



Energie und Klima

Ein Blick in die Zukunft

herausgegeben von

Hans Brand

Gerhard Hosemann

Klaus Riedle

Erlanger Forschungen
Reihe B
Naturwissenschaften
und Medizin
Band 30

FAU
UNIVERSITY
PRESS

Energie und Klