlich hoch differenziert prognostiziert. Die Daten sind bundesländerspezifisch ausgewiesen und unterscheiden die Entwicklung neuer Standorte, den Ersatz von alten Windenergieanlagen durch leistungsfähigere Neuanlagen (sog. Repowering) sowie die Windenergie in Nord- und Ostsee.

An Land wird ein Anstieg der installierten Windenergieleistung bis zum Jahr 2015 auf 26,2 GW und auf See auf 9,8 GW prognostiziert. Bis 2020 sind an Land 27,9 GW und auf See 20,4 GW zu erwarten. Für die Jahre 2007, 2010, 2015 und 2020 werden die Windenergieleistungen, differenziert nach an Land, Ostsee und Nordsee ausgewiesen (siehe Tabelle 1).

Die in der dena-Netzstudie prognostizierte Windenergieentwicklung auf See ist in ihrer zeitlichen Entwicklung ambitioniert hinsichtlich der

- Verfügbarkeit von Offshore-Technik (für spezifische Bedingungen in Nord- und Ostsee)
- Steuerung durch die Regelungen zur Raumordnung auf See ab 01.01.2006
- Verfügbarkeit der Infrastruktur für Errichtung und Betrieb von Offshore-Windparks
- Versicherungs- und Finanzierungskonzepte für Offshore-Windparks
- Effizienzsteigerungen zum Ausgleich der im Erneuerbare-Energien-Gesetz festgelegten Degression der Vergütungssätze,
- zeitlichen Ausgestaltung von Netzverstärkungs- und Netzausbaumaßnahmen.

Das Windenergieausbauszenario an Land und auf See wurde unter den Annahmen weitestgehend positiver politischer und wirtschaftlicher Rahmenbedingungen ausgearbeitet. Sollten diese nur teilweise oder verzögert eintreten, kann sich der angenommene Ausbau der Erneuerbaren Energien für das Jahr 2015 in Höhe von 20% zeitlich verschieben[4]. Der Ausbau an Land wurde allerdings unter der einschränkenden Wirkung einer größeren spezifischen Fläche pro installierter Windleistung abgeschätzt, um damit den möglichen neuen Abstandsregeln Rechnung zu tragen. Insofern ist ein konservativer Ansatz für den onshore-Windkraftausbau zugrunde gelegt.

Insgesamt wären im Jahr 2015 Erneuerbare Energien mit einer Gesamtkapazität von 47,3 GW installiert und damit würde der Anteil Erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung von heute rund 10 % auf 20 % steigen.

Die durchschnittliche Volllaststundenzahl der Windenergieanlagen beläuft sich im Jahr 2007 auf 1.650 h/a, steigt im Jahr 2010 auf 1.960 h/a und im Jahr 2015 noch mal auf 2.150 h/a. Ursache für den Anstieg um etwa 30% ist der zunehmende Ersatz alter Anlagen durch leistungsfähigere Windenergieanlagen und die Erschließung ertragreicher Standorte in Nord- und Ostsee.

Im Rahmen des Ausbaus der Windenergie an Land und auf See steigt die durchschnittlich eingespeiste Energiemenge von 23,5 TWh/a im Jahr 2003 auf 77,2 TWh/a im Jahr 2015. Daran hat die Offshore-Windenergie im Jahr 2015 einen Anteil von 42 %.

Die je kWh gezahlte reale Durchschnittsvergütung nach EEG sinkt aufgrund der im EEG vorgesehenen Degression der Vergütungssätze und der angenommenen Inflation von 1,5 % p.a. von 8,3 Cent je kWh im Jahr 2007 auf 7,0 Cent je kWh im Jahr 2015.

Diese Prognosen bis zum Jahr 2015 bilden die Grundlage für die Untersuchungen in den Studienteilen „Netze“ und „Kraftwerke“. Die Prognose bis zum Jahr 2020 soll im Rahmen des zweiten Teils der dena-Netzstudie im Detail überprüft und untersucht werden.

4. Netzverstärkung und Netzausbau

Für die weitere Integration der Erneuerbaren Energien in das Verbundnetz sind Ausbaumaßnahmen im Höchstspannungsübertragungsnetz notwendig, u. a.: die Verstärkung vorhandener Stromtrassen, der Bau neuer Höchstspannungstrassen, der Bau von Querreglern zur gezielten Steuerung der Lastflüsse und der Bau von Anlagen zur Bereitstellung von Blindleistung. Um einen weiteren Ausbau der Windenergie nicht zu gefährden, ist eine zeitnahe Realisierung der Maßnahmen notwendig.

Obwohl sich die ausgewiesenen Netzausbaumaßnahmen auf nur rund 5% des bestehenden Übertragungsnetzes[5] belaufen, gibt es verschiedene Hemmnisse, die eine zeitgerechte Realisierung behindern. In Relation zu den Neubauten der vergangenen Jahre ist der als notwendig ausgewiesene Netzausbau sehr ambitioniert.

Um einen weiteren Ausbau der Windenergie nicht zu gefährden, sind deshalb neben der laufenden unverzüglichen Umsetzung von Planungs- und Investitionsentscheidungen besonders die Genehmigungsverfahren für den Netzausbau zu beschleunigen.

Der größere Verdichtungsgrad des Höchstspannungsübertragungsnetzes könnte in Zukunft auch für zusätzliche Aktivitäten im Stromhandel genutzt werden. Dies wurde in dieser Weise aber nicht untersucht.

Der Ausbau des Übertragungsnetzes wird das Zuwachstempo der Erneuerbaren Energien, aber auch die Stromerzeugung durch besonders wirtschaftliche, konventionelle Kraftwerke entscheidend mitbestimmen. Dieses gilt insbesondere für die Windenergienutzung in der Nordsee.

Die dena-Netzstudie kommt bezüglich des Netzausbaus im Detail zu folgenden Ergebnissen:

Netzausbau an Land

Durch die notwendigen Netzneubaumaßnahmen bis zum Jahr 2015 wird das bereits bestehende Höchstspannungsübertragungsnetz um insgesamt 850 km erweitert. Das entspricht einem Anteil von 5% bezogen auf die bereits vorhandenen Höchstspannungstrassen.

- Netzverstärkung und Netzausbau an Land bis 2007: Drei bestehende Netztrassenabschnitte in Thüringen und in Franken müssen auf einer Gesamtlänge von 269 km verstärkt werden. Zwei Trassenabschnitte mit der Länge von insgesamt 5 km müssen neu gebaut werden.
- Netzausbau an Land bis 2010: Zusätzlich zu den oben genannten Maßnahmen müssen weitere 455 km neue 380-kV-Doppelleitungen gebaut werden. Weiterhin müssen 97 km bestehende Trassen verstärkt werden.
- Netzausbau an Land bis 2015: Zusätzlich zu den o. g. Maßnahmen müssen weitere 390 km neue 380-kV-Doppelleitungen gebaut werden, um insbesondere den Windstrom aus der Nordsee transportieren zu können. 26 km bestehende Trassen sind zu verstärken.

Netzausbau an Land nach 2015: Bei einem weiteren Ausbau der Offshore-Windenergie, wie er für den Zeitraum nach 2015 erwartet wird, sind umfangreiche Netzausbaumaßnahmen erforderlich, um den räumlich konzentriert und verbrauchsfern erzeugten Strom aus Offshore Windparks in die Verbrauchszentren zu transportieren. Drei Lösungsansätze zum Netzausbau zwischen 2015 und 2020, die zeigen, wie Strom aus der Nordsee in die Verbrauchszentren Deutschlands transportiert werden kann, werden hinsichtlich grundsätzlicher Vor- und Nachteile bewertet. Eine vertiefende Untersuchung zur technischen Umsetzung und zur wirtschaftlichen Optimierung eines weiteren Netzausbaus nach 2015 ist notwendig (schätzungsweise 1000 km) und Gegenstand des Teils II der dena-Netzstudie. Aufgrund des notwendigen Untersuchungsbedarfs kann für diese Netzausbaumaßnahmen eine abschließende Aussage erst im geplanten Teil II der Untersuchung gemacht werden.

Netzausbau auf See

Für Windparks in Nord- und Ostsee stehen technische Lösungen zur Verfügung, um den auf See produzierten Strom zu den Netzanschlusspunkten an Land transportieren zu können. Die Abführung großer Windenergieleistungen über lange Entfernungen wird als technisch machbar bewertet.

Weiterhin wurde für die Zeit nach 2015 ein Systemmodell für den Ausbau der Windparks in der Nordsee entworfen, das im Küstenbereich eine hohe Anzahl paralleler Seekabelverbindungen und geographisch breite Kabelkorridore vermeidet. Das Systemmodell sollte so schnell wie möglich realisiert werden. Das Systemmodell umfasst vier Sammelstationen im Meer, an die mehrere Windparks angeschlossen werden. Ausgehend von den Sammelstationen wird der Windstrom jeweils über eine gemeinsame Leitung gebündelt an Land geführt (siehe

Abbildung 4). Aufgrund des notwendigen Untersuchungsbedarfs (Teil II der dena-Netzstudie) kann hierzu derzeit keine abschließende Aussage gemacht werden.

Sicherheit des Höchstspannungsübertragungsnetzes

Die Sicherheit bzw. Stabilität des Höchstspannungsübertragungsnetzes wurde in der dena-Netzstudie bis 2015 umfassend untersucht. Dabei wurden kritische Netzzustände identifiziert, mögliche Auswirkungen beschrieben und Lösungsansätze entwickelt.

Für das Jahr 2003 kommt die dena-Netzstudie zu dem Ergebnis, dass Sicherheitskriterien des europäischen Stromverbundes UCTE verletzt worden wären: Unter der Annahme, dass während windstarker Situationen bestimmte Fehler im Übertragungsnetz auftreten (3 polige Sammelschienen- und/oder Leitungsfehler) oder schlagartig große konventionelle Kraftwerksleistungen ausfallen, hätte es zu großflächigen Spannungseinbrüchen und kritischen Netzzuständen kommen können. Die Spannungseinbrüche hätten sich regional fortsetzen und zu sog. Spannungstrichtern führen können. Wäre die Spannung in einem Spannungstrichter um mehr als 20% gesunken, hätten sich „alte“ Windenergieanlagen, die vor dem Jahr 2003/2004 in Betrieb gingen, gemäß den seinerzeit geltenden Netzanschlussbedingungen vom Netz getrennt. Diese zusätzlichen Abschaltungen hätten die kritischen Netzzustände erheblich verstärken und zu Risiken für die Versorgungssicherheit des deutschen und europäischen Stromverbundes (Überschreitung der im europäischen Stromverbund UCTE vorgehaltenen Reserve von 3.000 MW) führen können.

Die „alten“ Netzanschlussbedingungen wurden ab 2003 durch verbesserte Netzanschlussbedingungen ergänzt: Neue Windenergieanlagen dürfen sich nun, je nach Anlagentyp, erst bei einem Spannungseinbruch weit unter 80% bzw. nur zeitverzögert vom Netz trennen. Die dena-Netzstudie zeigt, dass die aus den neuen Netzanschlussbedingungen resultierenden verbesserten Eigenschaften von Windenergieanlagen dazu führen, dass sich bei einem weiteren Ausbau der Windenergie die diesbezügliche Systemsicherheit bis zum Jahr 2015 im Netzgebiet Nord-Ost und im Netzgebiet Nord-West bis zum Jahr 2010 verbessert und die kritischen Zustände des Jahres 2003 nicht erreicht werden. Im Netzgebiet Nord-West verschlechtert sich die Situation im Jahr 2015 allerdings wieder, weil altersbedingte oder atomkonsensbedingte Abschaltungen großer Strom-Erzeugungseinheiten zu erwarten sind. Ohne Gegenmaßnahmen kommt es zu systemgefährdenden Erzeugungsausfällen bei Netzfehlern. Zur Lösung dieser Problematik stehen grundsätzlich technische Maßnahmen im Netz und für Windenergieanlagen zur Verfügung, mit denen die Systemsicherheit gewährleistet werden kann. Nur wenn die aufgezeigten Lösungen rechtzeitig umgesetzt werden, kann der unterstellte Windenergieausbau bis 2015 ohne Spannungstrichterproblem realisiert werden. Die mit den Maßnahmen verbundenen Kosten, die konkrete Umsetzung und die Zeitdauer zur vollständigen Realisierung wurden im Rahmen dieser Studie nicht geprüft.

Erwartet wird, dass neben dem Einsatz von Phasenschiebern und verbesserten Abschaltkriterien für Windenergie-Altanlagen das verstärkte Repowering von Windenergieanlagen (Ersatz von Windenergie-Altanlagen durch Neuanlagen) die Situation erheblich verbessern können.

Der Einsatz und die Optimierung der Lösungsvorschläge muss noch weiter untersucht werden.

In bestimmten Situationen (Starkwind und Schwachlast) kommt es in Deutschland an wenigen Tagen im Jahr zu Überschusssituationen. In diesen Fällen muss Strom in größerem Umfang ins Ausland geliefert werden. Weitere Lösungsmöglichkeiten, wie zusätzliche Speicher, Lastmanagement und Einspeisemanagement für Windstrom, sollen im geplanten Teil II der dena-Studie untersucht werden.

Unter dem Aspekt der Versorgungssicherheit beeinträchtigt die starke Windeinspeisung in Deutschland die Netze des benachbarten Auslands betrieblich in erheblichem Umfang. Dieses äußert sich dadurch, dass an windstarken Wochenenden und in lastschwachen Nachtstunden insbesondere die grenzüberschreitenden Kuppelleitungen, als auch grenznahe Übertragungsleitungen im Grenzbereich ihrer (n-1)-Sicherheit betrieben werden.

5. Auswirkungen auf den Kraftwerkspark

Die Entwicklung des Kraftwerksparks wird für zwei Varianten miteinander verglichen, um die windenergiebedingten Veränderungen ermitteln zu können. In der ersten Variante wird die installierte Windenergieleistung des Jahres 2003 auch für die Jahre 2007, 2010 und 2015 angenommen, d.h. ab 2003 konstant gehalten. In der zweiten Variante wird die installierte Windenergieleistung bis 2015 in mehreren Etappen entsprechend der prognostizierten Entwicklung erhöht. Anschließend werden Unterschiede zwischen den beiden Varianten ermittelt. Daraus lassen sich die windenergiebedingten Kosten und Veränderungen im Kraftwerkspark bestimmen. Unterschieden werden dabei weiterhin drei Szenarien *(Basisszenario ohne CO_2-Aufschlag, Basisszenario mit CO_2-Aufschlag und Alternativszenario mit CO_2-Aufschlag)*.

Die in der Studie zu Grunde gelegte Entwicklung der Brennstoffpreise bildet eine langfristige Entwicklung ab (siehe Tabelle 3). Angesichts der Erfahrungen der vergangenen Jahre sind auch höhere Brennstoffpreise grundsätzlich möglich. Sie können im Rahmen des geplanten Teils II der dena-Netzstudie untersucht werden. Externe Kosten wurden in keinem Szenario berücksichtigt.

Basisszenario ohne CO_2-Aufschlag

Das Szenario geht von keiner wesentlichen Veränderung der Preise von Erdgas, Öl und Steinkohle und einem real konstanten Braunkohlepreis aus, der sich an den Vollkosten der

Braunkohleförderung orientiert. Die CO_2-Zertifikate werden im Rahmen des nationalen Allokationsplans sowohl für Bestands-, als auch für Neuanlagen bedarfsgerecht und kostenlos zugeteilt. Angenommen wird, dass der CO_2-Preis nicht in die Kosten- und Preiskalkulation der Unternehmen eingeht. Unter diesen Bedingungen haben Braun- und Steinkohlekraftwerke als Grund- und Mittellastkraftwerke im Vergleich zu Erdgas befeuerten Kraftwerken eine bessere Wettbewerbssituation.

Im *Basisszenario ohne CO_2-Aufschlag* werden mit Windenergieausbau bis zum Jahr 2015 die CO_2-Emissionen auf dem heutigen Niveau stabilisiert. Damit werden die mit dem Atomausstieg verbundenen Emissionen kompensiert. Ohne Windenergieausbau würden die Emissionen um 39 Mio. t CO_2 steigen (siehe Tabelle 4).

Die Stromerzeugung aus Steinkohlekraftwerken steigt im Jahr 2015 im Vergleich zur Stromerzeugung des Jahres 2003 um 15 TWh und die Stromerzeugung aus Braunkohlekraftwerken steigt um 17 TWh.

Dieses Szenario dient aufgrund des mittlerweile eingeführten Emissionshandels in Deutschland nur als Vergleichsmaßstab für die anderen untersuchten Entwicklungen bzw. Szenarien.

Basisszenario mit CO_2-Aufschlag

Dieses Szenario unterstellt dieselbe Preisentwicklung der Energieträger wie das Basisszenario ohne CO_2-Aufschlag. Die CO_2-Zertifikate werden versteigert und die CO_2-Preise steigen (Jahr 2007: 5 €/t CO_2; Jahr 2010: 10 €/t CO_2; Jahr 2015: 12,5 €/t CO_2; Jahr 2020: 12,5 €/t CO_2). DieCO_2-Kosten gehen in vollem Umfang in die Kosten- und Preiskalkulation der Unternehmen ein. Von 2003 bis 2015 kommt es dadurch zu folgenden Veränderungen: Braunkohle +170 %, Steinkohle +69%, Erdgas +14 %, Heizöl EL +6% und Heizöl S +12 %. Dies verschlechtert die Wettbewerbsposition der CO_2-intensiven Energieträger Braunkohle und Steinkohle insbesondere im Mittellastbereich erheblich.

Im Basisszenario + CO_2-Aufschlag sinken mit Windenergieausbau die CO_2-Emissionen im Jahr 2015 von 251 Mio. t CO_2 auf 228 Mio. t CO_2 (siehe Tabelle 4).

Die Stromerzeugung aus Steinkohlekraftwerken sinkt im Jahr 2015 im Vergleich zur Stromerzeugung des Jahres 2003 um 44 TWh und die Stromerzeugung aus Braunkohlekraftwerken sinkt um 35 TWh. Windenergiebedingt sinkt die Stromerzeugung aus Steinkohlekraftwerken um 9 TWh und die Stromerzeugung aus Braunkohlekraftwerken um 6 TWh.

Alternativszenario mit CO_2-Aufschlag

Dieses Szenario unterstellt einen Anstieg des Erdgas- und Ölpreises und verbindet dies mit der Annahme, dass die steigenden CO_2-Preise in vollem Umfang in die Kosten- und Preiskalkulation der Unternehmen eingehen. Von 2003 bis 2015 kommt es dadurch zu folgenden Veränderungen: Braunkohle +170 %, Steinkohle +69%, Erdgas +33 %, Heizöl EL +20% und Heizöl S +18 %. Den Wettbewerbsvorteil, den Erdgas bei steigenden CO_2-Preisen gegenüber den CO_2-intensiven Energieträgern Braun- und Steinkohle hat, wird in diesem Szenario durch steigende Erdgaspreise z. T. kompensiert. Die höheren Gaspreise führen zu einer Entwicklung, die dem Basisszenario ähnlich ist.

Im Alternativszenario + CO_2-Aufschlag sinken mit Windenergieausbau die CO_2-Emissionen im Jahr 2015 von 302 Mio. t CO_2 auf 264 Mio. t CO_2 (siehe Tabelle 4).

Die Stromerzeugung aus Steinkohlekraftwerken steigt im Jahr 2015 im Vergleich zur Stromerzeugung des Jahres 2003 um 16 TWh und die Stromerzeugung aus Braunkohlekraftwerken steigt um 3 TWh.

Regel- und Reserveleistung

Die gesicherte Leistung der installierten Windenergiekapazitäten beschreibt, welcher Anteil der installierten Windenergiekapazitäten zur Deckung der saisonalen Höchstlast als gesichert angesehen werden kann. Unterstellt wird dabei ein bestimmtes Niveau der Versorgungssicherheit. Aus den Ergebnissen kann abgeleitet werden, wie viel der bisher betriebenen konventionellen Kraftwerksleistung langfristig nicht als Reserve vorgehalten werden muss, um die Stromversorgung sicher zu stellen.

Die gesicherte Leistung der installierten Windenergiekapazitäten verändert sich mit der Jahreszeit, da die Windverhältnisse im Jahresverlauf variieren (siehe Tabelle 5). Im Jahr 2015 erreicht die ‚gesicherte Leistung der installierten Windenergiekapazitäten' bei einer Versorgungssicherheit von 99% rd. 1.820 MW bis 2.300 MW, d.h. dass in diesem Umfang sicher einplanbare konventionelle Kraftwerksleistung langfristig ersetzt werden kann. Dieses entspricht einem Anteil von rd. 6% der installierten Windenergiekapazität. Im Jahr 2003 beläuft sie sich auf 890 MW bis 1.250 MW, im Jahr 2007 auf 1.190 MW bis 1.600 MW und im Jahr 2010 auf 1.600 MW bis 2.050 MW.

Die notwendige, windbedingte Regel- und Reserveleistung ist direkt abhängig von der Güte der Windleistungsprognose und der Abweichung zwischen Prognose und tatsächlicher Einspeisung. In der dena-Netzstudie wurde eine Verbesserung der Windenergieprognose angenommen.

Um unvorhergesehene Veränderungen der Windenergieeinspeisung kurzfristig ausgleichen zu können, muss Minuten- und Stundenreserve als positive und negative Regel-/Reserveleistung

bereitgestellt werden: Positive Regel-/Reserveleistung wird zum Ausgleich einer unerwartet kleinen Windstromerzeugung vorgehalten. Negative Regel-/Reserveleistung wird zum Ausgleich einer unerwartet hohen Windenergieeinspeisung eingeplant. Diese Kraftwerksleistung muss betriebsbereit vorgehalten werden. Aufgrund der Vorrangregelung für Strom aus Erneuerbaren Energien wird sie im Falle einer unerwartet hohen Windstromerzeugung nicht eingesetzt.

Im Jahr 2003 mussten im Mittel zusätzlich 1.200 MW und maximal 2.000 MW positive Regel-/Reserveleistung einen Tag im Voraus eingeplant werden. Im Jahr 2015 steigt der Wert im Mittel auf zusätzlich rd. 3.200 MW und maximal auf 7.000 MW. Der Mittelwert entspricht 9% und der Maximalwert 19,4 % der installierten Windenergieleistung. Sie müssen als positive Minuten- und Stundenreserve vorgehalten werden.

Im Jahr 2003 mussten im Mittel zusätzlich 750 MW und maximal 1.900 MW negative Regel-/Reserveleistung einen Tag im Voraus eingeplant werden. Im Jahr 2015 steigt der Wert im Mittel auf zusätzlich rd. 2.800 MW und maximal auf 5.500 MW. Der Mittelwert entspricht etwa 8 % und der Maximalwert 15,3 % der installierten Windenergieleistung.

Die Bereitstellung der Regel- und Reserveleistung kann aus dem in der Studie entwickelten Kraftwerkspark und seiner Betriebsweise gedeckt werden. Dazu sind keine zusätzlichen Kraftwerke zu installieren und zu betreiben.

6. Kostenentwicklung

Die Entwicklung der Stromkosten wurde in der dena-Netzstudie für die drei Szenarien Basisszenario ohne CO_2-Aufschlag, Basisszenario mit CO_2-Aufschlag und Alternativszenario mit CO_2-Aufschlag ermittelt. Im Folgenden werden die Gesamtkosten dargestellt und eine Differenzierung für die Bereiche Kraftwerke inklusive Regel- und Reserveenergie und den Bereich Netze vorgenommen. Alle Kosten sind auf das Jahr 2003 bezogen.

Durch den Ausbau der Windenergie wird die Struktur des Kraftwerkssystems in Richtung flexibler Kraftwerke mit geringeren Kapitalkosten und höheren Brennstoffkosten verschoben. Dadurch ergibt sich bei weiterem Windenergieausbau insgesamt neben der Einsparung von Brennstoffkosten auch eine Reduzierung der Kapitalkosten im Bereich der konventionellen Kraftwerke, die den Mehrkosten für die Einspeisevergütung entgegengerechnet sind. Die Kosten für die Bereitstellung der Regel- und Reserveenergie sind in den Gesamtkosten enthalten und in der Studie aus methodischen Gründen nicht gesondert ausgewiesen. Die Kosteneinsparungen im konventionellen Kraftwerkspark liegen in allen untersuchten Szenarien unter den Vergütungen für die zusätzliche Windenergie-Einspeisung. Der Unterschied nimmt allerdings – einerseits durch die Erhöhung der Einsparungen, andererseits durch die Verminderung der durchschnittlichen Vergütungen für die zusätzlich eingespeisten

Strommengen auf Basis Windkraft – von 2007 bis 2015 in allen Szenarien ab. Der Berechnung wurde bis 2015 eine Inflationsrate von 1,5% pro Jahr zu Grunde gelegt. Im Jahr 2007 belaufen sich die realen Mehrkosten nach dieser Studie je zusätzlich eingespeister Windstrommenge je nach Szenario auf 6,3 bis 6,5 Cent/kWh Windstrom. Im Jahr 2015 verringert sich der Wert auf 4,3 bis 3,0 Cent/kWh. Berücksichtigt werden muss dabei, dass die eingespeiste Windstrommenge zwischen den Jahren 2003 und 2015 um mehr als das Dreifache ansteigt (sieheTabelle 2). Die absoluten Mehrkosten für die insgesamt ab 2003 zusätzlich eingespeiste Windstrommenge belaufen sich je nach Szenario im Jahr 2015 auf 1,6 bis 2,3 Mrd. € (siehe Tabelle 6).

Im Folgenden werden Veränderungen bei den Kosten für den privilegierten und nicht privilegierten Endverbrauch, die CO_2-Vermeidungskosten des Windenergieausbaus, die Netzausbaukosten und die Veränderung der Netznutzungsentgelte dargestellt.

Veränderung der Kosten für nicht privilegierten Endverbrauch

Durch die Förderung aller Erneuerbarer Energien im Zeitraum bis 2015 (inklusive Windenergieausbau) steigen die Kosten für den nicht privilegierten Endverbrauch je nach Szenario um 0,905 bis 1,105 Cent je kWh. Diese Kosten decken die Strombezugskosten und die Netznutzungsentgelte ab. Sie beinhalten auch die EEG-Einspeisevergütungen für Erneuerbare Energien. Bei der Bilanzierung der Strombezugskosten für andere Erneuerbare Energien (außer Wind) wurden allerdings keine Optimierungspotentiale untersucht.

Aufgrund des Zubaus der Windenergie im Zeitraum 2003 bis 2015 steigen die Kosten für den nicht privilegierten Endverbrauch je nach Szenario um 0,385 bis 0,475 Cent je kWh an. Die Gesamtkosten teilen sich in folgende Komponenten auf:

- 0,36 bis 0,45 Cent je kWh windenergiebedingte Kostensteigerungen im Kraftwerkspark inklusive Regel- und Reserveenergie abzüglich der Einsparungen der Brennstoff- und Kapitalkosten. Hierin sind die Kosten für die EEG-Vergütung ebenfalls enthalten.
- 0,025 Cent je kWh für den Ausbau des Höchstspannungsübertragungsnetzes (220/380 kV).

Veränderung der Kosten für privilegierten Endverbrauch

Die Strombezugskosten für den privilegierten Endverbrauch, der unter die Härtefallregelung des EEG fällt, erhöhen sich aufgrund des Windenergieausbaus im Jahr 2007 je nach Szenario um 0,03 bis 0,04 Cent je kWh. Im Jahr 2015 steigen sie in allen Szenarien um 0,15 Cent je kWh. Die Strombezugskosten decken die windenergiebedingte Kostensteigerung im Kraftwerkspark inklusive Regel- und Reserveenergie abzüglich der Einsparungen bei Brennstoff- und Kapitalkosten ab. Die entsprechend reduzierte EEG-Menge für Härtefälle ist ebenfalls in die Zahlen eingerechnet.

CO_2-Vermeidungskosten

Die CO_2-Vermeidungskosten der Windenergie sinken in allen untersuchten Szenarien. Ausgehend vom Jahr 2007 mit CO_2-Vermeidungskosten von 95 bis 168 €/t CO_2 sinken sie bis zum Jahr 2015 auf 41 bis 77 €/t CO_2.

Mit den Zahlen wird Bezug auf die internationale Klimaschutzdiskussion genommen. Mögliche Kostensteigerungen bei den fossilen Brennstoffen sowie Kosten anderer externer Effekte wurden nicht berücksichtigt.

Netzausbaukosten und Veränderung der Netznutzungsentgelte

Der Ausbau des Höchstspannungsübertragungsnetzes an Land (380/220 kV) kostet bis 2007 rd. 0,28 Mrd. €, von 2007 bis 2010 rd. 0,49 Mrd. € und von 2010 bis 2015 rd. 0,35 Mrd. €. In der Summe ergibt dies 1,1 Mrd. €.

Aufwendungen im öffentlichen Netz für den Anschluss der Windenergieparks an Land sowie Netzverstärkungen im 110 kV-Netz sind nicht Bestandteil der durchgeführten Untersuchungen.

Die Investitionskosten für die Seekabel-Anbindung bis zum Netzanschlusspunkt an Land betragen für den Windenergieausbau in Nord- und Ostsee bis zum Jahr 2010 ca. 2,6 Mrd. €. Sie werden bis zum Jahr 2015 auf 5 Mrd. € interpoliert. Die Kosten der Seekabel-Anbindung bis zum Netzanschlusspunkt werden über die im Erneuerbare-Energien-Gesetz festgelegten Vergütungssätze für Windstrom abgedeckt und von den Windparkbetreibern getragen.

Die Investitionskosten für das Systemmodell zum Anschluss der Windparks in der Nordsee (Ausbau im Jahr 2020) werden auf ca. 11-12 Mrd. € geschätzt. Die Kosten der Seekabel Anbindung bis zum Netzanschlusspunkt werden ebenfalls über die im Erneuerbare-Energien-Gesetz festgelegten Vergütungssätze für Windstrom abgedeckt und werden von den Windparkbetreibern getragen. Aufgrund des notwendigen Untersuchungsbedarfs (Teil II der dena-Netzstudie) kann hierzu derzeit keine abschließende Aussage gemacht werden. In jedem Fall steht die zeitliche Abfolge der Finanzierung in engem Zusammenhang mit dem tatsächlichen Bau von Windenergieparks auf See. Ein stufenweises Vorgehen ist möglich.

Gegenüber dem Jahr 2003 steigen die Netznutzungsentgelte nur durch die Netzausbaukosten bis zum Jahr 2007 um 0,05 Cent je kWh, bis zum Jahr 2010 um 0,015 Cent je kWh und bis zum Jahr 2015 um 0,025 Cent je kWh. Die Mehrkosten durch zusätzliche Regelenergie sind in der Kraftwerksbetrachtung enthalten, werden aber über die Netznutzungsentgelte umgelegt.

Anhang mit Tabellen und Abbildungen

	Installierte Windenergieleistung in Deutschland in GigaWatt				
Jahr	**2003**	**2007**	**2010**	**2015**	**2020**
An Land	14,5	21,8	24,4	26,2	27,9
Nordsee	0	0,4	4,4	8,4/8,1	18,7
Ostsee	0	0,2	1,0	1,4/1,7	1,7
Gesamt	**14,5**	**22,4**	**29,8**	**36,0**	**48,2**

Tabelle 1:
Entwicklung der installierten Windenergieleistung in Deutschland bis zum Jahr 2020 in GigaWatt (GW)

	Windenergieeinspeisung in GWh			
Jahr	**2003**	**2007**	**2010**	**2015**
WEA an Land	23.500	34.900	40.300	44.700
WEA auf See	0	1.900	18.000	32.500
Gesamt	23.500	36.800	58.300	77.200

Tabelle 2: Entwicklung der Windenergieeinspeisung bis zum Jahr 2015 in GWh

Jahr	**2003**	**2007**	**2010**	**2015**	**2020**
Basisszenario ohne CO_2-Aufschlag – € je MWh thermisch (NCV)					
Braunkohle	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Steinkohle	6,1	5,8	5,9	6,1	6,4
Erdgas	14,6	13,2	13,6	14,2	14,7
Heizöl EL	25,4	23,4	23,5	23,6	23,8
Heizöl S	15,4	12,6	12,6	13,6	14,2
Basisszenario mit CO_2-Aufschlag – € je MWh thermisch (NCV)					
Braunkohle	3,0	5,0	7,1	8,1	8,1
Steinkohle	6,1	7,5	9,2	10,3	10,6
Erdgas	14,6	14,2	15,6	16,7	17,2
Heizöl EL	25,4	24,7	26,2	26,9	27,1
Heizöl S	15,4	14,0	15,4	17,2	17,8
Alternativszenario mit CO_2-Aufschlag – € je MWh thermisch (NCV)					
Braunkohle	3,0	5,0	7,1	8,1	8,1
Steinkohle	6,1	7,5	9,2	10,3	10,6
Erdgas	14,6	15,5	17,7	19,4	20,4
Heizöl EL	25,4	24,7	27,9	30,6	32,3
Heizöl S	15,4	14,0	16,4	18,2	19,1

Abkürzung NCV = Net Calorific Value (unterer Heizwert)

Tabelle 3: Langfristige Entwicklung der realen Brennstoffpreise frei Kraftwerk in den Szenarien Basisszenario ohne CO_2-Aufschlag, Basisszenario mit CO_2-Aufschlag, Alternativszenario mit CO_2-Aufschlag

	2003	2007		2010		2015	
		WEA Zubau	WEA 2003	WEA Zubau	WEA 2003	WEA Zubau	WEA 2003
Basisszenario ohne CO_2-Aufschlag (CO_2-Emissionen in Mio. t)	279	287	292	293	317	279	318
Basisszenario mit CO_2-Aufschlag (CO_2-Emissionen in Mio. t)	279	282	289	258	276	228	251
Alternativszenario mit CO_2-Aufschlag (CO_2-Emissionen in Mio. t)	279	280	284	281	307	264	302

Abkürzungen: WEA Zubau = Ausbau der Windenergie gemäß Prognose; WEA 2003 = kein weiterer Windenergieausbau nach 2003

Tabelle 4: Entwicklung der CO_2-Emissionen mit und ohne weiteren Ausbau der Windenergie in Mio. t (gegenüber WEA-Erzeugung Stand 2003)

	Jahr 2003 in MW	Jahr 2007 in MW	Jahr 2010 in MW	Jahr 2015 in MW
Winter	1.199	1.542	1.941	2.163
Frühling	1.245	1.605	2.057	2.289
Sommer	889	1.187	1.599	1.824
Herbst	1.040	1.352	1.750	1.970

Tabelle 5: MW gesicherte Leistung der installierten Windenergiekapazitäten bei einem Niveau der Versorgungssicherheit von 99%

	Basisszenario			Basisszenario+CO_2			Alternativszenario+CO_2		
Jahr	2007	2010	2015	2007	2010	2015	2007	2010	2015
Zusätzliche WEA-Einspeisung gegenüber dem Jahr 2003 in GWh	13.267	34.810	53.675	13.267	34.810	53.675	13.267	34.810	53.675
eingesparte erzeugungsabhängige Kosten in Cent/kWh Windstrom	1,32	0,9	1,55	1,32	2,1	2,26	0,83	1,69	1,96
eingesparte fixe Instandhaltungs-kosten in Cent/kWh Windstrom	0,1	0,18	0,14	0,11	0,07	0,11	0,12	0,31	0,24
eingesparte Kapitalkosten	0,33	0,6	0,87	0,32	0,3	0,66	0,64	1,38	1,73
Summe Kosteneinsparungen je zusätzlich eingespeister Windenergie in konventionellen Kraftwerken Cent/kWh Windstrom	1,76	1,68	2,57	1,75	2,47	3,03	1,59	3,38	3,93
Durchschnittl.Einspeisevergütung für die zusätzliche WEA-Einspeisung Cent/kWh Windstrom	8,1	7,67	6,92	8,1	7,67	6,92	8,1	7,67	6,92
spezifische Mehrkosten der zusätzlichen WEA-Einspeisung in Cent/kWh Windstrom (Einspeisevergütungen minus Kosteneinsparungen)	**6,34**	**5,99**	**4,35**	**6,35**	**5,2**	**3,89**	**6,51**	**4,29**	**2,99**
Kosten der zusätzlichen WEA-Einspeisung in Mio. $€_{(2003)}$	**834**	**2.079**	**2.332**	**835**	**1.806**	**2.085**	**856**	**1.489**	**1.603**

Tabelle 6: Reale Kosteneinsparungen im konventionellen Kraftwerkspark durch Ausbau der Windenergie (gegenüber Stand WEA-Erzeugung Stand 2003)

Jahr		2007	2010	2015
Basisszenario	CO_2-Minderung in Mio. t	8,0	28,3	39,5
	CO_2-Minderung in Mio. t in kg je zusätzlicher MWh WEA-Einspeisung	605	817	738
	CO_2-Vermeidungskosten in € je t	104,7	73,4	58,9
Basisszenario + CO_2-Aufschlag	CO_2-Minderung in Mio. t	8,8	20,8	27,2
	CO_2-Minderung in Mio. t in kg je zusätzlicher MWh WEA-Einspeisung	667	600	508
	CO_2-Vermeidungskosten in € je t	95,1	86,8	76,6
Alternativ-szenario + CO_2-Aufschlag	CO_2-Minderung in Mio. t	5,1	26,3	39,4
	CO_2-Minderung in Mio. t in kg je zusätzlicher MWh WEA-Einspeisung	387	758	735
	CO_2-Vermeidungskosten in € je t	168,0	56,6	40,6

Tabelle 7: Entwicklung der CO_2-Vermeidungskosten bei Ausbau der Windenergie (gegenüber WEA-Erzeugung Stand 2003)

	für nicht privilegierten Verbrauch								
	2007			2010			2015		
	WEA-Zubau	WEA 2003	Differenz	WEA -Zubau	WEA 2003	Differenz	WEA Zubau	WEA 2003	Differenz
Basisszenario	37,5	35,9	1,6	41,6	37,3	4,4	46,1	41,6	4,6
Basisszenario + CO_2	40,9	39,4	1,5	47,2	44,0	3,2	51,0	47,1	3,9
Alternativszenario	40,6	39,2	1,4	49,2	45,8	3,5	53,4	49,8	3,6
	für privilegierten Verbrauch (EEG-Härtefallregelung)								
	2007			2010			2015		
	WEA-Zubau	WEA 2003-	Differenz	WEA Zubau	WEA 2003	Differenz	WEA Zubau	WEA 2003	Differenz
Basisszenario	32,6	32,1	0,4	35,1	33,3	1,8	38,3	36,8	1,5
Basisszenario + CO_2	36,2	35,8	0,4	41,5	40,6	1,0	44,4	42,9	1,5
Alternativszenario	36,0	35,6	0,3	43,9	42,4	1,5	47,3	45,8	1,5

Abkürzungen: WEA Zubau = Ausbau der Windenergie gemäß Prognose; WEA 2003 = kein weiterer Windenergieausbau nach 2003

Tabelle 8:
Entwicklung der Strombezugskosten nach Kundengruppen (Kostensteigerungen in $€_{(2003)}$ je MWh)

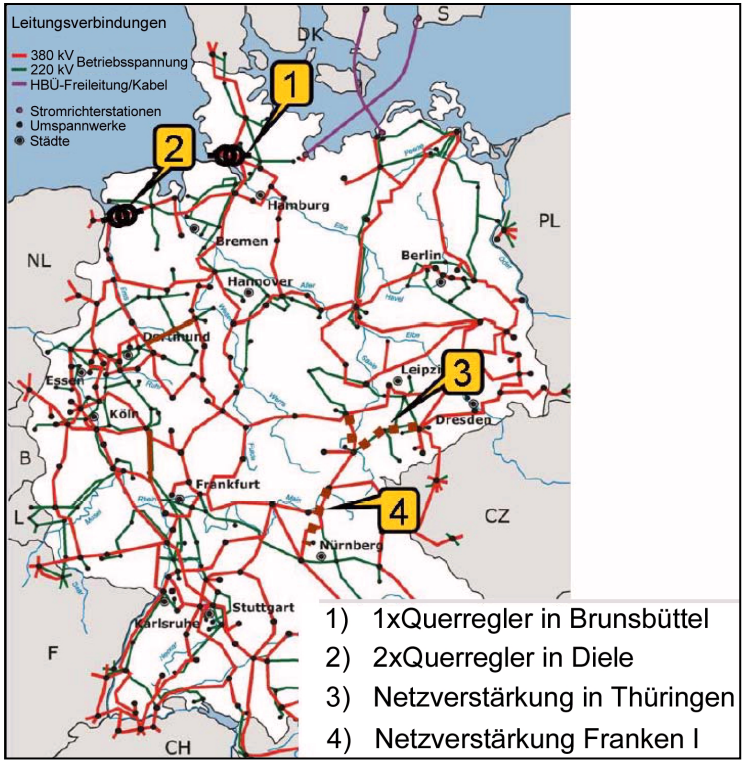

Abb. 1:
Netzverstärkungen im Höchstspannungsübertragungsnetz bis 2007

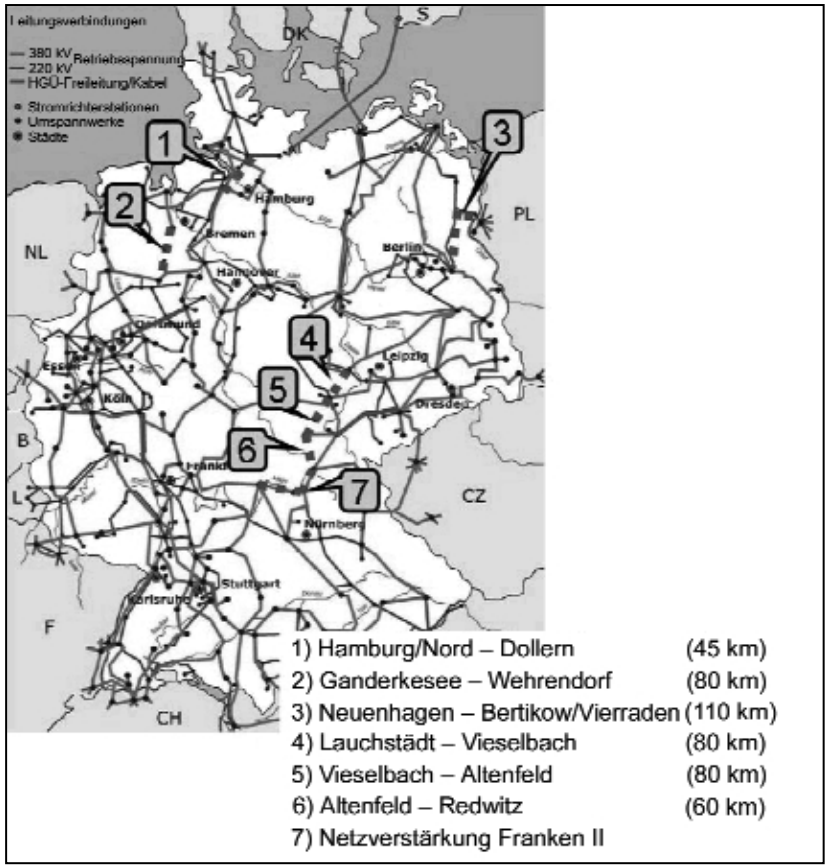

Abb. 2: Netzverstärkungen und Netzausbau im Höchstspannungsübertragungsnetz zwischen 2007 und 2010

Abb. 3:
Netzverstärkungen und Netzausbau zwischen 2010 und 2015

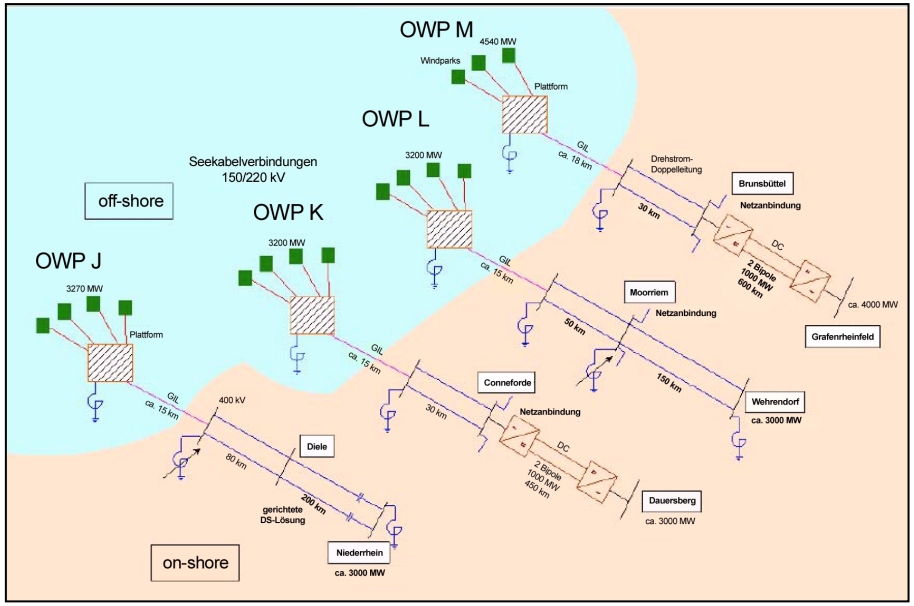

Abb. 4: Systemmodell für den Windenergieausbau mit Netzanschlusspunkten in der Nordsee und Bündelung der Seekabel im Küstenbereich

Anmerkungen

1 Die Deutsche Energie-Agentur erteilte den Auftrag zur Erarbeitung Studie an ein Konsortium um das Energiewirtschaftliche Institut an der Universität zu Köln. Im Konsortium waren weiterhin vertreten das Deutsche Windenergie-Institut GmbH, E.ON Netz GmbH, RWE Transportnetz Strom GmbH und Vattenfall Europe Transmission GmbH.

2 An der Studie beteiligen sich folgende Akteure: Bundesverband Windenergie, ENOVA GmbH, E.ON Netz GmbH, EWE AG, Offshore-Bürger-Windpark Butendiek GmbH & Co. KG, Offshore Forum Windenergie, Plambeck Neue Energien AG, Projekt GmbH, RWE Transportnetz Strom GmbH, Vattenfall Europe Transmission GmbH, VDMA Fachverband Power Systems e.V., Verband der Elektrizitätswirtschaft e.V., Verband der Netzbetreiber e.V., VGB PowerTech e.V., WINKRA-ENERGIE GmbH, Wirtschaftsverband Windkraftwerke e.V., Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e.V., Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit sowie das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit.

3 Dr. Schmieg (DIgSILENT GmbH, Gomaringen) und Prof. Schmid (ISET, Kassel).

4 Eine zeitliche Streckung des 20%-Ausbauszenarios der Erneuerbaren Energien vom Jahr 2015 auf das Jahr 2020 würde zu höheren Kosteneinsparungen im konven tionellen Kraftwerkspark und zu kleineren realen EEG-Einspeisevergütungen führen.

5 Der Bestand der Höchstspannungstrassen (380/220 kV) in Deutschland beläuft sich auf eine Länge von rd. 18.000 km.

Stand und Perspektiven der Photovoltaik

Stefan Glunz
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg

1. Entwicklung und Spektrum der Photovoltaik

Die Photovoltaik ist eine äußerst elegante Variante der regenerativen Energieerzeugung. Ohne bewegliche Teile[1] und Emissionen wandelt sie das Sonnenlicht direkt in entropiefreie elektrische Energie. Selbst in nicht sonnenverwöhnten Regionen wie Deutschland können alleine durch Installation auf Dachflächen relevante Anteile – vorsichtige Schätzungen gehen von mindestens einem Drittel aus - des gesamten Bedarfs an elektrischer Energie generiert werden. Dabei wird die für die Herstellung der Solarzelle notwendige Energie innerhalb von ca. 3 Jahren wieder „eingespielt“ und der Rest der vom Hersteller garantierten Lebensdauer von 20-25 Jahre – Solarmodule sind damit eines der Industrieprodukte mit der längsten Garantiezeit – dient der Nettoenergieerzeugung [1]. Ein weiterer gewichtiger Vorteil ist die hohe Modularität, die den Einsatz von kleinen Einheiten bis zu Großkraftwerken ermöglicht.

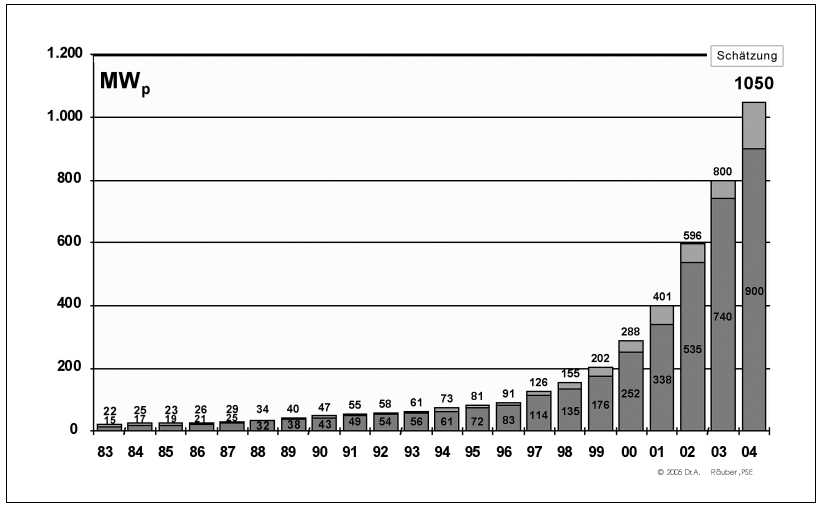

Abb. 1: Entwicklung des weltweiten Photovoltaikmarktes
(Quelle: PSE, Freiburg).

Diese faszinierende Technologie, die in einigen Bereichen, wie der Raumfahrt, schon der dominierende Energieversorger ist, erfuhr in den letzten Jahren durch günstige politische Rahmenbedingungen – wie sie auch anderen Technologien in ihren Anfangstagen zuteil wurde –

[1] Sehen wir an dieser Stelle von den sehr langsam bewegten Nachführeinheiten von Konzentratorsystemen ab.

in führenden Industrieländern wie Japan und Deutschland einen ungeahnten Aufschwung (siehe Abb.1). Diese Länder nehmen nicht nur bei der installierten PV-Leistung, sondern auch bei der Produktionskapazität international eine Spitzenstellung ein und haben damit einen wichtigen Vorsprung für zukünftige Entwicklungen.

Dabei konnte von den bescheidenen Anfängen bis zur heutigen rasanten Entwicklung eine Kostenentwicklung, die den typischen ökonomischen Skalengesetzen folgt, demonstriert werden (eine Verdopplung der installierten Leistung entspricht einer Reduzierung der Kosten um 20%).

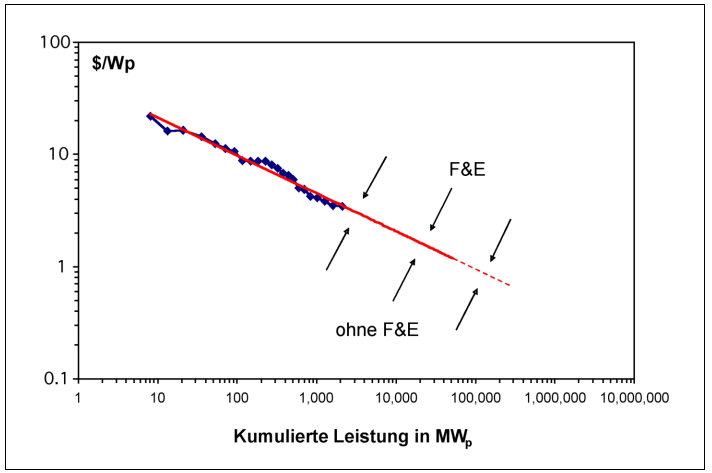

Abb. 2: Globale Entwicklung des Modulpreises auf Basis von Siliziumsolarzellen pro Wp als Funktion der kumulierten installierten Leistung.
Die Pfeile „F&E“ und „ohne F&E“ sollen andeuten, wie die zukünftige Kostenentwicklung durch den erhöhten bzw. reduzierten Einsatz von Forschung und Entwicklung beeinflusst wird.
(Quelle: Fraunhofer ISE/PSE, Freiburg. Definition von Wp siehe Text)

Die momentane Zielvorgabe ist es, Kosten von 1 € pro Wp (Watt peak = Leistung einer Photovoltaikanlage bei voller Sonnenstrahlung in Mitteleuropa (1000 W/m^2)) zu erreichen. Wie Abb.2 zeigt, ist diese Vorgabe bei entsprechender Unterstützung durch Forschung und Entwicklung gut erreichbar. So könnte schon in nicht allzu ferner Zukunft die größte „Hemmschwelle“ der PV nämlich die noch zu hohen Energiegestehungskosten aus dem Weg geräumt sein. Dabei sollte man beachten, dass die Photovoltaik im Unterschied zu anderen Energieträgern keine weiteren volkswirtschaftlichen (externen) Kosten nach sich zieht.

Ein spannendes Charakteristikum der Photovoltaik ist auch ihre Vielfältigkeit in Hinblick auf die verwendeten Materialien. Seit den Anfangstagen spielt dabei kristallines Silizium die gewichtigste Rolle. Die Siliziumsolarzelle feierte vor kurzem ihren 50. Geburtstag und ist damit

nur unwesentlich jünger als die ersten Halbleiterbauelemente. Schon bald danach etablierten sich andere Halbleiter von denen einige wie Galliumarsenid (GaAs), amorphes Silicium (a-Si), Kadmiumtellurid (CdTe) und Chalkopyrit-Verbindungen ($Cu(In,Ga)Se_2$ oder kurz CIS) auch heute eine bedeutende Rolle spielen. Dieses Spektrum wird seit einigen Jahren durch intensive Forschungen im Bereich von nicht auf Halbleitern beruhenden photoaktiven Materialien wie Farbstoffen und Polymeren vervollständigt. Der Wunsch den Wirkungsgrad über das theoretische Wirkungsgradlimit eines einzelnen Materials, der sogenannten Shockley-Queisser-Grenze von 33% [2], zu bringen, hat in der jüngsten Zeit zu einer verstärkten Diskussion über neuartige Solarzellenkonzepte geführt. Hinsichtlich des Potentials all dieser verschiedenen Solarzellentypen für eine relevante Energieversorgung spielen neben den Herstellungskosten auch andere Aspekte wie die Verfügbarkeit der verwendeten Materialien, die Langzeitstabilität und der erreichbare Wirkungsgrad eine wichtige Rolle. Im Folgenden sollen die verschiedenen Technologien genauer beleuchtet werden.

2. Das Arbeitspferd: Die Siliziumsolarzelle

Silizium ist sicherlich eines der best untersuchten und technologisch am weitest entwickelten Materialien überhaupt. Es steht in der Erdkruste in großen Mengen zur Verfügung und ist auch in Hinsicht auf seine physikalischen Eigenschaften gut für die Photovoltaik geeignet[2]. Tatsächlich werden heute 90% aller Solarzellen aus mono- oder multikristallinem Silizium gefertigt. Nach Jahren als „kleiner Bruder“ der Mikroelektronik wird in den nächsten Jahren der Verbrauch von hoch reinem Silizium für die Photovoltaik erstmals den der Mikroelektronik überflügeln. Dadurch erwächst aber auch die neue Herausforderung, für die Photovoltaik eine eigene Siliziumversorgung zu schaffen.

Hauptkostenfaktor bei PV-Modulen aus kristallinen Siliziumzellen ist neben der Modulherstellung und -integration der Siliziumwafer selbst. Daher ist es äußerst wichtig, das Material möglichst gut auszunutzen, das heißt, den Wirkungsgrad der Energiewandlung immer weiter zu optimieren. Momentan liegt der höchste Wirkungsgrad bei knapp 25% [3], was sich zunächst einmal niedrig anhört. Diese 25% stellen allerdings 76% des überhaupt möglichen physikalischen Wirkungsgrads von 33% einer einfachen Solarzelle (ein pn-Übergang) dar. Die Breitbandigkeit des Sonnenspektrums ist der Grund für den größten Verlust von Solarzellen aus einem photoaktiven Material. In Abb. 3 ist in grau die spektrale Leistungsdichteverteilung des Sonnenspektrums in Mitteleuropa dargestellt. Nur Photonen mit einer Energie, die der Bandlücke des verwendeten Materials entspricht, können optimal genutzt werden. Längerwelliges Licht wird nicht absorbiert, da es kein Elektron-Loch-Paar generieren kann, die zusätzliche Energie von energiereicheren Photonen geht durch Thermalisierung der angeregten Ladungsträger verloren. So kann zum Beispiel eine Siliziumsolarzelle nur den rot eingezeichneten Bereich nutzen, was in etwa der Hälfte der Energie des Sonnenspektrums entspricht.

[2] Die Bandlücke von Silizium ist nahezu ideal für das Spektrum des Sonnenlichtes geeignet. Nachteilig ist nur, dass Silizium ein indirekter Halbleiter ist und damit keine sehr hohe Absorptionskonstante aufweist.

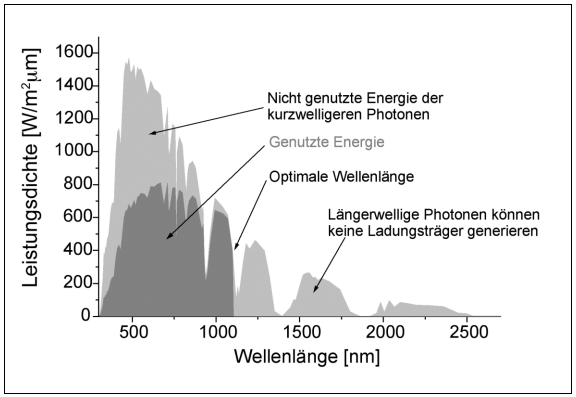

Abb. 3 Verhältnis der von einer Siliziumsolarzelle maximal nutzbaren Lichtleistung zur gesamt eingestrahlten Leistung in unseren Breitengraden
(Spektrum AM1.5g = Air mass 1.5, d.h. das Sonnenlicht muss aufgrund des schrägen Einfalls 1,5mal durch die Atmosphäre laufen, dementsprechend gilt AM1 = Äquator, AM0 = Weltraum).

Durch weitere technologisch nicht vermeidbare Verluste ist der theoretische Wirkungsgrad bei Silicium auf ca. 29% begrenzt [4]. Die erreichten 24,7% zeigen, dass die Siliziumsolarzellen einen sehr hohen Entwicklungsstand erreicht haben. Legt man an eine dieser Rekordzellen einen Strom an und betreibt sie somit als Silizium-LED [5], so konnte ohne weitere Optimierung der aktuelle Wandlungsbestwert für Silizium-LEDs erreicht werden.

Im Vergleich zu diesen im Labor hergestellten Rekordzellen ist der Herstellungsprozess einer Siliziumsolarzelle in der industriellen Produktion äußerst einfach und robust.

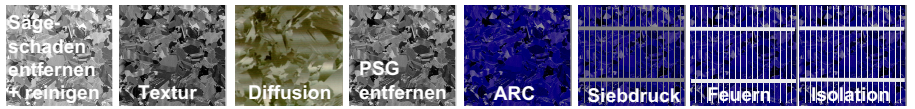

Abb. 4: Vereinfachte Darstellung des Herstellungsprozesses einer industriellen Siliziumsolarzelle
(Diffusion = Diffusion des phosphordotierten Emitters in die p-dotierte Basis, PSG = Phosphorglas, ARC = Antireflexschicht, Siebdruck = Siebdruck der Metallkontakte, Feuern = Einfeuern der Metallkontakte, Isolation = Kantenisolation zur Vermeidung elektrischer Kurzschlüsse)

Das macht es möglich, Taktzeiten von 1000 Zellen pro Stunde einer typischen Größe von 12,5x12,5 cm^2 oder 15.6 x15,6 cm^2 in einer Fabrikationslinie zu erreichen. Die Photovoltaik hat damit andere Anforderungen als die Mikroelektronik, bei der nicht hauptsächlich der Durchsatz, sondern eher technische Herausforderungen wie kleinste Strukturen und höchste

Reinheit relevant sind. Aufgrund dieser unterschiedlichen Randbedingungen hat sich auch bei der Ausstattung der Photovoltaiklinien in den letzten Jahren eine deutliche Emanzipation vollzogen: Es gibt mittlerweile eine eigene Photovoltaik-Equipmentindustrie die eigene Gerätekonzepte für kostengünstige Prozesse mit sehr hohen Durchsätzen entwickelt.

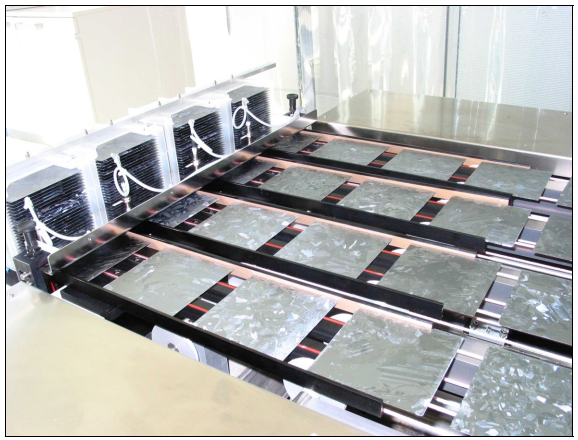

Abb. 5: Die Solarzellenproduktion muss insbesondere auf maximale Durchsätze optimiert werden. Die Abbildung zeigt einen Phosphordiffusionsofen, den die Wafer auf Keramikbändern getragen durchlaufen
(Quelle: Fraunhofer ISE)

Neben der Verbesserung des Herstellungsprozesses spielt die Erhöhung des Wirkungsgrades eine entscheidende Rolle bei der Verringerung der Energiegestehungskosten. Da der Siliziumwafer mit ca. 30-40% einen großen Anteil an den Kosten eines Photovoltaikmodules hat, ist es entscheidend, möglichst viel Leistung pro Einheit Silizium zu gewinnen.

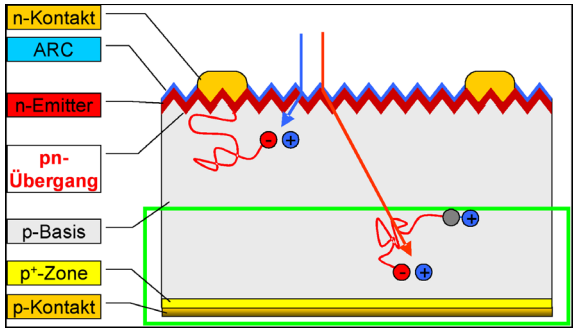

Abb. 6: Schematische Darstellung einer ca. 300 µm dicken Industriesolarzelle.

Während, wie bereits erwähnt, Laborzellen Wirkungsgrade von knapp 25% erreicht haben, liegt der Wirkungsgrad von industriell gefertigten Zellen im Bereich zwischen 14 und 17%.

Abbildung 6 zeigt den typischen Aufbau einer solchen industriellen Zelle. Auf der Vorderseite der Zelle befinden sich die siebgedruckten n-Kontakte. In vielen Fällen ist die Vorderseite der Zelle strukturiert, um den Lichteinfang zu verbessern und das Licht auf einen schrägen Pfad durch das Zellvolumen zu lenken. Gemeinsam mit einer Antireflexschicht aus Siliziumnitrid werden sehr kleine Reflexionswerte erreicht und die Zelle erhält ihr typisches blauschwarzes Aussehen. Knapp unter der vorderen Oberfläche befindet sich der pn-Übergang, der durch Phosphordiffusion in die p-dotierte Basis erzeugt wird. Auf der Rückseite der Zelle befindet sich der siebgedruckte ganzflächige Aluminiumkontakt. Durch einen Kontaktfeuerschritt entsteht dort ein Aluminium-Silizium-Gemisch, dass als p^+-Zone dient und die elektrischen Eigenschaften der Rückseite verbessert.

Ein wichtiger Verlustfaktor in einer solchen Zelle ist die Ladungsträgerrekombination. Da relativ kostengünstiges und damit nicht hochreines Silizium verwendet werden muss, finden sich im Material relativ viele elektrisch aktive Defekte, die die Rekombinationsrate von lichtgenerierten Elektronen mit Löchern stark erhöhen und damit deren mittlere Lebensdauer stark reduzieren. Damit ist auch die mittlere Weglänge, die die Elektronen in der feldfreien Basis diffundieren können, die Diffusionslänge, reduziert und ab einer bestimmten Tiefe (grünes Kästchen in Abb. 6) können die Ladungsträger nicht mehr den pn-Übergang erreichen und in den äußeren Stromkreis abgeführt werden. Um dieses Problem zu lösen, gibt es zwei Möglichkeiten: Einerseits kann man versuchen, dass Material zu verbessern, andererseits die Zelldicke zu reduzieren (siehe Abb. 7).

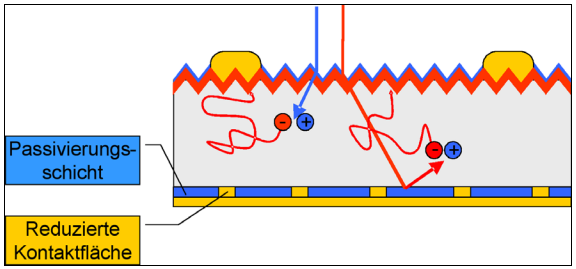

Abb. 7: Schematische Darstellung einer verbesserten 150 µm dicken Siliziumsolarzelle.

So wird das Verhältnis von Diffusionslänge zu Dicke verbessert und außerdem Silizium eingespart. Allerdings muss nun der Tatsache Rechnung getragen werden, dass Silizium ein indirekter Halbleiter ist und insbesondere rotes und infrarotes Licht tief in die Zelle eindringt oder sogar vollständig durchdringt. Deshalb muss die Zelle intern verspiegelt werden. Weiterhin darf die Rückseite nicht als elektrischer Defekt fungieren, dass heißt die freien Siliziumbindungen an der Oberfläche müssen abgesättigt werden. Beide Anforderungen können am besten mit einer dielektrischen Passivierungsschicht wie z.B. Siliziumdioxid und Siliziumnitrid befriedigt werden. Diese Schicht muss natürlich noch an einigen Stellen (ca. 1% der Ge-

samtfläche) durchbrochen werden, damit überhaupt ein Strom in die rückseitige Metallisierung fließen kann. Gerade diese lokale Kontaktierung war bisher das Hauptproblem, weshalb dieses Konzept, das im Labor Wirkungsgrade von über 20% ermöglicht, nicht in die industrielle Produktion übertragen wurde. In letzter Zeit konnten nun aber auf Lasertechnologie beruhende Prozessschritte entwickelt werden [6], die die Übertragung in die industrielle Massenfertigung möglich macht.

Dies ist natürlich nur ein Beispiel für die vielfältigen Bemühungen der PV-Forschung und Industrie neue Konzepte und Prozesse zur Verbesserung der industriellen Siliziumsolarzelle zu entwickeln. In dieser Beziehung nimmt Deutschland neben Japan eine internationale Spitzenstellung ein.

3. Ein Hauch von Photovoltaik: Dünnschichtsolarzellen

Wie schon im vorangegangenen Abschnitt diskutiert, nehmen die Materialkosten des Siliziumwafers einen entscheidenden Anteil an den Energiegestehungskosten aus Siliziumsolarmodulen ein. Dies ist die Hauptmotivation für die Dünnschichtphotovoltaik, bei der nur eine dünne Schicht photoaktives Material auf ein kostengünstiges Substrat abgeschieden wird. Eine Vielzahl von Materialien kommen hierfür in Frage: kristallines und amorphes Silizium, CdTe, CIS , usw.. Neben dem reduzierten Materialeinsatz ist die integrierte Verschaltung von Dünnschichtmodulen ein entscheidender Unterschied zu Wafersolarzellen. Die abgeschiedenen Schichten werden strukturiert und monolithisch verschaltet (siehe Abb. 8) während bei Wafersolarzellen einzelne Zellen zu einem Modul zusammengesetzt werden. Diese monolithische Verschaltung könnte für die Massenfertigung auf großen Flächen entscheidende Vorteile bringen.

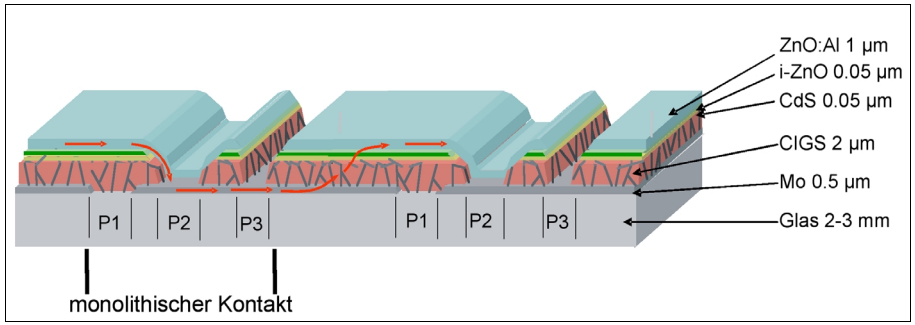

Abb. 8: Schema einer CIS Dünnschichtsolarzelle. Der rote Pfeil deutet den Stromfluss an
(Quelle: ZSW, Stuttgart).

Trotz dieser offensichtlichen Vorteile konnten sich die Dünnschichttechnologien aber gegen die Siliziumwafertechnologie (noch) nicht durchsetzen. Dabei lassen sich zwei Hauptprobleme identifizieren: der niedrigere Wirkungsgrad und die noch nicht soweit entwickelte Fertigungstechnologie[3].

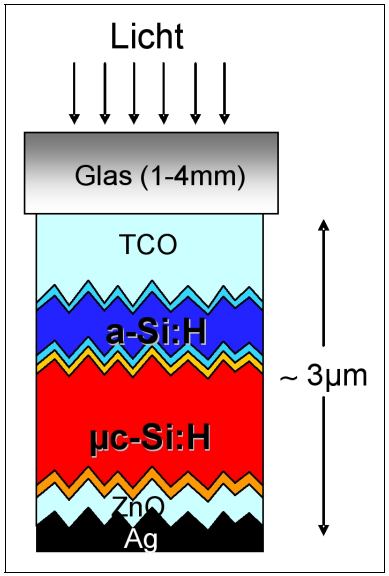

Abb. 9: Schema einer Dünnschichtsolarzelle aus amorphem (a-Si:H) und mikrokristallinem Silizium (µc-Si:H). Die Elektrode auf dem Glas besteht aus einer transparenten leitfähigen Metalloxidschicht (TCO = Transparent Conductive Oxide)
(Quelle: Forschungszentrum Jülich).

Insbesondere die am weitesten verbreitete Dünnschichtsolarzelle aus amorphem Silizium[4] weist einen recht niedrigen Wirkungsgrad von weit kleiner als 10% auf. Dieser Nachteil überkompensiert den Vorteil ihrer sehr einfachen Herstellung insbesondere bei Anwendungen in photovoltaischen Kraftwerken[5]. In letzter Zeit wurden allerdings vermehrt Konzepte zu einer starken Erhöhung des Wirkungsgrades von a-Si Zellen entwickelt, die zum Beispiel auf der Kombination mit mikrokristallinem Silizium beruhen [7] (siehe Abb. 9). So konnten Wirkungsgrade von über 10% erreicht werden. Diese Zellkonzepte sind bereits in den ersten Zelllinien umgesetzt worden.

[3] Der Vorteil der Siliziumwafersolarzelle in dieser Beziehung beruht natürlich nicht nur auf der PV-Industrie und Forschung sondern auch auf der langjährigen Erfahrung in der Mikroelektronik.
[4] Die amorphe Silizium-Technologie stellt einen Anteil von knapp 10% am gesamten PV-Markt.
[5] Die amorphe Dünnschichtsolarzelle hat dagegen die Marktnische von Kleinanwendungen in Taschenrechnern, Uhren usw. fast vollständig erobert.

Einen ähnlichen Wirkungsgrad weisen auch die Zellen aus den ersten CdTe-Linien auf. Spitzenreiter in Hinblick auf Wirkungsgrade bei Dünnschichtzellen ist allerdings die CIS-Zelle (siehe Abb. 8), die im Labor schon über 19% erreicht hat [8]. Deshalb wurden starke Aktivitäten zur Überführung dieses Zelltyps in die industriellen Produktion (z.B. bei Würth Solar und Shell Solar) entfaltet. Nur durch das konsequente Hochskalieren dieser Fertigungslinien kann der zweite Nachteil gegenüber der Siliziumwafertechnologie, die geringere Erfahrung im Fertigungsbereich, ausgeglichen werden.

4. Organische und Farbstoffsolarzellen

Um die Kosten der Zellherstellung noch weiter zu senken, macht es Sinn, sich über photoaktive Materialien jenseits von Halbleitern Gedanken zu machen. Hier spielen insbesondere Farbstoff- und Polymersolarzellen eine wichtige Rolle.

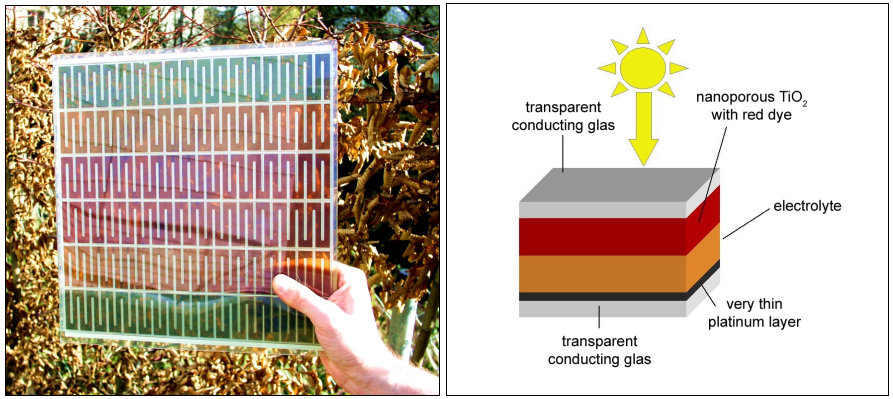

Abb. 10: Links: Farbstoffsolarzellenmodul mit verschiedenen Farbstoffen (Quelle: Fraunhofer ISE)**. Rechts: Schematische Darstellung einer Farbstoffsolarzelle: Eingebettet zwischen zwei mit transparenten Elektroden versehenen Glasscheiben befindet sich ein Gemisch aus winzigen TiO_2-Kügelchen, einem Farbstoff und einem Elektrolyten.**

Bei Farbstoffsolarzellen ist der Farbstoff die eigentliche photoaktive Substanz [9]. Dieser kann auf das Spektrum des einstrahlenden Lichtes angepasst werden. Mit diesem Konzept konnten bereits Wirkungsgrade über 10% erreicht werden, allerdings ist hierbei die Langzeitstabilität noch ein wichtiger Entwicklungsschwerpunkt. Auch hier setzt die Wafersiliziumsolarzelle mit ihrer garantierten Lebensdauer von 25 Jahren den Meilenstein.

Polymersolarzellen sind nun der neueste Trend aus dem Bereich der Nicht-Halbleiter-Solarzellen. Die Idee Zellen aus „Plastik“ herzustellen ist natürlich sehr charmant und birgt großes

Potential. Allerdings zeigt der bisher erreichte Maximalwirkungsgrad von 5% [10] den noch notwendigen Entwicklungsbedarf auf.

5. Jenseits der Shockley-Queisser-Grenze

Während in den beiden vorangegangenen Kapiteln der Schwerpunkt auf einer starken Kosteneinsparung bei der Zellherstellung lag, soll in diesem Abschnitt die gravierende Erhöhung des Wirkungsgrades Thema sein. Wie schon in Abb. 3 dargestellt, ist ein Hauptverlustfaktor bei der Verwendung von nur einem Halbleitermaterial die Nichtabsorption von langwelligem Licht und Thermalisierung von Ladungsträgern. Verwendet man dagegen einen Stapel aus mehreren Halbleitern mit verschiedenen Bandlücken, so kann dieser Verlust signifikant reduziert werden (siehe Abb. 11).

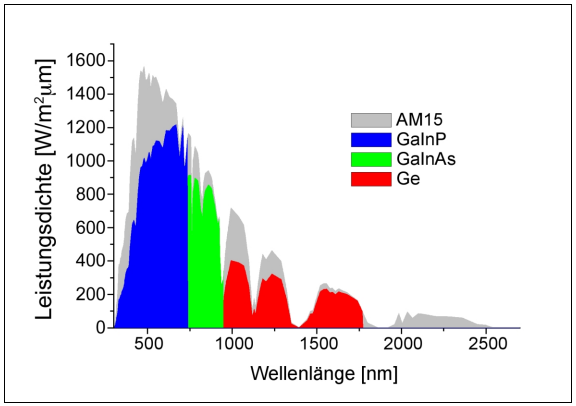

Abb. 11: AM1.5-Spektrum (grau) und die von einem Stapel aus drei verschiedenen Solarzellentypen genutzte Leistungsdichte.

Diese Anordnung nennt sich je nach Anzahl der verwendeten Zelltypen Tandem-, Tripel-, Quadrupel-Solarzelle (die Liste ließe sich noch fortsetzen). Bei einer Tripel-Solarzelle steigt der theoretische Wirkungsgrad von 33% bei einer einfachen Zelle auf 51%. Die Anordnung von Mehrfachsolarzellen kann sowohl rein mechanisch erfolgen oder – wesentlich eleganter – als monolithischer Aufbau, wie er z.B. als Schichtfolge in einem MOVPE[6]-Reaktor gewachsen werden kann. Experimentell konnten schon Wirkungsgrade weit über 30% erreicht werden [11] und damit die mit Abstand besten Werte in der gesamten Photovoltaik. Leider sind die Kosten solcher Solarzellen aufgrund der teuren verwendeten Materialien um ein Vielfaches höher als die von Siliziumsolarzellen. Daher nutzt man sie hauptsächlich für Weltraumanwendungen und in optischen Konzentratorsystemen.

[6] MOVPE = metallorganische Gasphasenepitaxie

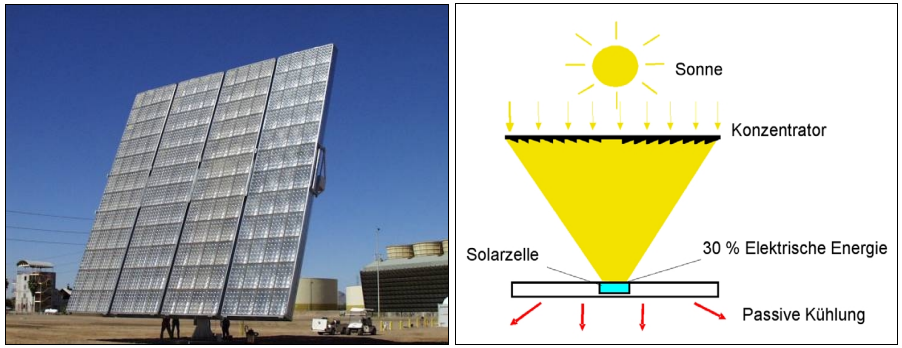

Abb. 12: Links: Zweiachsig nachgeführtes Konzentratorsystem (Quelle: Amonix, USA). Rechts: Prinzip eines Konzentratorsystems (hier mit Fresnellinse). Die verwendeten Tandem- oder Tripelsolarzellen ermöglichen einen sehr hohen Wirkungsgrad von über 30%.

Durch die Verwendung einer kostengünstigen Optik in Form von Spiegeln oder Linsen wird das Sonnenlicht konzentriert. Einfache Konzentratorsysteme, die der Sonne nur um eine Achse nachgeführt werden, erreichen dabei ca. eine 20- bis 50fache Konzentration, während zweiachsig nachgeführte Systeme Konzentrationen von 100- bis 500fach erreichen. Dieser Konzentrationsfaktor spiegelt gleichzeitig die Reduzierung der pro Einheitsfläche benötigten Zellfläche wieder. So können die Zellkosten stark reduziert werden, allerdings sind die Systemkosten aufgrund der notwendigen Nachführung und der optischen Elemente höher. Weiterhin erhöht sich durch die Konzentration der theoretisch mögliche Zellwirkungsgrad, da die Spannung einer Solarzelle logarithmisch mit der Bestrahlungsdichte steigt. Kostenrechnungen zeigen, dass Konzentratorsysteme Kostenvorteile gegenüber Flachmodulen haben, insbesondere wenn die Konzentration hoch gewählt wird und relativ große Einheiten in Form von Konzentratorkraftwerken installiert werden. Mit solchen Systemen konnten bereits sehr hohe Systemwirkungsgrade erreicht werden [12], die Markteinführung wird momentan mit Nachdruck verfolgt.

Neben Mehrfachsolarzellen werden momentan viele Arten neuer Solarzellenkonzepte diskutiert, mit denen es im Prinzip möglich ist, die Shockley-Queisser-Grenze von 33% zu überschreiten. Die meisten dieser neuen Konzepte sind noch Gedankenexperimente, aber die ersten experimentellen Umsetzungen haben begonnen. Als Beispiel sei hier die sogenannte Hochkonversion [13] genannt, bei der es möglich ist, ohne starke Eingriffe in bestehende Solarzellenkonzepte den theoretisch möglichen Wirkungsgrad signifikant zu steigern.

In Abbildung 13 ist auf der linken Seite eine Standardsolarzelle abgebildet, deren einzige Besonderheit ist, dass sie auf der Rückseite auch ein Kontaktgitter statt einer ganzflächigen Metallisierung hat. So kann langwelliges Licht, dessen Energie zu klein für die Erzeugung eines Elektron-Loch-Paares ist, durch die Zelle passieren. Hinter der Zelle ist nun ein Hochkonverter angebracht, der über ein Zwischenniveau zwei niederenergetische Photonen in ein höherenergetisches Photon wandelt. Dieses Photon wird nun von der Rückseite in die Zelle eingekoppelt und kann dort ein Elektron-Loch-Paar generieren. In ersten Experimenten konnte so Licht mit einer Wellenlänge von ca. 1500 nm und damit weit über der normal für Siliziumsolarzellen nutzbaren Grenzwellenlänge (siehe Abb. 3), ein signifikantes Stromsignal generieren [14]. Noch stecken diese Konzepte experimentell in den Anfängen, aber aufgrund ihres grossen Potentials werden sie in der Forschung zukünftig eine große Rolle spielen.

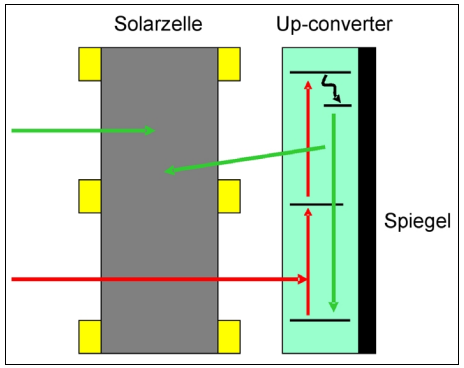

Abb. 13: Prinzip der Hochkonversion (Quelle: T. Trupke und P. Würfel).

6. Zusammenfassung

Die Photovoltaik hat von allen regenerativen Energiequellen das größte Potential. Um dieses effektiv zu nutzen, müssen allerdings die Energiegestehungskosten weiter reduziert werden. Durch die immer weitergehende Industrialisierung auf Basis der Wafersiliziumsolarzelle konnten schon starke Kostensenkungen erreicht werden. Die Photovoltaikindustrie hat sich durch ihr starkes Wachstum mittlerweile von der Mikroelektronik emanzipiert und stellt in Ländern wie Japan oder Deutschland einen stark wachsenden Industriezweig dar. Obwohl die Siliziumsolarzelle mit über 90% Anteil den PV-Markt dominiert, ist das Spektrum der möglichen Zellkonzepte sehr groß. Einige von ihnen, wie Dünnschichtzellen, die eine starke Reduzierung der Herstellungskosten versprechen, sind gerade auf dem Sprung in die Massenfertigung, andere, wie Polymersolarzellen, könnten langfristig relevant werden. Neben einer Reduzierung der Modulherstellungskosten ermöglicht auch eine starke Erhöhung der Wirkungsgrade bei gleichzeitiger Reduzierung der Zellfläche, wie sie in Konzentratorsystemen realisiert werden kann, eine alternative Route zur Verringerung der Energiegestehungskosten. Die völlig neuen Konzepte, wie die Hochkonversion, die theoretisch eine starke Erhöhung des maximalen Wirkungsgrades ermöglichen, werden erst auf lange Sicht von Bedeutung sein, machen die Photovoltaik aber nicht nur in Hinblick auf energiepolitische sondern auch auf wissenschaftliche Aspekte so spannend.

Referenzen

[1] Bubenzer and Luther: *Photovoltaics guidebook for decision makers* (Springer, 2003)

[2] W. Shockley and H. J. Queisser, J. Appl.: Phys. **32**, 510 (1961)

[3] J. Zhao, A. Wang, and M. A. Green: *24·5% Efficiency silicon PERT cells on MCZ substrates and 24·7% efficiency PERL cells on FZ substrates*, Progr. Photovolt. **7**, 471-474 (1999)

[4] R. M. Swanson: *Approaching the 29% limit efficiency of silicon solar cells*, *Proceedings of the 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (2005)

[5] M. A. Green, J. Zhao, A. Wang, P. J. Reece et al.: *Efficient silicon ligh-emitting diodes*, Nature, 805 (2001)

[6] E. Schneiderlöchner, R. Preu, R. Lüdemann, and S. W. Glunz: *Laser-fired rear contacts for crystalline silicon solar cells*, Progr. Photovolt. **10**, 29-34 (2002)

[7] B. Rech, J. Müller, T. Repmann, O. Kluthet al.: *Amorphous and microcrystalline silicon based solar cells and modules on textured substrates*, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 762 A3.1

[8] M. J. Romero, K. Ramanathan, M. A. Contreras, M. M. Al-Jassim et al.: *Proceedings of the NREL Photovoltaic Review Meeting*, (2003) 7

[9] M. Grätzel: *Perspectives for dye-sensitized nanocrystalline solar cells*, Progr. Photovolt. **8**, 171-185 (2000)

[10] C. J. Brabec: *Organic photovoltaics: technology and market*, Sol. Ener. Mater. Sol. Cells **83**, 273-292(2004)

[11] R. R. King et al.: *Lattice-matched and metamorphic GaInP/GaInAs/Ge concentrator solar cells*, *Proceedings of the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion* (2003)

[12] A. W. Bett, C. Baur, F. Dimroth, G. Lange et al.: *FLATCON-modules: technology and characterisation, Proceedings of the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, pp. 634-7 (2003)

[13] T. Trupke, M. A. Green, and P. Würfel: *Improving solar cell efficiencies by up-conversion of sub-band-gap light*, J. Appl. Phys. **92**, 4117-4122(2002)

[14] T. Trupke, A. Shalav, P. Würfel, and M. A. Green: *Efficiency enhancement of solar cells by luminescent up-conversion of sunlight*, *Proceedings of the 14th International Photovoltaic Science and Engineering Conference*, pp.753-756 (2004)

UNSERE VERANTWORTUNG FÜR DAS KLIMA – WAS KÖNNEN WIR WISSEN?

Brigitte Falkenburg
Universität Dortmund, Fakultät 14, Institut für Philosophie

Unsere Verantwortung für das Klima liegt im Spannungsfeld von Technik und Wissenschaft, Ökonomie und Moral. Unser Energieverbrauch ist *kollektives* technisch-ökonomisches Handeln unter Bedingungen extremer Unsicherheit. Wenn wir von unserer Verantwortung für das Klima sprechen, so beziehen wir uns jedoch mit einem moralischen Begriff auf *individuelles* Handeln. Was heißt dabei „Verantwortung"? Wie kann und soll man Verantwortung für das Klima übernehmen? Offenbar, indem man sich Wissen über den Zusammenhang von Energieverbrauch und Klimaentwicklung verschafft und entsprechend handelt. Dieser Zusammenhang ist aber längst nicht so exakt und eindeutig modellierbar, wie Politik und Öffentlichkeit es gerne hätten. Außerdem beruht unser individueller Energieverbrauch nicht auf moralischen Prinzipien, sondern auf ökonomischen Bedingungen; und unsere Handlungsoptionen sind begrenzt, weil es „die" billige alternative Energie bislang nicht gibt, die Weltbevölkerung weiter wächst und die Industrialisierung der Entwicklungsländer den Energieverbrauch weiter steigert. Was können wir über unsere Handlungsoptionen und deren Konsequenzen wissen, angesichts des gegenwärtigen Stands der Klimaforschung und unter Bedingungen des globalisierten Kapitalismus?

Offensichtlich handelt es sich hier um eine äußerst komplexe Frage. Entsprechend möchte ich im Folgenden vor allem verdeutlichen, worin das Problem eigentlich besteht, in welche Teilaspekte es sich auffächert und wie diese ineinander greifen. Erst wenn man dies verstanden hat, lassen sich Handlungsoptionen verorten. Es geht mir im Folgenden also vorrangig um Problemanalyse – und *nicht* um Ausführungen zum gegenwärtigen Stand der Klimaforschung. Was diesen Forschungsstand betrifft, möchte ich Sie auf die anderen Beiträge in diesem Band des Symposiums *Klima und Energie* verweisen.

Meine Ausführungen haben vier Teile. Im ersten Teil analysiere ich, was *Verantwortung* heißt und wie dieser Begriff in Bezug auf Umweltprobleme zu verstehen ist. Im zweiten Teil geht es um die Frage, was es mit dem *Klima* als Gegenstand der Verantwortung auf sich hat, und im dritten Teil um unser *Wissen* bezüglich der Folgen unserer Einwirkungen auf das Klima. Zuletzt skizziere ich die *Optionen* bezüglich der Frage, inwieweit man Verantwortung für das Klima übernehmen kann.

1. Verantwortung

Verantwortung ist ein *moralischer* Begriff, der sich auf *individuelles Handeln* bezieht. Dabei handelt es sich um ein Konzept, das sich auf die Folgen unserer Handlungen bezieht. Verantwortung haben wir für die Konsequenzen unseres Tuns – der Verantwortungsbegriff bezieht sich nicht auf das, was wir *wollen*, sondern auf das, was wir *faktisch bewirken*. In den klassischen Ethiken kommt dieser Begriff noch nicht vor. Sie waren zentriert um Fragen der menschlichen Lebensführung und um Ziele wie menschliches Glück (Epikur); Tugend (Aristoteles); Pflicht (Kant); oder größtmögliche Nützlichkeit (John Stuart Mill). Verantwortung dagegen sprechen wir uns im Hinblick auf die Frage zu, ob die Folgen unserer Handlungen jemanden schädigen – etwa, wenn wir soziale, technische oder politische Aufgaben, die wir übernommen haben, nicht korrekt erfüllen, so dass dadurch Personen oder Sachen zu Schaden kommen. Dies hat im Allgemeinen auch rechtliche Konsequenzen. Das Nachdenken über Verantwortung zielt darauf, Maßstäbe dafür zu entwickeln, wer für entstandene Schäden aufkommen muss; aber auch darauf, wie sich Schäden möglichst schon im Vorfeld vermeiden lassen. Der rechtliche Aspekt der Verantwortung sind Fragen der Zurechnung und Haftung; wem ist ein entstandener Schaden zuzurechnen, d.h. wer hat ihn verursacht; und wie soll der Verursacher dafür einstehen, d.h. wodurch und inwieweit soll er haftbar gemacht werden.

Verantwortung ist demnach ein komplexer sozialer Begriff. Von Verantwortung zu sprechen, bezieht Personen wie Sachen ein, es hat moralische und rechtliche Aspekte. Verantwortung bringt immer schon mindestens dreierlei ins Spiel:[1]

1. eine Person, als *Träger* von Verantwortung;
2. eine Sache, als *Gegenstand* der Verantwortung;
3. ein Normensystem, als *Bewertungsmaßstab*.

   Jemand trägt Verantwortung *für* Gegenstände und Folgen seiner Handlungen *in bezug auf* irgendwelche moralische oder rechtliche Maßstäbe, anhand deren beurteilt wird, ob sie oder er seiner Verantwortung gerecht wird. Aber ist es noch komplizierter. Jeder von uns trägt die Verantwortung für seine Handlungsfolgen gegenüber Personen, die in irgendeiner Weise von uns abhängig sind – Eltern für Kinder, Professoren für Studierende, Manager für Angestellte, Technikhersteller und -betreiber für die Anwender von Technik, Regierende für Wähler:
4. andere Personen, als *Adressaten* von Verantwortung.

   Dabei ist die Verantwortung, die man jemandem zuspricht, üblicherweise nicht unbegrenzt, sondern auf einen Bereich beschränkt, in dem man für bestimmte Personen und Sachen die Verantwortung trägt – im Rahmen der persönlichen Lebensführung, Familie, Berufstätigkeit, im Rahmen eines Amts, in der Gesellschaft, d.h. als Bürger:
5. ein sozialer Bereich, als *Rahmen* der Verantwortung;

   Dazu kommt schließlich noch eine Institution, vor der man sich subjektiv verantwortlich fühlt oder objektiv verantwortlich ist, weil sie die Befugnis hat, jemanden zur Re-

[1] Bayertz 1995, S. 17.

chenschaft ziehen – das Gewissen, das persönliche soziale Umfeld, Vorgesetzte, ein Gericht:

6. eine soziale Institution, als *Instanz* von Zurechnung, Beurteilung und Sanktionen.

Damit sind wir bei einem Verantwortungsbegriff angelangt, der 6-stellig ist: *Jemand* trägt Verantwortung *für* Aufgaben, Sachen, Handlungsfolgen *in bezug auf* irgendwelche Normen, Beurteilungsmaßstäbe oder Bewertungskriterien; und dies tut er *gegenüber* bestimmten Personen *im Rahmen* eines sozialen Bereichs *vor* einer sozialen Instanz.[2]

Man kann den Verantwortungsbegriff auch anders formulieren,[3] er ist insgesamt noch facettenreicher. Im Hinblick auf die Umweltdebatte ist es wichtig, ob die Verantwortung vergangenheits- oder zukunftsbezogen definiert wird; als Haftung für entstandene Schäden oder als Sorge für die Vermeidung künftiger Schäden. Umwelt*recht* zielt auf ersteres, auf die Zurechnung von entstandenen Schäden und die Haftung dafür. Dagegen zielt Umwelt*politik* auf Letzteres, auf Sorge für die Verringerung jetziger und die Vermeidung künftiger Umweltschäden. Sie realisiert damit das berühmte *Prinzip Verantwortung*. Der Philosoph Hans Jonas stellte dieses Prinzip 1979 auf, um – wie er etwas apokalyptisch sagte – dem „entgültig entfesselten Prometheus" von Wissenschaft und Wirtschaft Einhalt zu gebieten.[4] Er meinte mit dem „entfesselten Prometheus" eine technisch-ökonomische Welt mit immer rasanterem unkontrolliertem Wachstum; und mit dem „Prinzip Verantwortung" ein *moralisches* Prinzip, das sich am Vorbild der Sorge von Eltern für ihre Kinder orientiert und auf eine kollektive Ethik zielt. Ein solches moralisches Prinzip wirkt allerdings etwas hilflos angesichts der kollektiven Praxis von Hochtechnologie und steigendem Energieverbrauch. Die Umweltpolitik setzt stattdessen auf die vorbeugende Wirkung von Umweltgesetzen.

Jonas' moralisches *Prinzip Verantwortung* macht ein zentrales Problem deutlich. Es ist *schwierig*, einen Verantwortungsbegriff, wie wir ihn soeben definiert haben, auf die Fälle von *kollektiver Verantwortung* auszudehnen, die uns im Zusammenhang mit *Umweltschäden* interessieren. Wenn öffentliche Güter wie Wasser, Luft und andere natürliche Ressourcen Schaden nehmen, also entweder zu stark verschmutzt oder zu schnell verbraucht werden, so ist dafür meistens nicht einzige Person verantwortlich, sondern *viele* Personen gemeinsam, also ein *Kollektiv*. Oft gelingt es dann nicht, einzelne Verantwortungsträger zu identifizieren und jemanden zur Rechenschaft zu ziehen. Schlimmstenfalls kommt es vor, dass alle Mitglieder einer sozialen Gemeinschaft zusammen genommen durch die Summe ihrer Handlungen die Lebensgrundlagen ihrer Gemeinschaft insgesamt bedrohen, ohne dass sich auch nur einem einzigen Mitglied ein schuldhaftes oder verantwortungsloses Verhalten gegenüber den anderen Mitgliedern nachweisen ließe. Genau dies befürchteten Hans Jonas und andere Technikphilosophen, die apokalyptische Szenarien entwarfen. In der Ökonomie ist diese Situation schon lange als „Tragödie der Allmende" bekannt: Alle Bauern schicken immer mehr Kühe

[2] Lenk und Maring 1993, S. 229.
[3] So definiert z.B. Hooker 1992, S. 147, Verantwortung als 6stellige Relation mit 4 *anderen* Relaten.
[4] Jonas 1979, 7.

auf die Gemeindewiese, bis keine Kuh mehr genügend Nahrung findet. Einzige Abhilfe schaffen beschränkte Nutzungsrechte für öffentliche Güter und drastische Sanktionen bei Überschreitung. Die Folgen unserer Einwirkung auf das Klima gehen in genau diese Richtung, aber sie lassen sich noch sehr viel schwerer identifizieren, zurechnen, ahnden und kompensieren als andere kollektive Umweltsünden.

Die Umweltdebatten der letzten Jahrzehnte haben es allerdings bewirkt, dass Umweltpolitik und Umweltrecht immer mehr gestärkt wurden und ihre Umsetzung der Schädigung vieler öffentlicher Güter zunehmend Einhalt gebieten konnte. Hierfür entwickelte man neue Formen der Zurechnung von Handlungsfolgen: Soziale Institutionen anstelle von Einzelpersonen wurden zu Trägern von Verantwortung erklärt; und zwar nicht nur Unternehmen, sondern auch Regierungen und Staaten. So etwas gelang und gelingt immer nur, indem man die oben genannten Facetten der Verantwortung jeweils ganz genau spezifiziert: *Wer* trägt die Verantwortung *wofür* und *in welchem Rahmen*? Nach welchen *Kriterien* stellt man fest, ob eine Institution ihrer Verantwortung gerecht wird? Gegenüber welchen *Adressaten* haftet sie, falls nicht? Welche *Instanz* entscheidet darüber und über etwaige Sanktionen? Um genau solche Fragen ringt man seit Jahrzehnten, wenn man nationale Emissionsauflagen und Haftungsbestimmungen entwickelt; und wenn es darum geht, internationale Konventionen wie das Kyoto-Protokoll zu etablieren, das jetzt endlich in Kraft getreten ist.

Den einen geht das Kyoto-Abkommen zu weit, den anderen noch lange nicht weit genug. Unter dem Aspekt der Verantwortung ist es eine immense kollektive Leistung, dass es *überhaupt* zustande kam und mittlerweile von hinreichend vielen Nationen ratifiziert wurde – auch wenn ausgerechnet die Nation mit dem *größten* Energieverbrauch pro Kopf und Jahr, nämlich die USA, nicht dabei ist. Damit bin ich beim zweiten Punkt meiner Ausführungen, nämlich beim Klima. Vorab kann man schon sagen: Wir müssen nach Kriterien suchen, die es uns erlauben, die kollektive Verantwortung für das Klima zu *verteilen*[5] – auf *verschiedene* moralische Subjekte und Rechtssubjekte als Verantwortungsträger, die jeweils in unterschiedlichen sozialen Bereichen und vor unterschiedlichen Instanzen verantwortlich sind für verschiedene Beiträge zum anthropogenen Treibhauseffekt bzw. deren Minderung.

2. Klima

Nach unserer Verantwortung für das Klima zu fragen, ist viel problematischer als den Verantwortungsbegriff in anderen Umweltangelegenheiten zu verwenden. Bei öffentlichen Gütern wie Wasser, Luft, Bodenqualität und Rohstoffen kann man zumindest grundsätzlich herausfinden, wer sie wann wo auf Kosten anderer verschmutzt, zerstört oder verbraucht; auch wenn Zurechnungs- und Haftungsfragen im Einzelfall sehr schwierig sein mögen. Beim Klima werden solche Fragen ungleich schwieriger, wenn nicht gar sinnlos. Anders als Was-

[5] Nach Lübbe 1996 ist die Verteilung von Verantwortung die *einzige* Möglichkeit kollektiver Zurechnung.

ser, Luft, Bodenqualität und Rohstoffe ist das Klima nämlich kein öffentliches Gut, das in irgendeiner Weise *verfügbar* wäre. Es wird nicht von uns konsumiert, sondern es ist in einem völlig *anderen* Sinne Lebensgrundlage für uns als andere öffentliche Güter. Beim Klima handelt es sich nicht um eine Ressource, bei der es z.B. Sinn machen würde, im Zuge der Nachhaltigkeitsdebatte darüber zu diskutieren, ob es nicht vielleicht genügt, den Bestand dieser Ressource durch eine schwach-nachhaltige ökonomische Entwicklung zu sichern. Schwache Nachhaltigkeit besagt, dass eine Ressource soweit verbraucht werden darf, wie sie dank technologischer Entwicklungen durch andere, nicht-natürliche Ressourcen ersetzt werden kann.[6] Das Klima ist nicht substituierbar. Die Folgen einer drastischen globalen Temperaturerhöhung, etwa ein Anstieg des Meeresspiegels, würden sich durch technische Gegenmaßnahmen wie den Bau von Dämmen nicht verhindern, sondern nur sehr partiell mindern und kompensieren lassen. Hier kann man nur starke Nachhaltigkeit fordern, d.h. langfristige Stabilisierung des *status quo* bezüglich der derzeitigen Konzentration von CO_2 und anderen Treibhausgasen in der Atmosphäre fordern – oder aber gleich sagen: Nach uns die Sintflut. Darin ist das Klima der Biodiversität verwandt. Verschwundene Arten sind nicht substituierbar, sondern ein-für-alle-mal verschwunden; und Biotope, deren Artenreichtum im Schwinden ist, regenerieren sich nur langsam. Ähnlich ist das Klima ein äußerst komplexes System, dem wir Menschen ausgeliefert sind, gegen dessen Trends und extreme Ausschläge wir uns nur partiell schützen können und das sich von den Auswirkungen unseren globalen Emissionen nur sehr, sehr langsam erholen wird, sobald wir ihm die Gelegenheit zur Regeneration geben – sei es, indem wir die Emissionen drastisch drosseln, oder sei es erst, wenn die fossilen Brennstoffe verbraucht sind.

Dazu kommt: Der begonnene globale Temperaturanstieg, den die Klimaforschung als Folge des anthropogenen Treibhauseffekts diagnostiziert, wirkt sich gar nicht *direkt* auf uns aus, sondern nur sehr indirekt – nämlich über die lokalen statistischen Kurzzeitschwankungen des Klimas, sprich: das Wetter. Klima und Wetter sind strikt voneinander zu unterscheiden, sie verhalten sich wie folgt zueinander: *Klima* ist das langfristige statistische Verhalten des Wetters, etwa der mittlere Wert der Temperatur an einem Ort, gemittelt über 30 Jahre und mehr, also mindestens eine Generation. *Wetter* sind die statistischen Kurzzeitschwankungen um den Mittelwert.

Wetter und Klima hängen zusammen wie der einzelne Würfelwurf und die langfristige relative Häufigkeit, mit einem Würfel eine 6 zu werfen. Sie liegt bei einem idealen Würfel und sehr vielen Würfelwürfen bei 1/6 Bei einem gezinkten Würfel ist die Ursache für den Wurf einer 6 aber gerade *nicht* im Gezinktsein zu suchen, sondern im blanken Zufall. Ob ein Würfel gezinkt oder in Ordnung ist, wirkt sich nur auf die Langzeitwahrscheinlichkeit aus. Ähnlich sind *Hitzerekorde und Jahrhundertflut* – so der suggestive Titel des populären Buchs von Mojib Latif zum Klimawandel – gerade *nicht* direkt auf den Klimawandel zurückzuführen,

[6] Vgl. die instruktive Diskussion in Ott und Döring 2004, S. 100 ff.

wie der Autor anhand des Würfelbeispiels hervorhebt.[7] Der Klimawandel bewirkt nur statistische Trends z.B. zur Zunahme extremer Wetterereignisse. Kein einzelnes solches Ereignis kann auf den Klimawandel bzw. eine globale Temperaturerhöhung zurückgeführt werden, sondern erst eine statistisch signifikante Häufung. Jeder von uns trägt also durch seinen Verbrauch fossiler Energien direkt zu einem anthropogenen Treibhauseffekt bei; aber niemand von uns bekommt die Auswirkungen direkt und identifizierbar zu spüren.

Ein Menschenleben reicht gerade hin, um lokale Klimaveränderungen direkt zu erfahren, etwa den Rückgang der Alpengletscher durch Erwärmung in den letzten 30 Jahren oder die Verschiebung des Auftretens subtropischer Tier- und Pflanzenarten nach Norden. Ob solche Veränderungen auf Klimaschwankungen beruhen, die in 100 Jahren durch entgegengesetzte Trends wieder kompensiert werden, lässt sich jedoch nicht erfahren, sondern nur aus Messdaten berechnen. Eine statistisch signifikante Zunahme der globalen Temperatur lässt sich auch in einem ganzen, langen Menschenleben *nicht* direkt erfahren, sondern nur aus einer großen Anzahl von Wetterdaten messen, die über einen Zeitraum von mindestens einem Jahrhundert hinweg gesammelt werden, bislang übrigens nur auf der Nordhalbkugel. Wetter können wir also erfahren, Klimaveränderungen nicht.

Bevor ich damit zu meinem dritten Punkt fortschreite, also zur Frage nach unserem Wissen über das Klima und über unsere Verantwortung dafür, möchte ich diese Unwägbarkeiten des Klimas dem Verantwortungsbegriff des ersten Abschnitts gegenüberstellen. Wie steht es mit unserer *Verantwortung* für das Klima? Was können wir meinen, wenn wir davon sprechen? Wir können und sollen uns ja nur für die Folgen *eigener* Handlungen verantwortlich fühlen. Und dabei steht dann *nicht nur* die Frage zur Diskussion, inwieweit unser kollektiver Energieverbrauch zu einem anthropogenen Treibhauseffekt beiträgt und für den in den letzten hundert Jahren gemessenen globalen Temperaturanstieg verantwortlich ist; *sondern auch* die Frage, in welchem Sinne wir dafür Verantwortung übernehmen können und was dies heißt. Jeder Versuch, unsere Verantwortung für das Klima zu bestimmen, hat mit folgenden Fragen zu kämpfen:

1. Wenn es einen anthropogenen Treibhauseffekt mit fatalen Folgen gibt, *wer* verantwortet ihn? Einzelne Personen, Kommunen, Unternehmen, Staaten, die am meisten fossile Energien verbrauchen, oder gar – was am diffusesten wäre – die Menschheit insgesamt? Wie lassen sich angesichts eines *solchen* globalen Problems einzelne *Träger* von Verantwortung finden, seien es nun Personen oder andere Rechtssubjekte?
2. Was genau ist der *Gegenstand* der Verantwortung? Das Ausmaß des anthropogenen Treibhauseffekts *und* auch seine Auswirkungen sind quantitativ unklar und darum nach wie vor umstritten. (Aber dies ist Gegenstand des nächsten Abschnitts meines Vortrags.)

[7] Latif 2003, S. 42 f.; vgl. auch Latif 2004, S. 28.

3. Der *Bewertungsmaßstab* der Verantwortung, die – wer auch immer – zu tragen hat, ist ebenfalls umstritten. Ist es eine abstrakte Norm der Verteilungsgerechtigkeit im Hinblick auf künftige Generationen? Oder – was viel *einfache*r und naheliegender wäre, aber unter Biologismus-Verdacht steht – ist es nicht schlicht und einfach das Interesse von uns als biologischer Gattung an der Sicherung unserer Lebensgrundlagen? (Lässt sich nicht auch das *Prinzip Verantwortung* von Hans Jonas, das ja im Sinne einer Sorge für künftige Generationen gemeint ist, völlig unmetaphysisch so verstehen, dass sich unsere Verantwortung für das Klima auf die simple biologisch-gattungsgemäße Sorge für unsere Nachkommen reduziert?)
4. Fraglich ist auch, wer im Hinblick auf den anthropogenen Beitrag zum Klimawandel eigentlich die *Adressaten* der Verantwortung sind. Sind es künftige Generationen? Sind es die Entwicklungsländer, die bisher viel weniger Emissionen zum anthropogenen Treibhauseffekt beitragen als die Industrienationen? Sind es die Armen in allen Ländern, die sich am wenigsten gegen die Auswirkungen von Dürreperioden, Fluten und extremen Stürmen schützen können? Oder sind es gar die Versicherungen, die vermutlich in Zukunft verstärkt für die Folgen extremer Wetterereignisse für die versicherten Reichen aller Länder aufkommen müssen?
5. Dazu kommt, dass der soziale *Rahmen* „unserer" Verantwortung für das Klima *völlig* uneingeschränkt bleibt. Ist es die gesamte Erde einschließlich aller Biodiversität? Ist es die Menschheit insgesamt? Reicht er nur bis zur nächsten und übernächsten Generation, oder schließt er *alle* künftigen Generationen ein, auf die sich die Klimaentwicklung der nächsten Jahrhunderte auswirkt? Können und sollen wir in so einem uneingeschränkten Ausmaß überhaupt Verantwortung für die Zukunft übernehmen – zumal die jüngere Erfahrung zeigt, dass es seit Beginn der Industrialisierung in der westlichen Welt trotz aller „kapitalistischen Ausbeutung" (abgesehen von sozialen und politischen Problemen) jeder Generation dank der technologischen Errungenschaften sehr viel *besser* geht als der vorhergehenden.
6. Im Vergleich mit all diesen Problemen ist es *erstaunlich einfach* zu sagen, wer denn die *Instanzen der Beurteilung* sein können und sollten. Es sind (i) die Wissenschaft, d.h. vor allem: die Klimaforschung; (ii) eine aufgeklärte, durch Wissenschaft und Medien informierte Öffentlichkeit; (iii) die Politik, die wissenschaftliche Beurteilungsmaßstäbe nicht nur zur Kenntnis nimmt, sondern sie sich auch zu eigen macht; (iv) nationale und internationale rechtliche Abkommen. Allerdings hat die Wissenschaft von Anfang an Katastrophenszenarien entworfen, um Öffentlichkeit und Politik zu erreichen. Szenarien wie ein drastisches Abschmelzen der Polkappen oder ein Umkippen des Golfstroms erwiesen sich aber als übertrieben, was die Klimaskeptiker auf den Plan rief. Insgesamt hat sich die Debatte um das Klima im Lauf der Jahre immer stärker politisiert.[8] Und das heißt: Die Instanzen agieren nicht mehr so unabhängig und sachlich, wie es nötig wäre.

[8] Weingart et al. 2002.

3. Wissen

An dieser Stelle kommen nun die Ergebnisse der Klimaforschung ins Spiel, wobei ich zum gegenwärtigen Forschungsstand nur ganz grundsätzliche Bemerkungen machen kann und will. Sie betreffen unsere Wissensmöglichkeiten und das, was sich daraus für unsere Verantwortung lernen lässt.

Für das Wissen über das Klima und seine Veränderungen gilt dasselbe wie für jede andere naturwissenschaftliche Erkenntnis – es stammt aus zwei verschiedenen Quellen, nämlich aus theoretischen Modellen und aus empirischen Messdaten. Die Klimaforschung kann ihren sehr komplexen Untersuchungsgegenstand nicht im Experimentierlabor untersuchen. (So entstand bereits 1957 die Metapher vom globalen Experiment:[9] Das Experiment ist unsere Praxis des Verbrauchs fossiler Energien; seine Resultate sind nicht reproduzierbar; und sein Gegenstand sind wir.) Um dennoch zu verlässlichem Wissen über die Klimaentwicklung und unsere kollektive Einwirkung darauf zu gelangen, benutzt die Klimaforschung physikalische Modelle der Atmosphäre sowie statistische Daten aus möglichst vielen verschiedenartigen Messungen und aus sehr langen Zeiträumen; und sie vergleicht die besten Daten mit den detailliertesten Modellrechnungen. Die Klimamodelle sind durch die Daten *falsifizierbar*, und dies ist, wie man seit Popper weiß, ein zentrales Kriterium für Wissenschaftlichkeit. Die Klimamodelle sind immerhin so gut, dass sie den Neid von Wirtschaftswissenschaftlern erwecken, wie der Klimaforscher Latif betont.[10] Aus wissenschaftstheoretischer Sicht besagt dies allerdings nur, dass sie anders als die meisten Modelle der Mikro- und Makroökonomie *überhaupt* empirischen Gehalt haben und falsifizierbar sind. Wie gut sie *quantitativ* sind, ist noch eine andere Frage. Und wie stark die empirischen Daten, die dem Test der Modelle dienen, *frei von Modellannahmen* sind, die im Verdacht stehen, das zu Beweisende in die Voraussetzungen der Modellbildung zu stecken – dies ist eine dritte und ganz entscheidende Frage.

Anhand dieser drei Fragen möchte ich aus dem Wissensstand der Klimaforschung einige zentrale Beispiele dafür herausgreifen, was man *sicher* weiß und was man *nicht sicher* weiß. Was man aus den Klimamodellen und den Daten *sicher* weiß, ist folgendes:

1. Es gibt einen *natürlichen Treibhauseffekt*, aufgrund dessen die Erdatmosphäre die von der Sonne eingestrahlte Wärme nicht sofort vollständig reflektiert, sondern zunächst speichert und erst später wieder abstrahlt. Die Energiebilanz dabei ist natürlich gleich Null, sonst würde sich die Erde immer stärker aufheizen. Was stattdessen passiert, ist: Die Erde heizt sich ein Stück weit auf, und es stellt sich ein Wärmegleichgewicht ein, bei dem weiteres Aufheizen durch Abstrahlung kompensiert wird. Dadurch erwärmt sich die mittlere globale Temperatur auf der Erdoberfläche unter gegenwärtigen Bedingungen von –15 °C auf +18 °C, also um 33 °C.[11]

[9] Revelle und Suess 1957.
[10] Latif 2003, S. 1999.
[11] Cubasch und Kasang 2000, 37 ff.

2. Der natürliche Treibhauseffekt ist verursacht durch die Anwesenheit von *Treibhausgasen* wie Kohlendioxid, Methan etc. in der Atmosphäre. Dabei ist CO_2 für den stärksten Effekt verantwortlich; und die CO_2–Konzentration ist mit der mittleren globalen Temperatur korreliert. Aus Messungen weiß man, dass die langfristigen Temperaturschwankungen in der Erdgeschichte um gut 6 °C, also der Wechsel zwischen Eiszeiten und Warmzeiten, mit Schwankungen der CO_2–Konzentration korreliert sind. Die Messungen beruhen auf der Analyse von Eisbohrkernen aus der Antarktis, die aus 1000 m Tiefe stammen. Die CO_2–Konzentration bestimmt man aus der Analyse der Luftbläschen, die im Eis eingeschlossen sind, und die Temperatur aus der Messung der Sauerstoffisotope in den Proben. Dieselbe Art von Messung kann man für Methan durchführen, und es ergibt sich dieselbe Parallelität. Man schließt hieraus, dass es einen *positiven Rückkopplungseffekt* zwischen der Konzentration der Treibhausgase in der Erdatmosphäre und der Erdtemperatur gibt.[12]
3. Einen Temperaturanstieg aufgrund wachsender CO_2-Konzentration in der Atmosphäre hat zuerst Arrhenius im Jahr 1896 vorhergesagt. In den 30er Jahren begann man die Möglichkeit des Zusammenhangs von CO_2-Emissionen und Klimaerwärmung in der Fachliteratur zu diskutieren, aber damals gab es nicht genügend Daten. Wie Messungen am Südpol und auf dem Mauna Loa/Hawaii seit 1957/1958 zeigen, steigt die CO_2–Konzentration in der Tat seit Jahrzehnten. Dabei ist die Konzentration von ungefähr 280 ppm vor der Industrialisierung auf heute gut 360 ppm gestiegen, d.h. um etwa 30%. Nach 1. und 2. ist damit erwiesen, dass es einen *anthropogenen Treibhauseffekt* gibt: Die Erhöhung der CO_2–Konzentration verstärkt den natürlichen Treibhauseffekt, d.h. sie verschiebt das Wärmegleichgewicht der Erde zu einer höheren Temperatur.
4. Viele empirische Messergebnisse indizieren diesen anthropogenen Treibhauseffekt; sie belegen, dass die mittlere Erdtemperatur seit Jahrzehnten signifikant steigt. Genauer: die *sicheren* Daten belegen einen statistisch signifikanten Anstieg der globalen Temperatur *in den letzten 30 Jahren, relativ zu einem Zeitraum von 140 Jahren*. Dass die mittlere Temperatur in der Tat weltweit signifikant ansteigt, zeigt sich eindrücklich am Rückgang der Gletscher, an der Ausbreitung subtropischer Arten nach Norden, am Rückgang der Permafrost-Gebiete und an einer Zunahme von sommerlichen Hitze- und Dürreperioden in den gemäßigten Zonen.

Im Hinblick auf die Zeitskala der nachgewiesenen Korrelation der Treibhausgaskonzentration mit der globalen mittleren Temperatur sind allerdings 140 Jahre ein *extrem kurzer* Zeitraum. Verlässlicher ist, dass die theoretische Erwartung mit den empirischen Daten übereinstimmt. In den letzten 400 000 Jahren, über die sich bislang die voll ausgewerteten Messungen aus Eisbohrkernen erstrecken, war die CO_2–Konzentration jedoch *nie* auch nur annähernd so groß wie jetzt;[13] und dies ist eine *extrem schnelle* Klimaveränderung. Damit bin ich bei dem angelangt, was wir nach dem gegenwärtigen Forschungsstand leider *nicht sicher* wissen: Was bedeutet dies *genau*? Wie dramatisch ist der anthropogene Treibhauseffekt, was genau sind seine Folgen? Wie stark ist der Effekt *quantitativ*? Wie wirkt er sich *lokal* aus in Form von einer Zunahme von Hitze- und Dürreperioden, Wirbelstürmen, Flutkatastrophen, einem Anstieg des Meeresspiegels, der Zerstörung von Biotopen etc.? Wie besorgt müssen wir sein? Welche Risiken lädt sich die Menschheit mit dem weiteren Anstieg der CO_2–Konzentration auf?

[12] Latif 2004, S. 16 f.
[13] Durch die EPICA-Messungen hat sich dieser Zeitraum fast verdoppelt, was das Bild bezüglich des anthropogenen Treibhauseffekt höchstens noch dramatischer macht; vgl. EPICA (2004) und den Beitrag von T.Stocker in diesem Band.

Die Modellrechnungen geben hierzu keine eindeutige Auskunft. Die Wirkung einer CO_2-Verdopplung wird seit gut 25 Jahren auf einen Temperaturanstieg von 1.5-4.5 °C geschätzt. Diese Unsicherheitsspanne wurde erhärtet, aber nicht vermindert. Im Gegenteil gibt es auch apokalyptische Modellrechnungen, mit denen sich die Spanne auf bis zu 11 °C vergrößert. Solche Katastrophen-Szenarien gelten in der Zunft aber als ziemlich unrealistisch – auch wenn der Umweltminister damit spektakulären Alarmismus betreibt.[14] Die Modellrechnungen sind extrem komplex. Sie enthalten viele Faktoren: verschiedene Typen der Emission von Treibhausgasen und ihre Absorption in der Atmosphäre; Wolken; Sonnenaktivität; Vulkanausbrüche; Aerosole (Schwebepartikel); Mechanismen der Wechselwirkung der Treibhausgase mit Land und Ozeanen, die den CO_2-Anstieg teilweise kompensieren, die „Senken“. Schon die Einbeziehung von Aerosolen ändert das Bild drastisch. Dabei ist vor allem der Effekt der „Senke“ Biosphäre ist noch nicht vollständig bekannt.

Sokrates sagte vor gut 2400 Jahren als weiser Denker, „Ich weiß, dass ich nichts weiß“; und weise Klimaforscher geben in bezug auf die eben angesprochenen Punkte zu, dass sie *nicht genug* wissen – wenn sie sich auch *alle* einig sind, dass der anthropogene Treibhauseffekt existiert und mittlere Erdtemperatur signifikant erhöht. Wie groß er quantitativ ist und was seine exakten Folgen sind, kann jedoch gegenwärtig niemand sagen. Alle apokalyptischen Szenarios, die man auf der Basis von Klimamodellen und Langzeitmessungen ausmalt, sind Ausdruck einer ernsten, wissenschaftlich begründeten Besorgnis. Dennoch sind sie unverantwortlich, soweit ihnen die präzise quantitative Grundlage fehlt. Diese ist jedoch nur begrenzt vorhanden. Und dies liegt am statistischen Charakter unseres Wissens über das Klima sowie an der extrem schmalen Datenbasis, die relativ zur Erdgeschichte mit den verfügbaren präzisen Klimamessungen aus wenigen Generationen vorliegt.[15]

Die empirischen Daten zum Klima, d.h. zum langfristigen durchschnittlichen Wetterverlauf, beruhen auf der statistischen Auswertung lokaler Einzelmessungen. Jede solche Messreihe wird unter bestimmten Wetterbedingungen gewonnen, von denen man nicht mit letzter Sicherheit weiß, wie repräsentativ sie eigentlich sind. Hier stellt sich ein zusätzliches Problem, nämlich die Frage, inwieweit nicht nur die Modellrechnungen modellabhängig sind, sondern auch die statistische Auswertung der Messdaten.

[14] FAZ vom 18.3.2005, 40.
[15] Am sichersten sind die Daten aus Eisbohrkernen der Antarktis, die sich nach den neuesten, auf diesem Symposium vorgestellten Daten zeitlich fast verdoppelt haben; vgl. Anm. 13.

An diesem Punkt entzündet sich derzeit ein erbitterter Streit um diejenige Kurve, die in den letzten Jahren als eindrucksvollster Beleg für den Temperaturanstieg der letzten Jahrzehnte galt – die sogenannte „Hockeyschläger-Kurve“ von Mann et al. aus dem Jahre 1998, die auf der Analyse von Baumringen in Nordamerika beruht.[16] Das Kurvendiagramm wurde in die Zusammenfassung des IPCC-Reports 2001 aufgenommen und bekam fast den Rang einer Ikone. Es ist in jedem neueren Lehrbuch der Klimaforschung zu finden. Soziologisch interessant ist, dass die Signifikanz des Kurvenverlaufs derzeit von *mehreren* Seiten angegriffen wird – teils von renommierten Klimaforschern, die den allgemeinen Konsens der Klimaforschung teilen, aber vor Überinterpretation der Ergebnisse warnen; und teils von Außenseitern, die es erst durch hartnäckiges Recherchieren und wissenschaftlichen Sachverstand geschafft haben, nun in den wissenschaftlichen *Journals* zu publizieren. Nicht weniger interessant, aber ziemlich traurig ist, was im Zuge dieser Debatte herauskommt: Um Ergebnisse zu publizieren, ist es offenbar in der Klimaforschung bislang nicht erforderlich, die Daten und Analysemethoden so zu dokumentieren, dass sie von außen überprüfbar sind. Der aktuelle Bericht in der populärwissenschaftlichen Zeitschrift *Technology Review*[17] erweckt fast den Eindruck, dass sich solche Praxis der Nicht-Dokumentation in gefährlicher Nähe zu Fällen wissenschaftlichen Fehlverhaltens befindet. In der Klimaforschung scheint es ein schwieriger Drahtseilakt zu sein, die Balance zwischen Seriosität und Medienwirksamkeit zu wahren – dies ist das Mindeste, was hierzu wohl zu sagen ist. Die interviewten Klimaforscher beklagen in der Reaktion auf diese Ereignisse die Politisierung der Forschungsergebnisse und fordern einen unvoreingenommen, sachlichen Umgang mit Daten, Modellen und gegenwärtigen Unsicherheiten. Dabei betonen sie allerdings allesamt übereinstimmend, dass an der zentralen Erkenntnis, nämlich an der Existenz des anthropogenen Treibhauseffekts, nicht zu rütteln ist. Das Schlimme ist, dass unsere Medien-bestimmte Öffentlichkeit mit solchen differenzierten Äußerungen kaum noch umgehen kann.

5. Optionen

All dies lässt nur eine Schlussfolgerung zu: Wir handeln in bezug auf das Klima und unseren Einfluss darauf nach wie vor unter Bedingungen der extremen Unsicherheit. *Handeln* aber müssen wir, d.h. Energie verbrauchen und dabei *mehr oder weniger* CO_2 freisetzen. Die Bedrohung, die uns daraus erwächst, nämlich das Risiko durch den anthropogenen Treibhauseffekt, ist abstrakt, indirekt und quantitativ unsicher; und sie hat nur statistische Bedeutung. Statistische Bedeutung heißt aber: sie hat *keinerlei direkte* kausale Relevanz für den Einzelfall, für extreme Wetterereignisse wie Flutwellen und Hitzerekorde, durch die jemand zu Schaden kommen kann. Die Katastrophenszenarien, die immer wieder entworfen wurden und werden, *wirken konkret* – aber sie sind *nicht realistisch*. Die ökonomischen Handlungszwänge, unter denen wir alle stehen, sind demgegenüber *sehr* real und konkret. In dieser Situation gibt es *keine sichere Prognose*, welches Handeln richtig ist, und *keine Garantie*, dass selbst das Handeln aller nach bestem Wissen und Gewissen zu optimalen Lösungen führt. Das menschliche Leben ist und bleibt risikobehaftet und gefährdet – diese *philosophische* Schlussfolgerung ist in jedem Fall aus der Klimadebatte zu ziehen. Wir können unser Bestes tun; aber es kann schief gehen. Ungebremstes ökonomisches Wachstum kann grundsätzlich zum „optimalen Weltuntergang“ führen – nämlich optimale und effiziente Wachstumspfade verfolgen, „in denen der langfristige Nutzen dauerhaft Null wird“, wie die Greifswalder Philosophen Ott und Döring in ihrem Buch über Nachhaltigkeit provokativ hervorheben.[18] Umgekehrt könnten allzu drastische Umweltauflagen in punkto Energieverbrauch zu ökonomischen und sozialen Wirren führen, die niemand wollen kann. Vielleicht gibt es aber auch Mittelwege der Bündelung und Abstimmung von Ökonomie und Klimaschutz. In diesem Zusammenhang finde ich z.B. den Vorschlag des Würzburger Physiker-Kollegen Kümmel interessant, der fordert, die Energie zu besteuern anstelle der Arbeit, die in der postindustriellen Gesellschaft schwindet.[19] Dies mag strittig sein. In jedem Fall aber gilt: Um gangbare Mittelwege zu finden, benötigen wir *viel* mehr Forschung im Schnittfeld von Klimavorsorge und Ökonomie, als wir derzeit haben.

Solange wir hier zuwenig wissen, bleiben nur zwei Optionen: (1) Wir betreiben „business as usual“, d.h. Ökonomie kommt vor Klimaschutz, und wir setzen auf das *Prinzip Hoffnung* anstelle des Prinzips Verantwortung. Oder aber: (2) Wir betreiben Risikominderung, d.h. Klimaschutz kommt vor Ökonomie; d.h. wir versuchen, die *Risiken zu streuen*. Das Prinzip, die Risiken zu streuen, erscheint mir als der *einzige* Weg zu Handeln unter den hier gegebenen Bedingungen der Unsicherheit. Hierzu würde es allerdings *auch* gehören, den langjährigen DPG-Vorschlag aufzugreifen, den CO_2-Ausstoß durch Kernenergie zu mindern – und damit globale durch *eher* lokale Risiken zu ersetzen. (Nach den Modellrechnungen der Klimaforscher wirken sich die Folgen des Klimawandels, der nach wie vor weitgehend durch die Industrienationen verursacht wird, tendenziell vor allem in den Armutsgebieten der Erde aus: noch mehr Dürre in der Sahelzone, noch mehr Überschwemmungen in Bangladesh etc. Die Folgen der Produktion von Kernenergie müssen wir dagegen *selbst* tragen ... solange wir es nicht schaffen, auch noch unsere radioaktiven Abfälle den Armen in der Dritten Welt zu verkaufen...) In der Umweltpolitik ist die unideologische Diskussion um diesen Punkt derzeit allerdings leider alles andere als populär – während gleichzeitig Katastrophenszenarien bemüht werden.[20] Auf das Prinzip Verantwortung anstelle des Prinzips Hoffnung zu setzen, beinhaltet aber zunächst, beim Energieverbrauch *alle* Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung und zum Sparen zu nutzen. In einer globalisierten Welt, in der billiger Strom als ökonomische Tugend gilt, geht dies allerdings nur begrenzt.

Nach alledem sollte klar sein, dass nicht *die Menschheit* abstrakte, kollektive Verantwortung für das Klima tragen kann. Es ist *jede/r von uns*, der in seinem/ihrem eigenen Bereich die ei-

[16] Mann et al. 1998 sowie McIntyre and McKitrick 2005.
[17] Crok 2005.
[18] Ott und Döring 2004, S. 108.
[19] Kümmel 1998, 94 ff.
[20] Siehe oben Fußnote 13.

gene konkrete Verantwortung trägt. Diese Verantwortung bezieht sich *grundsätzlich* auf Risikominderung; und *konkret* auf Energiesparen, Effizienz, auf die Suche nach intelligenten, ökonomiefreundlichen Lösungen für regenerative Energien. Darüber hinaus sollte sich jeder von uns für nicht-ideologische Debatten um Klima und Energie, Ökonomie und Umweltrecht verantwortlich fühlen. Solche Debatten sollten im Schnittfeld von Wissenschaft, Öffentlichkeit und Politik *so* zustande kommen, dass sich diese drei Instanzen der Beurteilung unserer kollektiven Praxis des Energieverbrauchs *nicht* heillos vermischen.

Literatur

Bayertz (1995): K.Bayertz, Eine kurze Geschichte der Herkunft der Verantwortung. In: K.Bayertz (Hrsg.), Verantortung. Prinzip oder Problem? Darmstadt: Wiss. Buchges., 3-71.

Crok (2005): M.Crok, Klimaforschung. Risse im Klima-Konsens. In: Technology Review, Dt. Ausgabe, März 2005, 38-52.

Cubasch und Kasang (2000): U.Cubasch und D.Kasang, Anthropogener Klimawandel. Gotha und Stuttgart: Klett-Perthes.

EPICA (2004): EPICA community members, Eight glacial cycles from an Antarctic ice core, in: Nature 429 (2004), 623-628.

Hooke (1992): C.A. Hooker, Responsibility, ethics and nature, in: D.E.Cooper and J.A.Palmer (eds.), *The Environment in Question. Ethics and Global Issues.* London and New York: Routledge.

Houghton (2004): J.T.Houghton, Global Warming. Third edition, Cambridge University Press.

Jonas (1979): H.Jonas, Das Prinzip Verantwortung. Versuch einer Ethik für die technologische Zivilisation. Frankfurt am Main: Insel.

Kümmel (1998): R.Kümmel, Energie und Kreativität. Stuttgart und Leipzig. Teubner 1998.

Latif (2003): M.Latif, Hitzerekorde und Jahrhundertflut. Herausforderung Klimawandel. Was wir jetzt tun müssen. München: Wilhelm Heyne Verlag.

Latif (2004): M.Latif, Klima. Frankfurt am Main: Fischer Taschenbuch Verlag.

Lenk und Maring (1995): H.Lenk und M.Maring, Wer soll Verantwortung tragen? Probleme der Verantwortungsverteilung in komplexen (soziotechnischen-sozioökonomischen) Systemen. In: K.Bayertz (Hrsg.), Verantortung. Prinzip oder Problem? Darmstadt: Wiss. Buchges., 241-286.

Lübbe (1998): W. Lübbe, Verantwortung in komplexen kulturellen Prozessen. Freiburg/München: Alber.

Mann et al. (1998): M.E.Mann, R.S. Bradley and M.K.Hughes, Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. In: Nature 392, 779-787.

McIntyre and McKitrick (2005): S. McIntyre and R.McKitrick, Hockey sticks, principal components, and spurious significance. In: Geophysical Letters 32: 10.1029/2004GL021750.

Ott und Döring (2004): K.Ott und R.Döring, Theorie und Praxis starker Nachhaltigkeit. Marburg: Metropolis.

Revelle und Suess (1957): R.Revelle und H.E.Suess, in: TELLUS 9 (1957), S. 18.

Weingart et al. (2002): P. Weingart, A. Engels und P.Pansegrau, Von der Hypothese zur Katastrophe. Der anthropogene Klimawandel im Diskurs zwischen Wissenschaft, Politik und Massenmedien. Unter Mitarbeit von Tillmann Hornschuh. Opladen: Leske und Budrich.

KLIMAWANDEL IM INDUSTRIEZEITALTER – BEOBACHTUNGSINDIZIEN UND URSACHEN

Christian-D. Schönwiese
Institut für Atmosphäre und Umwelt
der Universität Frankfurt a.M

1. Einführung: Motivation und Hintergrund

Der globale Klimawandel findet nicht nur in der Wissenschaft, sondern auch in der Öffentlichkeit große Beachtung. Nicht ohne Grund, denn:

- Die Menschheit und mit ihr alles Leben auf der Erde (Biosphäre) ist hochgradig von der Gunst des Klimas abhängig. Daher kann es uns nicht gleichgültig sein, was mit unserem Klima geschieht.
- Die Menschheit ist mehr und mehr dazu übergegangen, das Klima auch selbst zu beeinflussen. Daraus erwächst uns eine besondere Verantwortung.

Das erste Faktum, die Klimaabhängigkeit, hat besonders dann gravierende Folgen, wenn es zu einem systematischen Klimawandel aufgrund relativ langfristiger Trends kommt und wenn Extremereignisse häufiger bzw. intensiver bzw. beides werden. Der Gletscherrückgang in den Alpen ist ein zwar regionales, aber deutliches Indiz für einen relativ langfristigen Klimatrend und seine Folgen. Nach Häberli et al. (2001) haben die Alpengletscher seit 1850 ungefähr die Hälfte ihres Volumens verloren, was zum weitaus überwiegenden Teil durch eine systematische Erwärmung in dieser Zeit erklärt wird. Der Hitzesommer 2003 und das Elbehochwasser im Sommer 2002 sind Beispiele dafür, dass auch Deutschland von drastischen Extremereignissen nicht verschont bleibt.

Das zweite Faktum, die anthropogene Klimabeeinflussung, ist beispielsweise im Fall des Stadtklimas, das sich deutlich von Klima des Umlandes unterscheidet, offensichtlich (z.B. Fezer 1995). Die neolithische Revolution hat sogar schon seit Jahrtausenden den Mensch zum Klimafaktor werden lassen, nämlich durch die Umwandlung von Natur- in Kulturlandschaften, dabei insbesondere durch regional ausgedehnte Waldrodungen, weil dadurch der Stoff- und Energiehaushalt des Systems Erdoberfläche-Atmosphäre verändert wird. Besondere Beachtung aber findet mit Recht der Klimawandel des Industriezeitalters, weil in dieser Zeit der Mensch global und in bisher ungeahnter Intensität und Schnelligkeit auf das Klima Einfluss nimmt (vgl. dazu auch Beitrag Schellnhuber in diesem Band).

Bevor darauf eingegangen wird, ist es jedoch wichtig, das Problem des Klimawandels im Kontext der vorindustriellen Klimaänderungen zu sehen (IPCC 2001, Schönwiese 1995, 2003). Denn Klimaänderungen gibt es, seit die Erde existiert, zum Teil in sehr drastischem

Ausmaß (vgl. z.B. Beitrag Stocker in diesem Band). Jedoch spricht vieles dafür, dass das Klima unserer Erde nach dem letzten Glazial (Würm-Eiszeit) in einen relativ stabilen Zustand übergegangen ist. Zwar sind die indirekten Rekonstruktionen der Paläoklimatologie mit deutlich größeren Unsicherheiten behaftet als die direkten Klima-Messdaten des Industriezeitalters. Aber dennoch kann man davon ausgehen, dass der Temperaturanstieg des Industriezeitalters („global warming“), d.h. seit etwa 1800/1850, im Vergleich mit den ein bis zwei Jahrtausenden davor, als ein ganz besonderer Vorgang anzusehen ist; siehe Abb. 1 und 2.

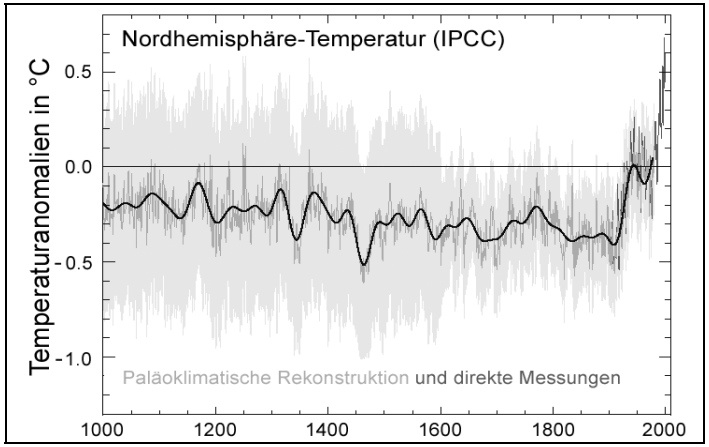

Abb. 1: Jährliche Anomalien (d.h. relative Variationen bezüglich 1961-1990) der nordhemisphärisch gemittelten bodennahen Lufttemperatur in den letzten rund 1000 Jahren (1000-1980; nach Mann et al., 1999), abgeschätzt aufgrund verschiedener indirekter (paläoklimatologischer) Rekonstruktionsmethoden, blau, zugehörige 30-jährige Glättung, schwarz, und Vergleich mit den entsprechenden, auf direkten Messungen beruhenden Daten 1856-1998, rot (mit bisherigem Maximum im Jahr 1998). Die Grauzone gibt den Unsicherheitsbereich an (nach IPCC, 2001, verändert).

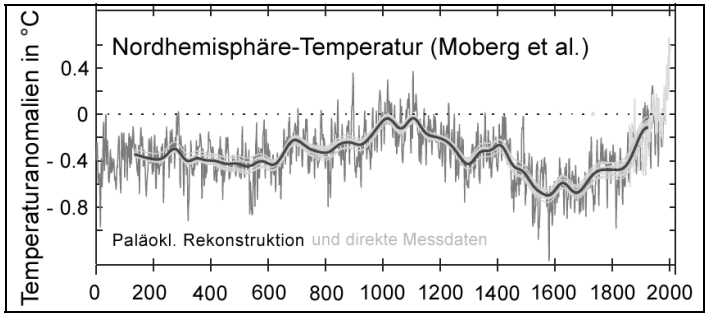

Abb. 2: Ähnlich Abb. 1, jedoch neuere alternative Rekonstruktion (nach Moberg et al. 2005, verändert), welche die letzten beiden Jahrtausende abdeckt. Dabei kommen das warme Klima des Spätmittelalters (ca. 900-1200) und die kälteste Epoche der darauf folgenden sog. Kleinen Eiszeit (ca. 1550-1850) deutlicher zum Ausdruck. Es bleibt aber auch in dieser Perspektive bei der sehr bemerkenswerten Erwärmung seit ca. 1850.

2. Beobachtungsindizien: Variationen und Trends

Es liegt daher nahe, sich diesen jüngsten Temperaturanstieg genauer und global anzusehen, was für die Zeit ab 1856 nunmehr aufgrund direkter Messdaten mit wesentlich größerer Genauigkeit möglich ist, siehe Abb. 3. Dabei sind nicht nur der genannte Erwärmungstrend und der bisherige Rekordwert des Jahres 1998 wieder zu erkennen, sondern auch überlagerte Fluktuationen, die übrigens auf der Nordhemisphäre deutlich ausgeprägter sind als auf der Südhemisphäre.

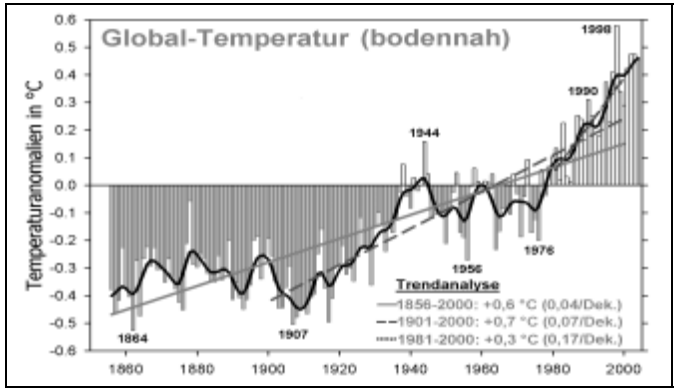

Abb. 3: Jährliche Anomalien (Referenzintervall wiederum 1961-1990) der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur 1856-2004, basierend auf direkten Messungen (Land- und Ozeangebiete), Säulen, 10-jährige Glättung, schwarze Kurve, und lineare Trends (Datenquelle: Jones et al. 1999, 2005, bearbeitet).

Der lineare Trend 1856-2000 beträgt rund 0,6 °C, 1900-2000 ca. 0,7 °C 1981-2000 ca. 0,3 °C, was auf eine Trendverstärkung hinweist (vgl. Dekadenwerte in Abb. 3). Andererseits war der Erwärmungstrend ungefähr in der Zeit 1945-1975 unterbrochen, nordhemisphärisch sogar durch eine deutliche Abkühlung ersetzt.

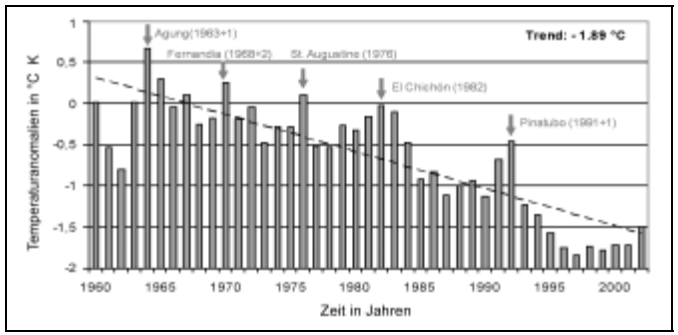

Abb. 4: Jährliche Anomalien (Referenzintervall 1958-1977) der global gemittelten Temperatur der Stratosphäre 1960-2003, Schicht 16-24 km Höhe, mit Angabe einiger explosiver Vulkanausbrüche (Datenquelle: Angell 2005, ergänzt und verändert).

Im Rahmen der Ursachendiskussion (Abschnitt 4) ist zudem auch der Blick in die Stratosphäre von Bedeutung: Dort hat die Temperatur seit 1960 (wesentlich weiter zurück reichen leider die mit Hilfe von Ballon-gestützten Radiosonden erhobenen Messdaten nicht) systematisch abgenommen, und zwar mit einem wesentlich höheren Trendwert als bei der bodennahen Erwärmung.

Die Interpretation der beobachteten Klimaänderungen wird nun allerdings dadurch erschwert, dass sie außer ihrer zeitlichen Struktur auch stark ausgeprägte räumliche Strukturen aufweisen, somit regional sehr unterschiedlich ablaufen. Betrachtet man lediglich die Temperaturtrends 1891-1990 (ohne die überlagerten Fluktuationen und Anomalien), jedoch in räumlicher Differenzierung, siehe Abb. 5, so ergibt sich ein sehr kompliziertes Bild. Zwar überwiegt offenbar die Erwärmung; sie geht aber mit regionalen Abkühlungen, beispielsweise im Bereich des Nordatlantiks oder in Zentralafrika, Hand in Hand. Wir haben es daher nicht nur mit zeitlichen, sondern auch mit räumlichen Strukturen des Klimawandels zu tun. Und nicht nur das: Diese Strukturen sind jahreszeitlich unterschiedlich und zeitlich nicht konstant (Schönwiese und Rapp 1997; Rapp 2000; Schönwiese 2003).

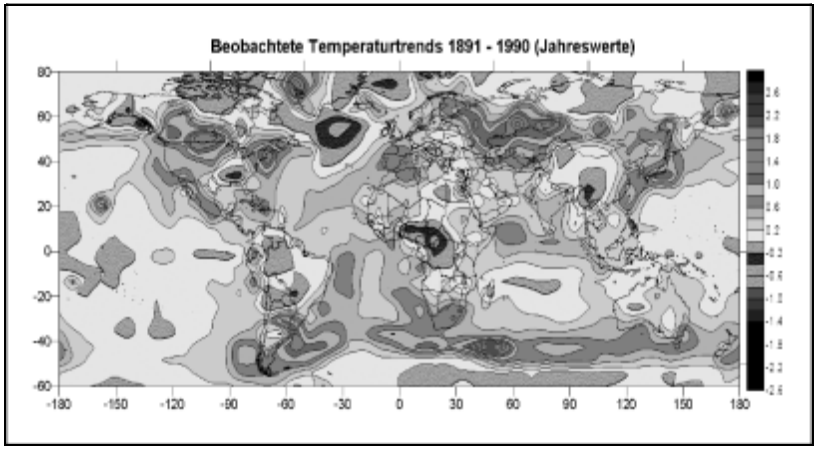

Abb. 5. Lineare Trends 1891 - 1990 der Jahreswerte der bodennahen Lufttemperatur in °C, Globalanalyse auf der Grundlage eines 5° x 5° - Gitterpunktdatensatzes (Datenquelle: Jones et al., 1999, bearbeitet).

Und beim in vielerlei Hinsicht im Vergleich mit der Temperatur wichtigeren Klimaelement *Niederschlag* kommen noch die wesentlich größere Messfehlerbelastung und geringere räumliche Repräsentanz hinzu (Schönwiese und Rapp 1997). Trotzdem soll in Abb. 6 auch für den Niederschlag die (sehr grobe) global-räumliche Struktur der säkularen (in diesem Fall 1900-1999) Trends angegeben werden. Dabei stehen deutlichen Niederschlagszunahmen u. a. in großen Teilen Nordamerikas, Skandinaviens, Indiens und Australiens (auch im äußersten Südosten Südamerikas) gegenläufige Trends insbesondere in Chile, der afrikanischen Sahel-

Zone, dem Mittelmeergebiet, sowie Teilen Südafrikas und Südostasiens gegenüber. Auch dieses Trendbild ist aber zeitlich nicht stabil; so hat beispielsweise im Sahel (Nordafrika) in den letzten Jahrzehnten der Niederschlag wieder zugenommen. Genauere Analysen für Europa (Schönwiese und Rapp 1997) zeigen die stärkste Zunahme im Jahresniederschlag Südskandinaviens (bis zu ca. 30 % in der Zeit 1891-1990) und die stärkste Abnahme im Winterniederschlag des östlichen Mittelmeergebiets (bis zu ca. 50 % 1961-1990).

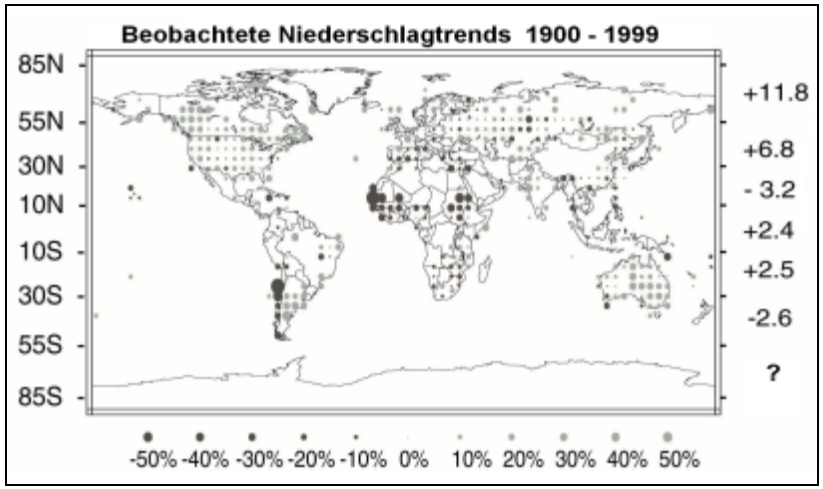

Abb. 6. Prozentuale Trends 1900-1999 der Jahresniederschlagssummen, Globalanalyse (IPCC, 2001); die Zahlen am rechten Rand geben die Werte für die markierten Breitenkreisbänder an.

Deutschland liegt nach Abb. 5 und 6 in einer Region, die durch eine relativ mäßige Zunahme von Temperatur und Niederschlag gekennzeichnet ist. Differenziert man nach den Jahreszeiten, so erhält man die in Tab. 1 zusammengefassten Befunde.

Klimaelement	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Temperatur, 1901 – 2000	+ 0,8 °C	+ 1,0 °C	+ 1,1 °C	+ 0,8 °C	+ 1,0 °C
1981 – 2000	+ 1,3 °C	+ 0,7 °C	*- 0,1 °C*	+ 2,3 °C	+ 1,1 °C
Niederschlag, 1901 – 2000	+ 13 %	*- 3 %*	+ 9 %	+ 19 %	+ 9 %
1971 – 2000	+ 13 %	+ 4 %	+ 14 %	+ 34 %	+ 16 %

Tab. 1: Übersicht der beobachteten Temperatur- (bodennah) und Niederschlagtrends in Deutschland (Quellen: Rapp 2000; Schönwiese 2003, ergänzt).

Säkular (1901-2000) ist die Erwärmung über alle Jahreszeiten ungefähr gleich verteilt, mit einem Anstieg der Jahresmittelwerte, der etwas höher als im globalen Mittel ist (1,0 °C gegenüber 0,7 °C). In den letzten Jahrzehnten hat sich dann vor allem die winterliche Erwärmung verstärkt, während die herbstliche zum Stillstand gekommen ist. Beim Niederschlag ist

säkular die größte Zunahme im Winter feststellbar; sie hat sich in den letzten Jahrzehnten noch enorm verstärkt. Eine Abnahme zeigt sich nur im Sommer, und da auch nur mäßig und nicht mehr in den letzten Jahrzehnten. Da gerade im Sommer konvektive und somit relativ kleinräumige Niederschlagsereignisse dominieren, müssen diese Trends sehr vorsichtig interpretiert werden, da es möglich ist, dass ein nach wie vor abnehmender Niederschlagstrend durch häufigere extreme Starkniederschläge maskiert bzw. sogar im Vorzeichen verändert wird.

3. Beobachtungsindizien: Extremereignisse

Klimawandel kann sich nicht nur in Form relativ langfristiger Trends, sondern auch durch Änderungen in der Häufigkeit/Intensität von Extremereignissen äußern. Dabei haben der extreme Hitzesommer 2003 und die Überschwemmungen der Elbe-Region im Sommer 2002 gezeigt, dass auch Deutschland von solchen Extremereignissen nicht verschont bleibt. In Zeitreihenform fallen sie durch eine relativ hohe Abweichung vom Mittelwert bzw. Trend auf. In Abb. 7, die die Sommerwerte (Mittel aus Juni, Juli und August) der bodennahen Lufttemperatur und des Niederschlags in Deutschland seit 1901 gegenüberstellt, tritt dabei zunächst der extrem hohe Temperaturwert im Jahr 2003 hervor (obere Kurve, ganz rechts).

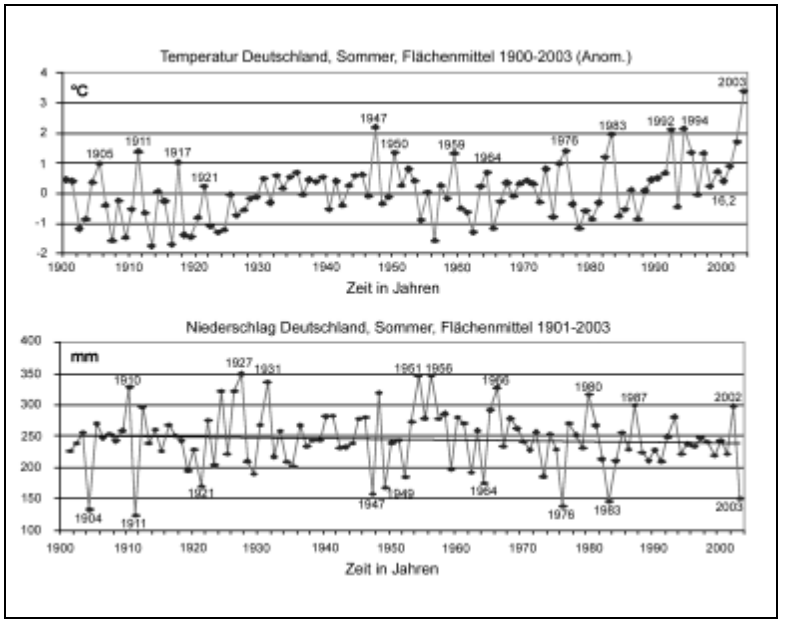

Abb. 7: Vergleich der Sommer-Zeitreihen von bodennaher Lufttemperatur (Anomalien, oben) und Niederschlag (unten), Flächenmittel Deutschland, 1900/1901-2003, mit Angabe einiger Jahre, in denen relative Extremwerte eingetreten sind, und linearen Trends (Datenquelle: DWD; bearbeitet).

Tatsächlich ist der Sommer 2003 in Deutschland sogar seit 1761 der wärmste gewesen (Schönwiese et al. 2004), mit einer Anomalie von 3,4 °C über dem Mittelwert 1961-1990 (16,2 °C), was dem 3,8-fachen Wert der Standardabweichung entspricht. Es handelte sich um ein Europa-weites Phänomen mit Schwerpunkt in Südfrankreich/Schweiz, das 27000 Tote (Deutschland 3500 Tote) und volkswirtschaftliche Schäden in Höhe von 13 Mrd. EURO zur Folge hatte (Schär et al. 2004, MüRück 2004). Berechnet man für Deutschland die Wahrscheinlichkeit, dass ein solches Ereignis eintritt, vgl. Abb. 8, so ergibt sich bis ungefähr 1960/70 fast Unmöglichkeit ($p < 0{,}0001$), aber ab dieser Zeit ein Anstieg um mehr als den Faktor 20 ($p=0{,}0022$ im Jahr 2003). Das bedeutet, dass es sich zwar zur Zeit des Eintretens immer noch um ein sehr seltenes Extremereignis gehandelt hat (sog. Jährlichkeit 1/0,0022 _ ≈455 Jahre); aber sollte sich dieser Wahrscheinlichkeitsanstieg in Zukunft in ähnlicher Weise fortsetzen, dann kann der Hitzesommer 2003 im Jahr 2100 fast zur Regel geworden sein. Tatsächlich weisen Klimamodellrechnungen, die auf Szenarien menschlicher Einflussname beruhen (vgl. unten, Abschnitt 4), sehr konkret auf diese Möglichkeit hin (Schär et al. 2004).

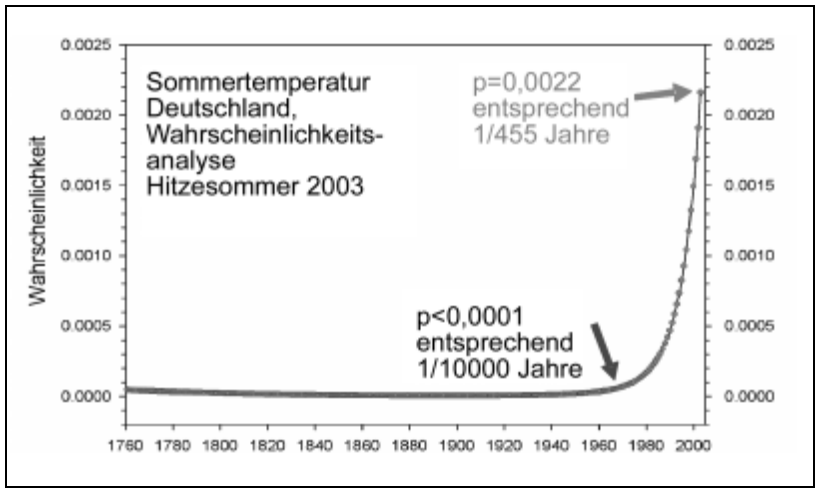

Abb. 8: Analyse der Sommertemperatur Deutschland 1761-2003 hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit, dass ein Extremereignis wie der Hitzesommer 2003 eintritt; vgl. Text (nach Schönwiese et al. 2004, Berechnung Trömel).

Beim Niederschlag, wo extreme Ereignisse in Form von Dürren oder Überschwemmungen besonders folgenschwer sind, deutet sich weltweit (IPCC 2001) bzw. für Deutschland (Trömel 2005, Jonas et al. 2005) an, dass überall dort, wo er zunimmt, dies auch meist Hand in Hand mit häufigeren Extremereignissen geht. Die winterlichen *Hochwässer* im Rhein-Einzugsgebiet ordnen sich relativ gut in dieses Bild ein, weniger jedoch das Elbe-Hochwasser vom August 2002, weil die dortigen Pegelstände keinen systematischen Anstieg im Verlauf des Industriezeitalters erkennen lassen (Kleeberg 1996; Mudelsee et al. 2003).

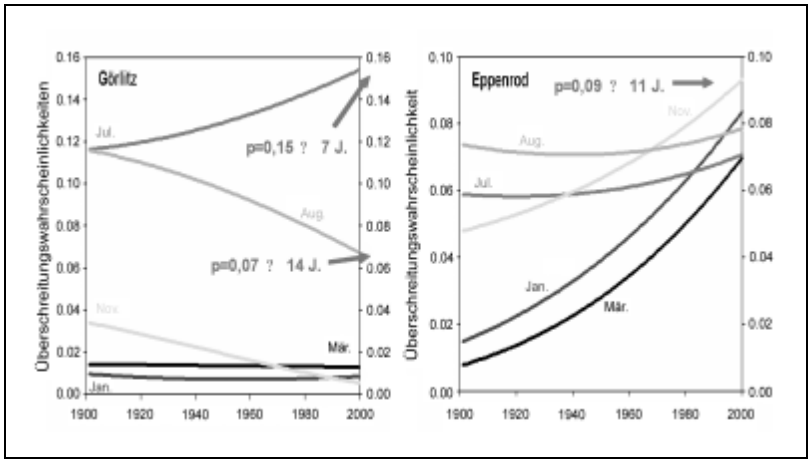

Abb. 9: Analyse des Niederschlags in ausgewählten Monaten hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit, das an den angegebenen Stationen extrem hohe Werte oberhalb des 95%-Perzentils auftreten (was in Görlitz ≥120 mm und in Eppenrod ≥ 130 mm bedeutet; vgl. Text; nach Trömel, 2005).

Wie differenziert das Eintreten von Niederschlagsereignissen in Deutschland (und anderswo) beurteilt werden muss, darauf weist exemplarisch Abb. 9 hin. Dort ist für eine ausgewählte ost- und westdeutsche Station (Görlitz und Eppenrod bei Limburg) und für einige ausgewählte Monate angegeben, wie sich die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten extrem hoher Monatssummen des Niederschlags entwickelt hat, und zwar mit Überschreitung des 95%-Perzentils, was für Görlitz ≥ 120 mm und für Eppenrod ≥ 130 mm bedeutet. Offenbar ist in Görlitz diese Wahrscheinlichkeit nur in den Sommermonaten erheblich, dabei aber im August abnehmend und im Juli zunehmend. Dagegen steigt sie in Eppenrod in allen Jahreszeiten an, besonders aber im größten Teil des hydrologischen Winterhalbjahrs (November-März), mit dem bemerkenswerten Effekt, dass dort die Wahrscheinlichkeit für Hochwässer in der Zeit November-Januar die früher dominierenden Sommerhochwässer abgelöst hat.

Bei Stürmen ist ein zeitlich bzw. räumlich einigermaßen einheitliches Trendverhalten gar nicht erkennbar (IPCC 2001). Allerdings ist, nun wieder global gesehen, die Versicherungs- und insbesondere Rückversicherungswirtschaft über den drastischen Anstieg witterungsbedingter Schäden alarmiert (MüRück 2000, 2004); vgl. Tab. 2. Obwohl, gerade bei den versicherten Schäden, auch die zunehmende Bebauung früherer Brachflächen und die damit verbundene Wertekonzentration in gefährdeten Gebieten eine große Rolle spielen, so ist doch nicht von der Hand zu weisen, dass weltweit gesehen extreme Witterungsereignisse zugenommen haben.

Information	A 1960-1969	B 1970-1979	C 1980-1989	D 1990-1999	Faktor D:A
Anzahl	27	47	63	91	3,4
Volkswirt. Schäden	76,7	140,6	217,3	670,4	8,7
Versicherte Schäden	6,8	13,1	27,4	126,0	20,3

Ergänzung: Ereignisklassen 1980-2003

Ereignisklasse	a	b
Erdbeben	22 %	10 %
Stürme	32 %	73 %
Überschwemmungen	30 %	10 %
Sonstiges	16 %	7 %

a = volkswirtschaftliche Schäden
b = versicherte Schäden
(Alle Schäden in Werten von 2003)

Tab. 2: Trends großer Naturkatastrophen 1960-1999 und Schäden in Mrd. US $ (inflationsbereinigt; Quelle: MüRück 2000, 2004)

4. Ursachen: Natürliche Faktoren und menschliche Einflüsse

Träger der Klimaprozesse und somit der Ursachen des Klimawandels ist das Klimasystem (IPCC 2001, Schönwiese 2003). Es besteht aus den Komponenten Atmosphäre, Hydrosphäre (Salzwasser des Ozeans und Süßwasser der Kontinente), Kryosphäre (Land- und Meereis), Pedo-/Lithosphäre (Boden und Gesteine, somit feste Erdoberfläche) und Biosphäre (insbesondere Vegetation). Innerhalb und zwischen diesen Komponenten gibt es eine Vielzahl von Wechselwirkungen. Davon sind die sog. externen Einflüsse zu unterscheiden. Beispiele für interne Wechselwirkungen sind alle Vorgänge der atmosphärischen und ozeanischen Zirkulation, dabei als besonders prominentes Teilbeispiel der ENSO-Mechanismus, der aus einem ozeanischen Anteil, dem El Niño-Phänomen EN (das sich in episodischen Erwärmungen der tropischen Ozeane äußert, insbesondere des tropischen Ostpazifiks), und einem atmosphärischen Anteil, der sog. Südlichen (d.h. Südhemisphäre) (Luftdruck-) Oszillation SO besteht. Beispiele für externe Einflüsse, die ohne Wechselwirkungen definiert sind (obwohl das im Detail problematisch sein kann), sind die Sonnenaktivität, der Vulkanismus und der Mensch. Allerdings werden auch solche Einflüsse immer durch interne Wechselwirkungen des Klimasystems modifiziert. Eine allerdings nur für Europa bedeutsame interne Wechselwirkung ist die Nordatlantik-Oszillation (NAO), die anhand der Luftdruckdifferenz zwischen dem Gebiet relativen hohen Luftdrucks bei den Azoren und relativ tiefen Luftdrucks bei Island beschrieben wird (Wanner et al. 2001). Ist diese Luftdruckdifferenz (NAO-Index) relativ groß, werden im Winter relativ milde und auch feuchte Luftmassen nach West- und Mitteleuropa geführt (milder Winter; in den anderen Jahreszeiten ist der NAO-Einfluss weniger deutlich).

Der explosive Vulkanismus verändert durch Absorptions- und Streuprozesse, die auf die nach Eruptionen sich bildende stratosphärische Aerosolschicht zurückgehen, den Energiebilanz der Atmosphäre so, dass sich jeweils für ca. 1-3 Jahre in der Stratosphäre Erwärmungen (erhöhte Absorption von Strahlung) und bodennah Abkühlungen (verringerte solare Einstrahlung) ergeben, was deutlich in Abb. 4, aber auch in Abb. 3 erkennbar ist. Die Sonnenaktivität, die in diversen Zyklen abläuft (quasi- 11-, 22-, 80- usw. -jährig), geht weniger auf die sog. Sonnenflecken, als vielmehr auf Begleitphänomene wie Sonnenfackeln, Protuberanzen usw. zurück, die in Zeiten starker Sonnenaktivität die Sonneneinstrahlung auf die Erde im Promillebereich variieren lassen. (Details zu allen Ursachen siehe z.B. Schönwiese 2003).

Die Einflussname des Menschen besteht bekanntlich in der Anreicherung der Atmosphäre mit klimawirksamen Spurengasen (CO_2 usw., vgl. Anhang) als Folge der Nutzung fossiler Energieträger, Waldrodungen, Brennholznutzung (und Zementproduktion), was die untere Atmosphäre erwärmt und die Stratosphäre abkühlt: anthropogener Treibhauseffekt (vgl. wiederum Schönwiese 2003, IPCC 2001, Roedel 2000 und Beitrag Schellnhuber in diesem Band). Hinzu kommt die Bildung von Sulfataerosolen in der unteren Atmosphäre als Folge der Schwefeldioxid- (SO_2-) Emission, die im globalen Mittel im Gegensatz zu den Treibhaus-Gasen die untere Atmosphäre kühlt, die bereits genannte Umwandlung der Erdoberfläche, die u.a. zu einer Erhöhung der Albedo und somit zu einem Abkühlungseffekt führt und die Bildung von Kondensstreifen als Folge des Flugverkehrs, die den Treibhauseffekt verstärken.

Klimafaktor	**Strahlungs-Antrieb**	**Global-Signal**	**Deutschl.-Signal**	**Signalstruktur**
Treibhausgase *	(+) 2,2-2,7 Wm^{-2}	0,9-1,3 °C	c. 1,5 °C	progressiver Trend
Sulfatpartikel *	(-) 0,2-0,8 Wm^{-2}	0,2-0,4 °C	c. 0,6 °C	variabler Trend **
Landnutzung (Albedo)*	(-) 0-0,4 Wm^{-2}	insignifikant	insignifikant	sehr langfristiger Trend
Flugverkehr */***	(+) < 0,1 Wm^{-2}	< 0,1 °C	insignifikant	Trend, künftig stärker
Vulkanismus ****	(-) max. ≈3 Wm^{-2}	0,1-0,2 °C	c. 0,2 °C	episodisch, 1-3 Jahre
Sonnenaktivität	(+) 0,1-0,5 Wm^{-2}	0,1-0,2 °C	c. 0,6 °C	fluktuativ
El Niño	(+) —	0,2-0,3 °C	insignifikant	episodisch, Monate

Tab. 3: Störung des Strahlungsgleichgewichts (Strahlungsantriebe, global gemittelt, Troposphäre; ((+) = Erwärmung, (-) = Abkühlung)) durch die angegebenen Klimafaktoren, vorindustriell (ca. 1750/1800) bis heute (nach IPCC 2001, ergänzt, vgl. auch Schönwiese 2003), und entsprechende Temperatureffekte (Signale) nach statistischen Modellabschätzungen (neuronale Netze) für die bodennahe globale (1856-1998) bzw. deutsche (1865-1997) Mitteltemperatur (Quellen: Walter und Schönwiese, 1999, 2002; Walter, 2001).
*) anthropogen **) insbesondere ca. 1945 - 1975 ausgeprägt ***) vor allem Kondensstreifenwirkung
***) beim Pinatubo-Ausbruch, 1991: 2,4 Wm^{-2}; 1992: 3,2 Wm^{-2}; 1993: 0.9 Wm^{-2} (McCormick et al. 1995)

Um in dieses vielfältige Bild Ordnung zu bringen, kann versucht werden, zunächst einmal das Ausmaß der direkten Störung des Klimasystems durch die einzelnen Faktoren abzuschätzen.

Als grundlegende Orientierung dienen dabei die sog. *Strahlungsantriebe* (IPCC 2001), d.h. die Veränderung der Bilanz aus solarer Einstrahlung und terrestrischer Abstrahlung in der unteren Atmosphäre (Troposphäre, d.h. untere grob gerundet 10 km), meist in globaler Mittelung betrachtet. Eine Übersicht dazu bringt Tab. 3, wobei einer solchen Betrachtung jedoch nur die externen Einflüsse auf das Klimasystem zugänglich sind und die dabei benutzten energetischen Maßzahlen (Wm^{-2}) somit ohne Rückkopplungen gelten, d.h. ohne mögliche Verstärkungen bzw. Abschwächungen durch die internen Wechselwirkungen im Klimasystem (z.B. im Zusammenhang mit der Bewölkung).

Diese Vergleiche zeigen, dass der Emission klimawirksamer Spurengase durch menschliche Aktivitäten, dem anthropogenen Treibhauseffekt, und dem Vulkanismus das größte Gewicht zukommen. Der zeitliche Verlauf der Störung, die sog. Signalstruktur, ist jedoch ganz unterschiedlich: Während es sich beim anthropogenen Treibhauseffekt um einen langfristigen und progressiven Trend über das gesamte Industriezeitalter hin handelt, wirken sich explosive Vulkanausbrüche immer nur für wenige Jahre aus. Die Sonnenaktivität spielt wegen ihrer geringen Energetik und ihres fluktuativen Verhaltens nur eine geringe Rolle, was allerdings nur für die hier betrachtete zeitliche Größenordnung des Industriezeitalters gilt, nicht z.B. für die letzten Jahrtausende, wo der Einfluss der Sonnenaktivität häufig sogar als dominierend angesehen wird (Mann et al., 1999; Mann und Jones, 2003). Hinzu kommt, dass es seit ungefähr 1980 nachweislich keine Zunahme der Sonnenaktivität gegeben hat, somit in einer Zeit, in der die globale Erwärmung besonders stark ausgefallen ist (vgl. Abb. 3).

5. Verständnis der Ursachen: Klimamodelle

Um die Effekte nun im einzelnen zu verstehen und abzuschätzen, einschließlich der damit verbundenen Wechselwirkungen und Rückkopplungen im Klimasystem, wird eine ganze *Hierarchie von Modellen* eingesetzt, um in Form einer Kette folgende Fragen zu beantworten:

- Welche Anteile der (in Vergangenheit bzw. Zukunft) emittierten Treibhausgase verbleiben in der Atmosphäre und erhöhen dort deren Konzentration (→ Stoff-Flussmodelle)?
- Wie sieht die Klimareaktion darauf aus (→ Klimamodelle im engeren Sinn)?
- Welche ökologischen bzw. sozioökonomischen Folgen resultieren daraus (→ sog. Impaktmodelle)?

Und selbst bei den Klimamodellen im engeren Sinn – die übrigens, ganz im Gegensatz zu den Wettermodellen, nie atmosphärische Einzelkonstellationen vorhersagen können, sondern nur deren Statistik, zudem im Sinn einer bedingten Aussage (zur Unterscheidung spricht man daher nicht von Vorhersagen, sondern Projektionen) – gibt es äußerst unterschiedliche Ansätze: physikalische bzw. physikochemische Modelle (s. z.B. Cubasch und Kasang 2000, IPCC 2001) mit relativ geringem (z.B. Energiebilanzmodelle) bis zu sehr großem Aufwand (gekoppelte atmosphärisch-ozeanische Zirkulationsmodelle) sowie statistische Modelle (vor allem Regressionen und neuronale Netze), die der empirischen, d.h. allein auf Beobachtungsdaten basierenden Entwicklung ursächlicher Hypothesen dienen (Schönwiese, 2003).

Auf Einzelheiten kann hier nicht eingegangen werden. Hingewiesen sei aber auf einen zentralen Befund des letzten IPCC Reports (2001; vgl. auch Beitrag Schellnhuber in diesem Band), wonach insbesondere der global gemittelte bodennahe Temperaturanstieg seit etwa 1975/1980 (vgl. Abb. 3) durch natürliche Antriebe nicht erklärbar ist, sondern allein durch den anthropogenen Treibhauseffekt. In der Zeit ca. 1900-1945 haben vermutlich anthropogener Treibhauseffekt und Sonnenaktivität in die gleiche Richtung gewirkt; ca. 1945-1975 hat der anthropogene Sulfataerosoleffekt dominiert und dadurch den Erwärmungstrend unterbrochen (südhemisphärisch weniger deutlich, nordhemisphärisch durch eine deutliche Abkühlung). Vulkanismus und ENSO (in Deutschland auch die NAO) haben für die relativ kurzzeitigen Fluktuationen bzw. Anomalien gesorgt, die den langfristigen Klimatrends stets überlagert sind.

Doch gerade diese zeitliche „Feinstruktur“ der Klimavariationen wird durch solche physikalisch basierten Modelle nur unbefriedigend wiedergegeben. Der wesentlich geringere Aufwand empirisch-statistischer Modelle, lässt dagegen eine recht genaue Reproduktion der im Industriezeitalter beobachteten Gesamtvariationen zu, z.B. mit Hilfe des Prinzips der neuronalen Netze. Das Ergebnis einer solchen Berechnung ist in Abb. 10 wiedergegeben, wobei hier der anthropogene Treibhaus- und Sulfataerosoleffekt und als natürliche Klimafaktoren der Vulkanismus, die Sonnenaktivität und das El-Niño-Phänomen berücksichtigt sind (vgl. Tab. 3). Nachteil dieser Methode ist natürlich die unphysikalische Vorgehensweise, die wie bei der Korrelations- und Regressionsrechnung durch eine Art Ähnlichkeitsbetrachtung ersetzt ist. Andererseits beruht sie auf den beobachteten Fakten und erfordert wegen des relativ geringen Aufwands wenig Rechenzeit.

Besonders bemerkenswert aber ist, dass sich dadurch der physikalische Hintergrund der Strahlungsantriebe in den gefundenen Klimasignalen, vgl. wiederum Tab. 3, durchaus und sogar in guter quantitativer Näherung wieder finden lässt und das anthropogene Treibhaussignal des Industriezeitalters ganz ähnlich abgeschätzt wird wie bei den üblichen physikalisch basierten Klimamodellrechnungen, nämlich in der Größenordnung von 1 °C Erwärmung (TR in Abb. 10). Und bei Hinzunahme des anthropogenen „Kühleffektes“ durch die niederatmosphärischen Sulfatpartikel (Abb. 10, SU) ergibt sich auch auf diesem Weg eine Verminderung dieses Temperaturanstiegs (TR+SU) auf den beobachteten Trendwert von etwa 0,7 °C. Die Vermutung, dass die natürlichen Klimasignale demgegenüber relativ klein sowie episodisch bzw. fluktuativ sind, lässt sich bestätigen. Erwähnenswert ist schließlich, dass die auf diese Weise auch für Deutschland errechneten Klimasignale (vgl. wiederum Tab. 3) fast durchweg etwas höher sind als im globalen Mittel, wiederum in guter Übereinstimmung mit dem beobachteten Trend. Der anthropogene Einfluss des Industriezeitalters auf das Klima ist

somit auch und gerade in Deutschland sehr beachtlich (Grieser et al. 2000, Walter und Schönwiese 1999).

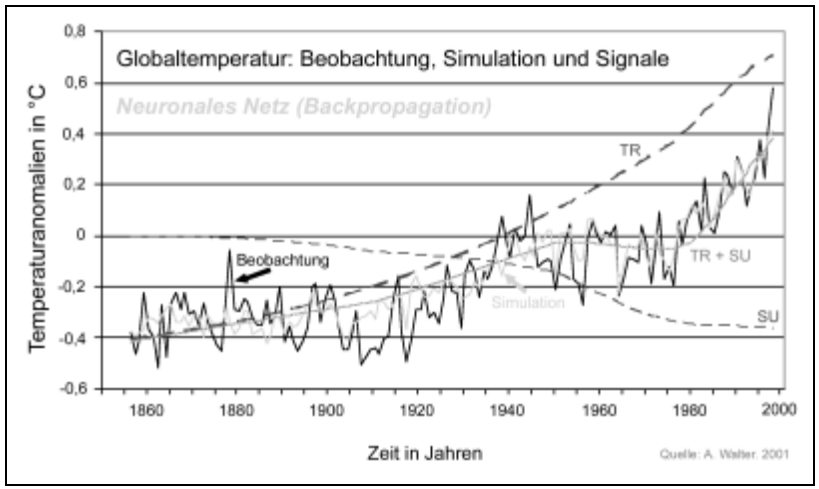

Abb. 10: Vergleich der beobachteten Jahresanomalien der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur 1856-1998 (entsprechend Abb. 3), schwarz, Reproduktion durch ein neuronales Netz (Backpropagation), rot, das gemäß Tab. 3 den anthropogenen Treibhaus- (TR) sowie Sulfateffekt (SU) und weiterhin die natürlichen Faktoren Vulkanismus, Sonnenaktivität und El Niño enthält, und zugehörige TR-, SU- und (TR+SU) - Signalzeitreihen (hier Bestschätzungen +1.1 °C bzw. -0.4 °C bzw. +0.8 °C), welche die Entwicklung des anthropogenen Anteils dieser Klimaänderungen angeben; die Varianzerklärung dieses statistischen Modells liegt bei rund 80 % (nach Walter und Schönwiese, 2002, verändert).

6. Folgerungen

Im Industriezeitalter ist, global gemittelt, offensichtlich eine markante Erwärmung der unteren Atmosphäre aufgetreten, die sehr wahrscheinlich in deutlichem Gegensatz zu den Klimaänderungen der letzten Jahrtausende steht. Sie lässt sich ursächlich – und das betrifft ganz besonders die letzten Jahrzehnte – weitgehend durch den anthropogenen Treibhauseffekt erklären, was im übrigen auch auf die gleichzeitig eingetretene stratosphärische Abkühlung zutrifft. Nimmt man den ebenfalls anthropogenen, jedoch in der unteren Atmosphäre kühlenden Effekt hinzu, der auf der Schwefeldioxid(SO_2)-Emission und daraus resultierenden Sulfataerosolbildung in der unteren Atmosphäre beruht, ist die gesamte langzeitliche Struktur dieser Klimaänderung verständlich, d.h. auch die Unterbrechung der Erwärmung in der Zeit ca. 1945-1975. (Nach 1945 setzte eine besonders rasche wirtschaftliche Entwicklung ein, ab den 70er-Jahren begannen die Maßnahmen zur Luftreinhaltung wirksam zu werden, die den SO_2-Ausstoß wieder reduzierten.) Natürliche Faktoren haben eher fluktuativ bzw. episodisch gewirkt, erklären also vor allem die Abweichungen von der Langfrist-Trendstruktur. Dabei ist

der von der Sonnenaktivität hervorgerufenen Effekt in etwa um den Faktor 10 geringer als der anthropogene Treibhauseffekt und zudem in den letzten beiden Jahrzehnten nicht wirksam.

Die räumlichen Strukturen der Temperaturänderungen sind jedoch sehr differenziert, einschließlich ihrer jahreszeitlichen Unterschiede, und ursächlich weitaus schlechter erklärbar als die zeitlichen Strukturen. Das gilt noch weit ausgeprägter für den Niederschlag. In Deutschland ist vor allem ein Trend zu wärmeren und niederschlagsreicheren Wintern erkennbar, aber auch zu heißeren und möglicherweise trockeneren Sommern, was episodische Starkniederschläge nicht ausschließt. Nur der Herbst weist in den letzten Jahrzehnten in Deutschland keinen Erwärmungstrend mehr auf.

Zum Teil sind diese Klimaänderungen mit häufigeren Extremereignissen verbunden, jedoch wiederum in sehr unterschiedlicher regional-jahreszeitlicher Ausprägung. Der extreme Hitzesommer 2003 lässt sich dabei gut in die anthropogen verursachten Klimatrends einordnen, weniger jedoch das Hochwasserereignis der Elbe-Region vom Sommer 2002.

Aufgrund dieser Indizien und Interpretationen der Klima-Vergangenheit gewinnen die Klimamodellprojektionen in die Zukunft erheblich an Brisanz (vgl. wiederum Beitrag Schellnhuber in diesem Band). Trotz aller Einschränkungen ist die Situation mit einem Experiment vergleichbar, das die Menschheit mit dem Klima und somit unserer Umwelt durchführt. Der Ausgang ist aber nicht ungewiss, sondern angesichts der Interpretation der Vergangenheit bestehen für die Zukunft so große Risiken, dass Klimaschutz – wie auch weitere Klimaforschung – unumgänglich sind, will man sich der Verantwortung für die Zukunft stellen. An Empfehlungen hierzu mangelt es nicht (Deut. Bundestag 1995, WBGU 2003).

Literatur

Angell, J.K., 2005:
Global, hemispheric, and zonal temperature deviations derived from radiosonde records. In: Trends Online. A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A.; http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/temp/angell/angell.html

CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center), 2005:
Internet http://cdiac.esd.ornl.gov/

Cubasch, U., Kasang, D., 2000:
Anthropogener Klimawandel. Klett-Perthes, Gotha-Stuttgart.

Deutscher Bundestag, Enquête-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“, 1995:
Mehr Zukunft für die Erde. Nachhaltige Energiepolitik für dauerhaften Klimaschutz. Economica, Bonn.

Fezer, F., 1995:
Das Klima der Städte. Klett-Perthes, Gotha.

Grieser, J., Staeger, T., Schönwiese, C.-D., 2000:
Statistische Analyse zur Früherkennung globaler und regionaler Klimaänderungen aufgrund des anthropogenen Treibhauseffektes. Bericht Nr. 103, Inst. Meteorol. Geophys. Univ. Frankfurt/Main.

Häberli, W., et al., 2001:
Glaciers as key indicator of global climate change. In Lozán, J.L., et al. (eds.): Climate of the 21st century: Changes and Risks. Wiss. Auswertungen + GEO, Hamburg, pp. 212-220.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, Houghton, J.T., et al., eds.), 2001:
Climate Change 2001. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC. University Press, Cambridge (dort auch IPCC-Berichte 1990, 1996).

Jonas, M., Stager, T., Schönwiese, C.-D., 2005:
Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen (Schwerpunkt Deutschland). Bericht Nr. 1, Inst. Atmosphäre Umwelt, Univ. Frankfurt/Main.

Jones, P.D., et al., 1999:
Surface air temperature and its changes over the past 150 years. Rev. Geophys., 37, 173-199 (update Internet 2005: http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/).

Kiehl, J.T., Trenberth, K.E., 1997:
Earth’s annual global mean energy budget. Bull. Am. Meteorol. Soc., 78, 197-208.

Kleeberg, H.-B., 1996:
Hochwassertrends in Deutschland. Universität der Bundeswehr, Institut für Wasserwesen, München, Heft 56a, S. 155-167.

Lozán, J.L., Graßl, H., Hupfer, P. (Hrsg.), 1998:
Warnsignal Klima. Wissenschaftliche Fakten. 465 S., Wissenschaftliche Auswertungen + GEO, Hamburg; engl. überarbeitete Ausgabe 2001.

Mann, M.E., Bradley, R.S., Hughes, M.K., 1999:
Northern hemisphere temperatures during the past millennium: inferences, uncertainties and limitations. Geophys. Res. Letters, 26, 759-762.

Mann, M.E., Jones, P.D., 2003:
Global surface temperatures over the past two millennia. Geophys. Res. Letters, 30, CLM 5, 1-4.

McCormick, P.M., Thomason, L.W., Trepte, C.E., 1995:
Atmospheric effects of Mt Pinatubo eruption. Nature, 373, 399-404.

Moberg, A., et al., 2005:
Highly variable northern hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. Nature, 433, 613-617.

Mudelsee, M., et al., 2003:
No upward trends in the occurrence of extreme floods in central Europe.
Nature, 425, 166-168.

MüRück (Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft), 2000,...,2004:
Topics, Jahresrückblicke Naturkatastrophen (jährlich erscheinende Broschüre), Eigenverlag, München.

Rapp, J., 2000:
Konzeption, Problematik und Ergebnisse klimatologischer Trendanalysen für Europa und Deutschland. Bericht Nr. 212, Deut. Wetterdienst, Selbstverlag, Offenbach.

Rapp, J., Schönwiese, C.-D., 1996:
Atlas der Niederschlags- und Temperaturtrends in Deutschland 1891-1990.
Frankfurter Geowiss. Arb., Serie B, Band 5, Univ. Frankfurt a.M.

Roedel, W., 2000:
Physik unserer Umwelt. Die Atmosphäre. Springer, Berlin.

Schär, C., et al., 2004:
The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves.
Nature, 427, 332-336.

Schönwiese, C.-D., 1995:
Klimaänderungen. Daten, Analysen, Prognosen. Springer, Berlin.

Schönwiese, C.-D., 2003:
Klimatologie. 2. Aufl., Ulmer (UTB), Stuttgart.

Schönwiese, C.-D., Rapp, J., 1997:
Climate Trend Atlas of Europe Based on Observations 1891 - 1990.
Kluwer Academic Publ., Dordrecht.

Schönwiese, C.-D., Staeger, T., Trömel, S., 2004:
The hot summer 2004 in Germany. Some preliminary results of a statistical time series analysis. Meteorol. Z., 13, 323-327.

Trömel, S., 2005:
Statistische Modellierung von Klimazeitreihen. Dissertation; Bericht Nr. 2, Inst. Atmosphäre Umwelt, Univ. Frankfurt/Main.

Walter, A., 2001:
Zur Anwendung neuronaler Netze in der Klimatologie. Bericht Nr. 218, Deut. Wetterdienst, Selbstverlag, Offenbach.

Walter, A., Denhard, M., Schönwiese, C.-D., 1998:
Simulation of global and hemispheric temperature variations and signal detection studies using neural networks. Meteorol. Z., N.F., 7, 171-180.

Walter, A., Schönwiese, C.-D., 1999:
Ursachen der Lufttemperaturvariationen in Deutschland 1865-1997. In Deutscher Wetterdienst (Hrsg.): Klimastatusbericht 1998, Offenbach, S. 23-29.

Walter, A., Schönwiese, C.-D., 2002:
Attribution and detection of anthropogenic climate change using a backpropagation neural network. Meteorol. Z., 11, 335-343.

Wanner, H., et al., 2001:
North Atlantic oscillation – concepts and studies. Surveys Geophys., 23, 321-382.

WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen), 2003: Über Kioto hinaus denken: Klimaschutzstrategien für das 21. Jahrhundert (Sondergutachten und Presseerklärung vom 25.11.2003; http://www.wbgu.de/wbgu_sn2003_presse.html).

Anhang

Übersicht der wichtigsten Charakteristika der klimawirksamen Spurengase (Treibhausgase) mit Emissionen und Konzentrationen (jeweils 2003, vorindustrielle Konzentrationen ca. 1800 in Klammern) sowie Abschätzung der Beiträge zum natürlichen (vorletzte Spalte) bzw. anthropogenen Treibhauseffekt (letzte Spalte) (Quellen: IPCC 2001; Lozán et al, 1998; natürlicher Treibhauseffekt nach Kiehl und Trenberth 1997, ergänzt nach CDIAC 2005).

Spurengas, Symbol	**Anthropogene Emissionen**	**Atmosphärische Konzentrationen**	**Treibh. natürlich**	**Treibh. anthrop.**
Kohlendioxid, CO_2	34 Gt /Jahr	375 (280) ppm	26 %	61 %
Methan, CH_4	400 Mt /Jahr	1,8 (0,7) ppm	2 %	15 %
FCKW *	0,3 Mt /Jahr	F12: 0,5 (0) ppb	-	11 %
Distickstoffoxid, N_2O	15 Mt /Jahr	0,32 (0,27) ppm	4 %	4 %
Ozon (bodennah), O_3	0,5 Gt /Jahr (?)	34 (25) ppb **	< 8 % ***	< 9 % ***
Wasserdampf, H_2O	vernachlässigbar	2,6 (2,6) % **	60 %	(indirekt)

*) Fluorchlorkohlenwasserstoffe **) bodennaher Mittelwert ***) mit weiteren Gasen

Aufschlüsselung der anthropogenen Emissionen:

CO_2: 80 % fossile Energie, 15 % Waldrodungen, 5% Holznutzung (Entwicklungsländer)
CH_4: 27% fossile Energie, 23% Viehhaltung, 17% Reisanbau, 16% Abfälle (Müll, Abwasser), 11% Biomasse-Verbrennung, 6% Tierexkremente
FCKW: Treibgas in Spraydosen, Kältetechnik, Dämm-Material, Reinigung
N_2O: 23-48% Bodenbearbeitung (einschl. Düngung), 15-38% chemische Industrie, 17-23% fossile Energie, 15-19% Biomasse-Verbrennung
O_3: indirekt über Vorläufersubstanzen wie z.B. Stickoxide (NO_x; Verkehr, Industrie u.a.)

ENERGIEVERSORGUNG – EINE ZENTRALE FRAGE DES 21. JAHRHUNDERTS

Fritz Vahrenholt
REpower Systems AG, Hamburg, und
Mitglied des Rates für Nachhaltige Entwicklung, Berlin

1. Einleitung

Was sind die Treiber der zukünftigen Energieversorgung?

- Erratisch steigende Preise für Öl, Gas und Importkohle,
- drastisch wachsende Importabhängigkeit aus geopolitisch instabilen Regionen,
- verschärfte CO_2-Minderungsanforderungen auf Grund der spürbar werdenden Klimaänderung.

Wir müssen den ungeheuren Energiehunger der Welt endlich zur Kenntnis nehmen, und der wächst rasant. Der Energieverbrauch allein von China steigert sich alle drei Jahre etwa um die Menge, die Japan insgesamt benötigt (Abb. 1). Dazu kommen Indien, Brasilien weite Teile der Welt, die ihre Industrie, den privaten Konsum und die Mobilität sehr schnell entwickeln. Milliarden Menschen, die heute noch überhaupt keinen Zugang zu Elektrizität haben, wollen alle so zivilisiert leben wie wir. Zusätzlich wächst die Weltbevölkerung noch bis in die Mitte des Jahrhunderts kräftig, und zwar um 2,5 Milliarden, das ist zweimal ein zusätzliches China.

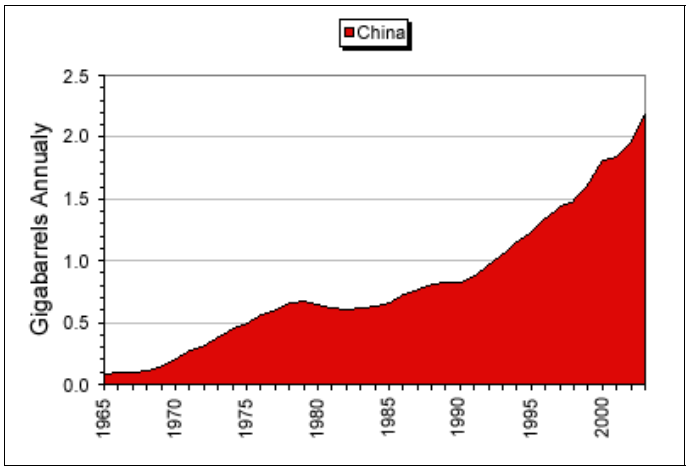

Abb. 1: Entwicklung des jährlichen Energieverbrauchs in China

Das hat gewaltige Auswirkungen auf alle Energieträger, insbesondere auf die Ölversorgung. Wir finden schon seit Jahren weltweit weniger neue Ölvorkommen als zusätzlich verbraucht

wird: von sechs verbrauchten barrel Öl wird eines durch einen Neufund ersetzt. Vier Fünftel unserer heutigen angezapften Reserven sind bis 2020 versiegt, wir müssten also 10 Mal die Nordsee neu entdecken um das zu ersetzen, was wegfällt (Abb. 2). Wir finden kaum noch Super Giants wie Ghawar (1948). Was wir finden, sind allenfalls Megagiants wie Doba oil field im Tschad mit 3,7 Billion Investment und 900 Million Barrels Reserven: Das reicht für 12 Tage des Weltölverbrauchs. Weltweit wird die Ölförderung in etwa zehn Jahren unseren Bedarf nicht mehr decken können. Das treibt den Preis. Heute kostet das Fass Öl 50 Dollar. Ich schätze, dass der Preis bis auf 60-80 Dollar in den nächsten fünf bis zehn Jahren ansteigt. Dem Ölpreis folgt das Gas, das aus vielerlei Hinsicht überfordert wird: es soll unsere Wohnungen heizen, einen Teil der zukünftigen Mobilität abdecken (Gas-to-liquid) und einen grossen Teil des in Europa anstehenden Kraftwerksersatzes beliefern.

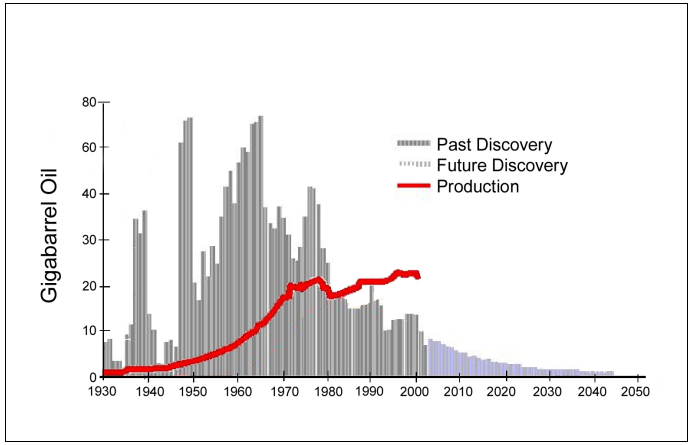

Abb. 2: Wachsende Lücke zwischen Ölverbrauch und Entdeckung neuer Ölvorkommen

2. Wachsende Importabhängigkeit

Die Terroranschläge vom 11. September, die fortgesetzten Terrorangriffe auf Pipelines im Irak, auf Ölanlagen in Saudi-Arabien haben gezeigt, wie verletzlich die geopolitische Lage ist, wie schnell sich die Abhängigkeiten von den öl- und gasfördernden Staaten auf die Industriegesellschaften der OECD auswirken können. Immerhin 70 Prozent der Ölreserven liegen in der strategischen Ellipse von Kasachstan bis zum Persischen Golf. Saudi-Arabien ist ein Pulverfass. Die Saat der wahabitischen Diktatur geht auf und eine perspektivlose fundamentalistische Jugend wird sich gegen das Königshaus selbst wenden. Viel schlimmer noch: Es gibt immer mehr Anzeichen dafür, dass die seit 1990 vorgeblich vorhandenen 260 Milliarden Barrel gar nicht mehr vorhanden sind. Ghawar (1948), Abuqaiq (1940), Safaniyah (1951), die größten Felder der Welt, laufen heuten nur noch unter Wasser-Injektion und fördern zunehmend auch Wasser. Und wir haben keinen Plan B, wenn uns Saudi-Arabien seit fünfzehn Jah-

ren hinters Licht geführt hat und Reserven vorgaukelt, weil die OPEC-Quote sich nach der Höhe der Reserven richtet (Abb. 3). Das ist der Grund, warum von 1986 bis 1989 die OPEC Staaten ihre Reserveschätzungen nach oben getrieben haben.

SPURIOUS RESERVE REVISIONS

	Abu Dhabi	Dubai	Iran	Iraq	Kuwait	Neutral Zone	Saudi Arabia	Venezuela
1980	28.0	1.4	58.0	31.0	65.4	6.1	163.4	17.9
1981	29.0	1.4	57.5	30.0	65.9	6.0	165.0	18.0
1982	30.6	1.3	57.0	29.7	64.5	5.9	164.6	20.3
1983	30.5	1.4	55.3	41.0	64.2	5.7	162.4	21.5
1984	30.4	1.4	51.0	43.0	63.9	5.6	166.0	24.9
1985	30.5	1.4	48.5	44.5	90.0	5.4	169.0	25.9
1986	30.0	1.4	47.9	44.1	89.8	5.4	168.8	25.6
1987	31.0	1.4	48.8	47.1	91.9	5.3	166.6	25.0
1988	92.2	4.0	92.9	100.0	91.9	5.2	167.0	56.3
1989	92.2	4.0	92.9	100.0	91.9	5.2	170.0	58.1
1990	92.2	4.0	92.9	100.0	91.9	5.0	257.5	59.1
1991	92.2	4.0	92.9	100.0	94.5	5.0	257.5	59.1
1992	92.2	4.0	92.9	100.0	94.0	5.0	257.9	62.7
1993	92.2	4.0	92.9	100.0	94.0	5.0	258.7	63.3
1994	92.2	4.3	89.3	100.0	94.0	5.0	258.7	64.5
1995	92.2	4.3	88.2	100.0	94.0	5.0	258.7	64.9
1996	92.2	4.0	93.0	112.0	94.0	5.0	259.0	64.9
1997	92.2	4.0	93.0	112.5	94.0	5.0	259.0	71.7
1998	92.2	4.0	89.7	112.5	94.0	5.0	259.0	72.6
1999	92.2	4.0	89.7	112.5	94.0	5.0	261.0	72.6
2000	92.2	4.0	89.7	112.5	94.0	5.0	259.2	76.9
2001	92.2	4.0	89.7	112.5	94.0	5.0	259.3	77.7
2002	92.2	4.0	89.7	112.5	94.0	5.0	259.3	77.8

Anomalous increase underlined. Note also implausible unchanged estimates.

Abb. 3: Sprung in den Schätzungen der Öl-Reserven in den Jahren 1986-1989

Auch die Erdgasalternative zeigt Beunruhigendes: Nach 2025 gibt es nur noch Vorkommen in den GUS-Staaten, die Europa versorgen können. Wir bringen uns in eine dramatische Abhängigkeit von Energieimporten. Kein Zweifel: Versorgungssicherheit insbesondere durch heimische Energieträger wird einen höheren Stellenwert bekommen.

3. Die Klimaänderung droht real zu werden

Ein mittlerer globaler Temperaturanstieg zwischen 1,4 und 5,8 Grad Celsius wird vom internationalen Wissenschaftsgremium IPCC bis Ende dieses Jahrhunderts befürchtet. Das hat Folgen: Verschiebung der Lebensräume von Tieren und Pflanzen, Auftreten nicht heimischer invasiver Insektenarten, Zunahme der Extremereignisse wie Starkniederschläge, Hitze- und

Dürreperioden mit Konsequenzen für die Nahrungsmittelsicherheit vieler Regionen Afrikas, Asiens und Lateinamerikas (Abb. 4).

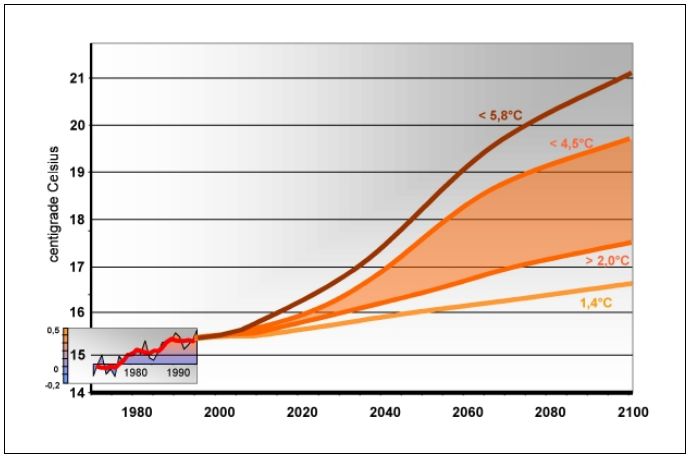

Abb. 4: Prognostizierte Änderung der mittleren globalen Temperatur im 21. Jahrhundert

Aufrütteln sollte uns, dass sich schon heute der Atlantik vor der europäischen Küste um 0,5 Grad Celsius aufgeheizt hat, dass die Winterperiode in Mitteleuropa um zwei bis drei Wochen später eintritt, dass die Gletscher um zehn Prozent geschrumpft sind, dass der Niederschlag in Nordeuropa um 10-40 Prozent zugenommen und in Südeuropa um 20 Prozent abgenommen hat (Abb. 5). Wir stehen am Vorabend eines gigantischen Klimawandels, dessen Wucht wir nur noch dämpfen können. Langfristig spricht also alles für kohlendioxidfreie Energien.

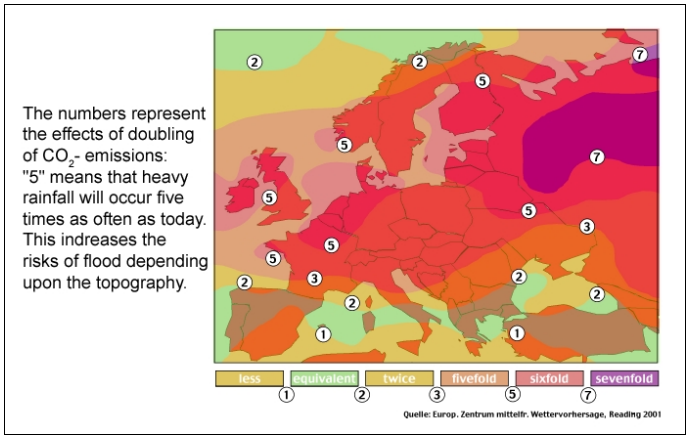

Abb. 5: Wie der Treibhauseffekt das Wetter verändert

4. Wege aus der Energiefalle

1. *Der Ausstieg aus der Kernenergie ist ein typisch deutscher Kurzschluss*, der klimapolitisch, geopolitisch und wirtschaftspolitisch ein schwerer Fehler ist. Niemand wird in Deutschland auf absehbare Zeit neue Kernkraftwerke bauen, selbst inhärent sichere nicht. Aber für mich ist es heute schon ein politischer Selbstgänger, dass es zu einer Verlängerung der Laufzeiten der Kernkraftwerke in Deutschland kommen wird. Die Entscheidungssituation wird 2007 mit dem drohenden Abschalten der KK Biblis und Brunsbüttel eintreten. Wir brauchen diese Verlängerung, um Zeit zu kaufen für eine notwendige Umstellung unseres Kraftwerksparks auf mehr heimische, CO_2-freie Energieträger.

2. *Es wird eine Renaissance der Kohle geben*. Erstens sind die Vorräte weltweit sehr viel demokratischer verteilt als Gas und Öl und zudem weist Kohle eine um Jahrhunderte längere Reichweite auf. Mit der Erreichung des technologischen Ziels des CO_2-freien Kohlekraftwerks Ende der nächsten Dekade wird die schmutzige Kohle ihren einzigen strukturellen Nachteil verlieren. Allerdings ist dies mit weiteren Kostenbelastungen verbunden.

3. Wir werden angesichts steigender Energiepreise *Riesenfortschritte machen in der Effizienz unseres Energie- und Materialverbrauchs.* Die immer wieder postulierten 50% an Energieeinsparung durch Wärmedämmung werden zur leichten Übung.

4. *Erneuerbare Energien sind heimische Energieträger und CO_2-frei*. In 10 Jahren wird bei weiter andauernder Kostendegression bei Wind und Biomasse die Wettbewerbsfähigkeit erreicht sein, selbst wenn man die Kosten für Leitungsbau und Regelenergie hinzurechnet.

5. Chancen der erneuerbaren Energien

Zunächst aber zu den Potentialen von *Biomasse, Solarenergie und Geothermie*:

Die *Biomassenutzung* wird weltweit einen großen Anteil der erneuerbaren Energien ausmachen, in Deutschland ist das Potenzial jedoch begrenzt.

Wegen des begrenzten Holzangebots von 6 Mio t sind maximal 50 Anlagen à 20 MW, das sind 7,5 Mrd kWh, erreichbar; das wären etwa zwei Prozent des Stromverbrauchs. Auf der Seite der Kraft- und Heizstoffe sieht es besser aus. Allein die EU Kommission sieht bis 2010 ein Ziel von sieben Prozent Biokraftstoff als erreichbar an. Das kann synthetischer Kraftstoff oder Bioethanol sein. Daimler-Chrysler sieht langfristig immerhin 15 Prozent des Kraftstoffes auf biogener Basis, europaweit sogar 30 Prozent als möglich an.

Hierzulande unterschätzt wird das Potenzial an Biogas. Selbst wenn nur die Hälfte der tierischen Exkremente gemeinsam mit fetthaltiger Biomasse zu Biogas umgesetzt wird, könnten mehr als fünf Prozent des Stroms auf diese Weise erzeugt werden.

Die *Solarenergie* wird in Deutschland in den nächsten beiden Dekaden ein Mauerblümchen bleiben; zu weit ist noch die Wirtschaftlichkeitsschwelle entfernt.

Es war richtig, die Technologieentwicklung und die Massenproduktion in Deutschland mit einem degressiv gestalteten Fördersatz zu unterstützen. Denn diese Technologie ist schon heute in den ländlichen Gebieten der sonnenreichen Länder eine elegante dezentrale Erzeugungsform und wirtschaftlicher, da sie dort keine Netzerschließungskosten erfordert. Rund zwei Milliarden Menschen haben andererseits keinen Zugang zu Elektrizität oder einem Stromnetz. Solarenergie kann ein Stück Zivilisation in die ländlichen Regionen der Welt des Südens bringen. Dahin gehört sie und nicht auf die Einfamilienhäuser von Buxtehude oder Unterhaching bei Stromerzeugungskosten von 50 €-Cent.

Der besondere strategische Vorteil *geothermischer Technologie* liegt in der ganzjährigen Verfügbarkeit der Quelle. Die technische Machbarkeit der Wärme- und Stromerzeugung steht außer Frage, während die Wirtschaftlichkeit hierzulande derzeit noch nicht gegeben ist. Gelingt aber die Steigerung der Produktivität geothermischer Lagerstätten durch innovative treffsichere Aufschluss- und Stimulationsverfahren, so steht der Geothermie durchaus eine Zukunft zur Erzeugung von Strom bevor. Die ersten Hot-dry-rock-Kraftwerke in Deutschland sollen in den nächsten drei Jahren entstehen. Noch ist das Verhältnis von Bohr-Investitionen von 6-8 Mio € zu erzeugender Leistung von 1-2 MW prohibitiv ungünstig.

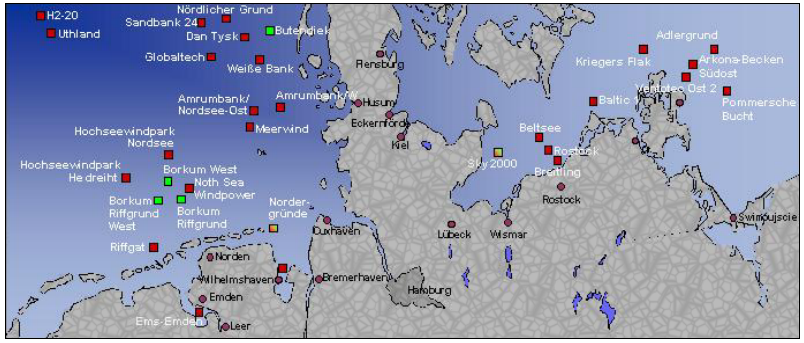

Abb. 6: Genehmigungsverfahren für Offshore-Windparks in Nordsee und Baltischer See

Bleibt also bis 2020 neben dem Ausbau der Wasserkraft, einigen Prozenten durch Biomasse und Biogas, der Löwenanteil durch *Windenergie* zu decken, wenn die Ziele der EU oder Deutschlands (20% erneuerbarer Strom bis 2020) erreicht werden sollen. Immerhin, die Kosten der Windenergie haben sich in den letzten zehn Jahren halbiert.

In der Zukunft müssen Kostensenkungen um zwei Prozent plus Inflationsrate pro Jahr erreicht werden, um dem Investor eine annehmbare Verzinsung seines eingesetzten Kapitals zu garantieren. Die Windenergie hat heute hierzulande einen Anteil an der Stromversorgung von 6 Prozent. Mit dem Ausbau der Offshore Windparks von etwa 2.500 MW bis 2010 wird Windenergie etwa zehn Prozent der Stromversorgung ausmachen.

Den größeren Ausbaubedarf werden wir an Land sehen in Frankreich, UK, Spanien und Italien. Offshore wird es die größten Entwicklungen in UK (10.000 MW), Deutschland (Abb. 6) und Schweden (2.100 MW) geben.

Natürlich kann ich mir 20.000 MW Offshore in Deutschland bis 2020 vorstellen, allerdings bedarf es einer erheblichen politischen Kraftanstrengung, um den dafür notwendigen Leitungsbau auch durchzusetzen.

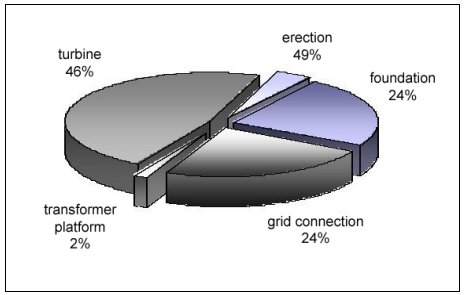

Abb. 7: Aufteilung der Investitionskosten einer Offshore-Windenergieanlage

Dass für solche schwierigen Standorte technisch-wirtschaftliche Lösungen entwickelt werden, dafür gibt es den deutschen Maschinenbau und Ingenieurskunst aus Europa. Warum eine 5 MW-Anlage? Kabelkosten und Fundament machen in 30 m tiefem Wasser, 40 km vor der Küste 50% der Kosten aus (Abb. 7).

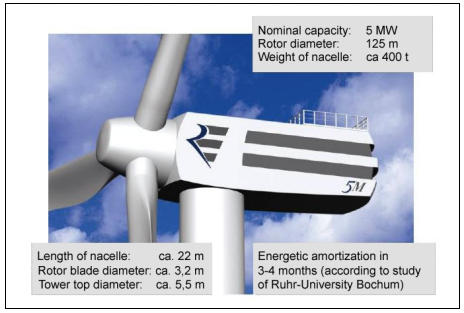

Abb. 8: Windenergieanlage vom Typ REpower 5M

So muss pro Einspeisepunkt der höchstmögliche Stromertrag erzeugt werden, den wir uns ingenieursseitig noch zutrauen können (Abb. 8). Trägt man die Stromerzeugungskosten gegen die Vollaststundenzahl, so erkennt man, dass eine 5 MW-Anlage etwa 1,5 €-Cent günstiger produziert als eine herkömmliche 2 MW-Anlage (Abb. 9).

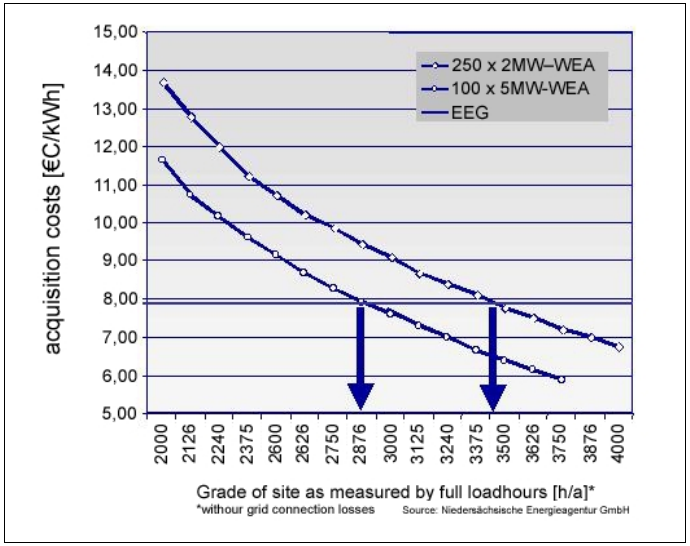

Abb. 9: Abhängigkeit der spezifischen Stromgestehungskosten einer Offshore-Windenergieanlage von der Anlagengröße und der Volllaststundenzahl

6% der Stromversorgung in Deutschland sind heute privat mit Hundertausenden von Eigentümern organisiert, geradezu anarchische Eigentumsverhältnisse. Man stelle sich vor, die EVU besäßen die Windparks als assets und könnten Sie als virtuelle Kraftwerke betreiben.

Es ist nur eine Frage der Zeit bis sich große Energieversoger mit Erneuerbaren Energien befassen werden. Zukunftsfähige Unternehmen haben gelernt, dass es heute nicht mehr ausreicht, gute Produkte zu wettbewerbsfähigen Preisen bereitzustellen. Sie dürfen nicht allein Benzin oder Autos, sondern nachhaltige Mobilität, nicht Agrochemikalien sondern nachhaltige Nahrungsmittelversorgung, nicht Strom, sondern nachhaltige Energiedienstleistungen verkaufen – sie müssen Zukunft anbieten.

Denn eins haben zukunftsfähige Unternehmen gelernt: Dass sie aufhören würden, als Unternehmen erfolgreich zu operieren, wenn sie die Erwartungen nicht erfüllen, die die Gesellschaft als Ganzes an sie stellt.

Stromerzeugung ohne CO_2-Ausstoss in die Erdatmosphäre (Abstract)

Axel Kranzmann
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

In Deutschland betrug im Jahr 2002 das Gesamtstromaufkommen 588,1 Mrd. kWh. Davon wurden 45 Mrd. kWh oder 7,65% durch größtenteils regenerative Primärenergien wie Wasserkraft (23,9 kWh), Wind (16,8 kWh), Biomasse und Müll (4,2 kWh) sowie Photovoltaik (0,1 kWh) erzeugt. Die eingesetzten kohlenstoffhaltigen Primärenergieträger waren zu 27,4% Braunkohle und zu 23,2% Steinkohle sowie 9,3% Erdgas. Die Umwandlung dieser Primärenergieträger zu Strom bedeutet die Erzeugung von Kohlendioxid (366,2 Mio. t in 2001 von insgesamt 873,2 Mio. t). Ohne kohlenstoffhaltige Primärenergieträger ist die Versorgung mit Elektrizität auch in den nächsten 50 Jahren wahrscheinlich nicht möglich. Da CO_2 gemäß den Modellen der Klimaforschung das Klima nachhaltig beeinflussen könnte, konzentrieren sich weltweit Forschungs- und Entwicklungsprogramme zur Entwicklung der Energieerzeugungstechnologie auf die Reduzierung des CO_2-Ausstosses von Kraftwerksanlagen. Da Kraftwerke große und lokalisierte CO_2-Quellen sind, liegt es nahe, nicht zu vermeidendes CO_2 nicht in die Atmosphäre zu entlassen, sondern abzuscheiden und in CO_2-Speichern zu lagern. Diese Ziele werden zum Beispiel in den Energieprogrammen der USA, des Vereinigten Königreichs, Deutschlands und Norwegens verfolgt. In Deutschland wurde dazu das COORETEC-Programm entworfen. Mögliche technologische Schritte sollen vorgestellt werden und einige offene technisch-wissenschaftliche Fragen diskutiert werden. Dazu gehören neue Hochtemperaturwerkstoffe, welche die Steigerung des Umwandlungswirkungsgrades in Turbomaschinen ermöglichen, oder Lufttrenntechnologien, welche „Oxyfuelprozesse“ kommerziell nutzbar machen.

Der Klimawandel: Diagnose, Prognose, Therapie (Abstract)

Hans Joachim Schellnhuber
Tyndall Centre, University of East Anglia, Norwich, GB und
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIC), Potsdam

Der Vortrag versucht, eine strategische Analyse des Klimaproblems vorzunehmen. Ausgehend von einer kurzen Charakterisierung des natürlichen Klimasystems als wesentliche Komponente der Ökosphäre wird die Bedeutung der gegenwärtigen zivilisatorischen Störung jenes Systems diskutiert (Diagnose). Im zweiten Schritt werden die möglichen, überwiegend negativen Auswirkungen der fortschreitenden Erderwärmung im Jahrhundert/Jahrtausend-Maßstab skizziert, wobei die wahrscheinlich „gefährlichen“ Folgen besondere Beachtung verdienen (Prognose). Schließlich werden die wesentlichen politischen, sozioökonomischen und technologischen Optionen zur Bewältigung/Linderung des Klimaproblems beleuchtet (Therapie). Den größten Erfolg verspricht eine Doppelstrategie aus Emissionsreduktions-maßnahmen zur Begrenzung der Erderwärmung auf ein „tolerierbares“ Maß einerseits und Anpassungsmaßnahmen hinsichtlich der „unvermeidbaren“ Klimaexkursion andererseits. Es wird gezeigt, dass eine solche Strategie volkswirtschaftlich verkraftbar ist, aber massive geostrategische Konsequenzen haben dürfte.

800,000 Years of Greenhouse Gas Concentrations from an Arctic Ice Core (Abstract)

Thomas Stocker
Physics Institute, University of Bern, Bern, Switzerland

In the framework of the European Project of Ice Coring in Antarctica (EPICA) 3201 meters of ice have been recovered, and an attempt was made during the field season 2004/2005 to reach bedrock. The ice core from Dome Concordia contains the longest, continuous climate history from a polar ice core, and covers at least eight glacial cycles during the last 800,000 years. Due to the sintering process of snow into ice, air is enclosed in bubbles, and under increased pressure, in clathrates within the ice matrix. Polar ice is an excellent archive of air of the past and thus one of the most important climate archives. The chemical composition of this air is measured on samples of 50 grams and less through a variety of analytical techniques. This yields a reliable reconstruction of the three major greenhouse gases in the atmosphere CO_2, CH_4 and N_2O. The complete record of greenhouse gases in low temporal resolution over the last 700,000 years is presented. For the first time it will become possible to investigate warm periods (interglacials) which are substantially different from the warm periods of the last 400,000 years. The negative radiative forcing associated with reduced greenhouse gas concentrations of these interglacials relative to today can be estimated and used to determine the cooling that would be generated. This allows for a fresh look at climate sensitivity which also determines the warming this planet will experience under continued anthropogenic increase of greenhouse gas concentrations.

Climate Variability and Change in the Atlantic Sector (Abstract)

Martin Visbeck
Leibniz-Institut für Meereswissenschaften (IFM-GEOMAR), Kiel

The last three decades of increased observations in the ocean and atmosphere have revealed significant variability and change. Large scale atmospheric fluctuations in the strength and position of the main wind systems have affected the circulation and stratification of the Atlantic Ocean. At the same time an increase in upper ocean heat content and a change in the salinity distribution suggest slow changes in the climate system and its hydrological cycle. Changes in the atmospheric circulation, in part forced by the ocean, have shown significant impacts of the energy sector in the last two decades, and that trend will likely continue.

In the tropical Atlantic, significant variability in the coupled ocean-atmosphere system has been observed. Several of the mechanisms are understood in principle involving swift ocean currents and a rather sensitive atmosphere. However, our ability to realize the potential predictability of changes in seasonal rainfall over Brazil and Western Africa has been hampered by the lack of sufficient oceanic data and flaws in the current generation of oceanic and atmospheric models. This region thus provided a nice challenge for a focused research program. The tropical oceans have shown to play a major role in communicating changes in the large scale ocean circulation to the atmosphere.

EXPERIMENTS ON THE OCEAN DISPOSAL OF FOSSIL FUEL CO_2 (ABSTRACT)

Peter G. Brewer
Monterey Bay Aquarium Research Institute, Moss Landing, California, USA

Ocean disposal of fossil fuel CO_2 is the strategy now in use by all nations on a massive scale to reduce atmospheric build up of this unseen artifact of mankind's use of fossil energy. The ocean has already absorbed some 500 billion tons of CO_2, and the net invasion rate across the air-sea interface is now about 1 million tons of CO_2 per hour. Yet this "passive" disposal is slow enough that the build-up of CO_2 in the atmosphere continues, with attendant concerns over climate change. The suggestion of active, direct ocean CO_2 disposal was first made 25 years ago, but it is only recently that the first field experimental work has been carried out. We have now developed the skills to safely transport, and precisely measure the behaviour of experimental quantities of CO_2 at ocean depths of 4000m. The physical behaviour of CO_2 is complex, with the transition from gas to a highly compressible immiscible liquid, and the formation of a solid hydrate. It was widely believed that the disposal of CO_2 as a solid hydrate on the ocean floor would result in permanent disposal, but both theory and experiment now show that the dissolution rate into unsaturated ocean water is rapid. Here we show new results from recent experiments, and examine the fate of CO_2 on the ocean floor exposed to physical forcing, and some of the environmental consequences of both possible active, and the far larger passive, ocean disposal.

ANSCHRIFTEN DER VORTRAGENDEN UND DES HERAUSGEBERS

Peter G. Brewer
Monterey Bay Aquarium Research Institute
7700 Sandholdt Road
Moss Landing,
CA 95039-9644, USA
E-Mail: brpe@mbari.org

Brigitte Falkenburg
Institut für Philosophie
Fakultät 14
Universität Dortmund
D-44221 Dortmund
E-Mail: falkenburg@fb14.uni-dortmund.de

Stefan Glunz
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE)
Heidenhofstr. 2
D-79110 Freiburg
E-Mail: glunz@ise.fhg.de

Martin Keilhacker
Kapellengartenstr.11
D-81247 München
E-Mail: Martin.Keilhacker@SoftDesign.de

Joachim U. Knebel
Programm Nukleare Sicherheitsforschung (NUKLEAR)
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
PF 3640
D-76021 Karlsruhe
E-Mail: joachim.knebel@nuklear.fzk.de

Stephan Kohler
Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)
Chausseestr. 128a
D-10115 Berlin
E-Mail: kohler@dena.de

Axel Kranzmann
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87
D-12205 Berlin
E-Mail: Axel.Kranzmann@bam.de

Eckhard Rebhan
Institut für Theoretische Physik
Universität Düsseldorf
D-40225 Düsseldorf
E-Mail: rebhan@thphy.uni-duesseldorf.de

Hans Joachim Schellnhuber
Tyndall Centre
University of East Anglia
Norwich NR4 7TJ, GB
E-Mail: H.J.Schellnhuber@uea.ac.uk

Christian-D. Schönwiese
Institut für Atmosphäre und Umwelt
Universität Frankfurt
Robert-Mayer-Str. 1
D-60054 Frankfurt
E-Mail: schoenwiese@meteor.uni-frankfurt.de

Frank Seyfried
Konzern-Forschung
Volkswagen AG
D-38436 Wolfsburg
E-Mail: frank.seyfried@volkswagen.de

Wolfgang Steiger
Konzern-Forschung
Volkswagen AG
D-38436 Wolfsburg
E-Mail: wolfgang.steiger@volkswagen.de

Thomas Stocker
Physics Institute
University of Bern
Siedlerstr. 5
CH-3012 Bern
E-Mail: stocker@climate.unibe.ch

Th. Walter Tromm
Programm Nukleare Sicherheitsforschung (NUKLEAR)
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
PF 3640
D-76021 Karlsruhe
E-Mail: walter.tromm@nuklear.fzk.de

Fritz Vahrenholt
REpowerSystems AG
Alsterkrugchaussee 378
D-22335 Hamburg
E-Mail: f.vahrenholt@repower.de

Martin Visbeck
Leibniz-Institut für Meereswissenschaften (IFM-GEOMAR)
Düsternbrooker Weg 20
D-24105 Kiel
E-Mail: mvisbeck@ifm-geomar.de

VORTRÄGE 1996-2004

60. Physikertagung Jena 1996

R. Linkohr
Deutsche Energiepolitik im europäischen Trend?

G. Berz
Zunahme der Naturkatastrophen: Auswirkungen der Klimaänderungen?

U. Elsenberger
Das Brennstoffkennzahl-Verfahren als neues Planungsinstrument für Neubau- und Sanierungsvorhaben

W. Feist
Passivhäuser: Gebäude ohne Heizung
– Erfahrungen mit dem ersten Demonstrationsgebäude in Darmstadt und Perspektiven für kostengünstige Passivhäuser

G. Eisenbeiß
Sonnenenergie – Physik und Technik für Umwelt und Nachwelt

F. Ziegler, S. Demmel, R. Kahn, P. Lamp, G. Alefeld
Hocheffiziente Absorptionsmaschinen zur Versorgung mit Kälte und Wärme

U. Radtke
Hochleistungsübertragung über große Entfernungen mit hochgespanntem Gleichstrom

J. Diekmann
Modelle und Perspektiven zur stufenweisen Markteinführung von leistungs-starken Anlagen der Solarenergie und der Windenergie im Stromsektor

K. Kugeler
Sicherheitsaspekte zukünftiger Kernkraftwerke und Thorium-Reaktor zur Plutonium-Beseitigung

G. Plass
Inertialfusion mit Schwerionenzündung

K. Pinkau
Stand und Perspektiven der Fusionsforschung

J.-Fr. Hake
Szenarien zur Minderung energiebedingter Klimagasemissionen in Deutschland

M. Kleemann
Aktuelle ökologische und ökonomische Aspekte bei der Nutzung regenerativer Energiequellen

B. Geiger
Merthodik zur Erstellung energiewirtschaftlicher Prozessketten

U. Wagner
Bewertung von Prozessketten einer Wasserstoff-Energiewirtschaft

61. Physikertagung München 1997:

K. Kugeler
Nutzung der Kernspaltungsenergie – heute und in Zukunft

J.-P. Revol
Nuclear waste removal using particle beams – incineration with fast neutrons

T. Hamacher
Stand und Perspektiven der Fusion

J. Raeder (SEAFP) Team)
An Assessment of the Safety and Environmentl Characteristics of Nuclear Fusion Based on Magnetic Confinement

H.-M. Groscurth, H. Bergmann, W. Bräuer
Die Deregulierung des Strommarktes und ihre Konsequenzen für die Markteinführung erneuerbarer Energien

E. Tönsing, E. Jochem, M. Landwehr, C. Nölscher, H. Vollmar
Methodisches Vorgehen bei der Entwicklung von Szenarien der Energie-nutzung und -versorgung mit reduzierten CO_2-Emisssionen bis 2050

A. Moser
Lastnahe und lastferne Elektrizitätserzeugung – Folgen für Planung und Betrieb der Netze

R. Benz, K.P. Bartholomä, D. Demuth, B. Gardini
Envisat-1: A European Contribution to Global Environmental Monitoring

G. Zimmerer
Energie und Umwelt im universitären Physikunterricht

62. Physikertagung Regensburg 1998:

Wolfgang Spirkl
Nichtabbildende Optik zur hocheffizienten Umwandlung von Sonnenenergie

Hans-Martin Henning
Solare Kühlung – Thermodynamische Grundlagen, Einsatzmöglichkeiten und neue Entwicklungen

R. Caps und J. Fricke
Entwicklungsstand und Tendenzen bei Vakuumisolationen

C. Hebling, A. Eyer, F. Faller, A. Hurle, R. Lüdemann, S. Reber, W. Wettling
Die kristallinie Silicium-Dünnschicht-Solarzelle

K. Schwarzburg, B. Burfeindt, T. Hannappel, B. Meissner, F. Willig
Farbstoff-Injektions-Solarzellen

Hans-Georg Beyer, Detlev Heinemann
Satellitengestützte Verfahren zur Bestimmung der kurzwelligen solaren Einstrahlung für die Analyse von Solarenergiesystemen

Joachim Nitsch
Strategien für eine nachhaltige Energieversorgung

Jean Mattern
Das Konzept des SWR 1000; ein Siedewasserreaktor mit passiven Sicherheitseinrichtungen

Heinrich-Peter Laqua, W7-AS Team
Über die Geometrie von Korkenziehern und den magnetischen Einschluß von Fusionsplasmen in Stelleratoren

63. Physikertagung Heidelberg 1999:

Klaus Becker
Wie gefährlich sind kleine Strahlendosen?

Klaus Kühn
Endlagerung radioaktiver Abfälle – ein auswegloses Problem in Deutschland?

Dieter Attig
Zukunftschancen der Kraft-Wärme-Kopplung in einem liberalisierten Energiemarkt

Helmuth-M. Groscurth und Isabel Kühn
Die energetische Nutzung von Biomasse –technische, ökonomische und ökologische Erfahrungen anhand ausgewählter europäischer Beispiele

Gregor Czisch
Potentiale der regenerativen Stromerzeugung in Nordafrika – Perspektiven ihrer Nutzung zur lokalen und großräumigen Stromversorgung

Michael Häusler
Solarstrombrücken zwischen Nordafrika und Europa

Simone Lenz und Wolfgang Pfaffenberger
Stromhandel mit erneuerbaren Energieträgern mit einem Quotenmodell

64. Physikertagung Dresden 2000:

darin das Symposion ‘Plutonium und was nun’? (Vorträge markiert mit *) zusammen mit dem Arbeitskreis Physik und Abrüstung

Wolfgang Liebert, Roland Bähr, Alexander Glaser, Lothar Hahn, Christoph Pistner
Fortgeschrittene Nuklearsysteme: Was ist zu erwarten?

Dominique Delattre
The accident at the nuclear fuel processing facility in Tokajmura: The role of IAEA

Martin Keilhacker
Richtungsweisende Ergebnisse vom Europäischen Fusionsexperiment JET

Klaus-Detlef Closs
Anforderungen an Plutonium-Abfallprodukte aus der Sicht der Endlagerung (*)

K. Gompper und G. Keßler
Moderne Strategien zur Beseitigung von Plutonium (*)

Allison Macfarlane
The Options for and Status of Military Surplus Plutonium
in the United States and Russia (*)

Wolfgang Liebert, Alexander Glaser, Christoph Pistner
Umgang mit deutschem Reaktorplutonium im europäischen Kontext (*)

Michael Dick
Die Technik des 3-Liter Autos

Holger Krawinkel
Zertifikatshandel für erneuerbare Energien – Eine europäische Perspektive

Manfred Treber
Sachstand beim internationalen Klimaschutz im Rahmen der UN-Klimaverhandlungen –
die Schlupflöcher des Kyoto-Protokolls und der Beitrag der Naturwissenschaften

65. Physikertagung Hamburg 2001:

Christian-D. Schönwiese
Zum aktuellen Stand der Klimaproblematik: Nachweis des Klimafaktors Mensch
in den Beobachtungsdaten und Modellabschätzungen

Christoph Bals
Die Klimaverhandlungen der Vereinten Nationen
nach dem gescheiterten Klimagipfel von Den Haag

Harald Bradke
Zukünftige Energiesysteme

F.Barthel und P.Kehrer
Welterdölvorräte und ihre Reichweite

Jochen Fricke
Energiebedarf und Energiebereitstellung: Forderungen und Beiträge
aus der Wissenschaft, insbesondere zur Altbausanierung

Rudolf Henne
Brennstoffzellen: Funktion, Potenzial und Stand der Entwicklungen

J. Ebner, G. Isenberg, R. Edinger
Renewable Energies for Climate Benign Fuel Production:
Powering Fuel Cell Vehicles

Augustin J.McEvoy and Michael Grätzel
Dye-sensitised Nanocrystalline Solar Cells

Christoph Krupp
Klimapolitik in Hamburg: Konzepte und Ergebnisse

Eike Gelfort
Statusbericht zur Stilllegung kerntechnischer Anlagen

Helmuth-Michael Groscurth
Klimaschutz durch Emissionshandel

Thomas Hamacher
Was können wir aus der Entwicklung der Wassermühle im frühen Mittelalter
über die Zukunft der Energieversorgung lernen?

Karl Ehrlich
Die Entwicklung von Strukturmaterialien für die Kernfusion

Werner Späth
Elektrisches Licht: Wegbereiter des Industrie- und Informationszeitalters

66. Physikertagung Leipzig 2002:

Gerd Eisenbeiß, Michael Geyer
Solarenergie aus dem Sonnengürtel

Hermann-Josef Wagner
Windenergie – Stand, Tendenzen und Analysen

Ernst Welfonder, M. Kurth, H.-B. Tillmann
Duale elektrische Energieversorgung bei zunehmender Windkrafteinspeisung
Dual Electric power supply with increasing wind power generation

Werner Brinker
Dezentrale Stromerzeugung und ihre Auswirkung auf die Netzsysteme

Christian P. Beckervordersandforth
Rolle des Erdgases in einer nachhaltigen Energiewirtschaft – Brücke zum Wasserstoff

Viktor Scherer
Kombinierte Gas- und Dampfturbinenkraftwerke:
Bausteine einer effizienten Stromversorgung

Andreas Hauer
Thermochemischer Speicher mit Zeolith zum Heizen und Kühlen

Jürgen. U. Keller, M. U. Göbel, R. Staudt
Das Wirbelrohr:
Bemerkungen zu den Grundlagen und neuen energietechnischen Anwendungen

Sven Bode
Marktwirtschaftliche Instrumente im Klimaschutz –
Aktivitäten und Erfahrungen in Unternehmen und auf Staatenebene

Manfred Treber
Chancen und Risiken der Implementierung des Kyoto-Protokolls –
Internationaler Klimaschutz nach dem Klimagipfel von Marrakesch

Franz Trieb, Joachim Nitsch, Lars-Arvid Brischke
Szenario zur nachhaltigen Stromversorgung Deutschlands bis 2050

67. Physikertagung Hannover 2003:

Klaus Heinloth
Energie: Optionen für die Zukunft

Robert Pitz-Paal, Bernhard Hoffschmidt
Ziele bei der Entwicklung von solarthermischen Kraftwerken

Karl Lackner
Planung und Aufgaben des nächsten Schrittes
in der Fusionsforschung: ITER

Peter-W. Phlippen, K. Kugeler
Der Hochtemperaturreaktor –
Sicherheitseigenschaften und laufende Projekte

Marco K. Koch, Tim Büscher, Hermann Unger
Sicherheitskonzepte fortgeschrittener Leichtwasserreaktorentwicklungen

Eike Gelfort
Drei Generationen von Kernkraftwerken

Axel Michaelowa
Reicht das Kyoto-Protokoll als Bollwerk
gegen die anthropogene Klimaveränderung aus?

Stephan Richter, Thomas Hamacher
Die integrale Methode URBS
zur Beschreibung und Optimierung urbaner Energiesysteme

Wolfgang Feist
Energieeffizienz bei Gebäuden – dargestellt am Beispiel Passivhaus

Gerhard Kirchner
Haustechniksystem AEREX für Passivhäuser – Technik und Erfahrungen

Hartmut Graßl
Klimawandel und neue Wetterextreme

Stefan Rahmstorf
Aus der Klimageschichte lernen (Abstract)

Martin Heimann
Der Kohlenstoffkreislauf: Eine interaktive Komponente
des globalen Klimasystems (Abstract)

Johann Feichter
Anthropogenes Aerosol: Kleinste Partikel mit großer Wirkung
auf Klima und hydrologischen Kreislauf (Abstract)

Hans von Storch, Nico Stehr
Anpassung und Vermeidung – wie geht der Mensch mit der anthropogenen Klimaänderung um? (Abstract)

68. Physikertagung München 2004

Eberhard Jochem
Weltweite Perspektiven der Kohle – Klimabedrohung oder Entwarnung?

Tore A. Torp
CO_2 Capture and Storage – An Update on Ongoing European R&D

Kurt Kugeler, J. U. Knebel, R. Odoj, P. W. Phlippen, N. Pöppe
Zukünftige Optionen für die Entsorgung von hochradioaktiven Abfällen

Ulrich Krugmann
Der „European Pressurized Water Reactor“ (EPR) und sein Sicherheitskonzept

Arthur G. Peeters
Theoretical Understanding of Transport in Fusion Plasmas

Cornelia Viertl
Windenergie: Entwicklung Onshore und Offshore

Andreas Düser
Die technisch-wirtschaftliche Entwicklung der Windenergie:
Rückblick auf die letzten 10 Jahre und Ausblick auf zukünftige Entwicklungen

Helmut Alt
Netzeinspeisung aus zeitlich fluktuierenden Quellen

Gerhard Bohrmann und Erwin Suess
Gashydrate der Meeresböden: Ein dynamischer Methanspeicher im Ozean

Thomas Happe und Katrin Müllner
Biokraftstoffe aus Algen: Photobiologische Wasserstoffproduktion und CO_2-Fixierung

Franz X. Söldner
Alternative Treibstoffe zur Sicherung von Energieversorgung und Umwelt

Holger Apfel, Carsten Cremers and Ulrich Stimming
Fuel Cells: State of the Art and Future Developments

Stephan Richter und Thomas Hamacher
Langfristige Auswirkungen sich verändernder Stromkosten auf eine dezentrale Energieversorgung in urbanen Energiesystemen

Die Vorträge können einzeln oder im Tagungsband bezogen werden, solange der Vorrat reicht, über die Herausgeber Martin.Keilhacker@softdesign.de und Walter.Blum@cern.ch.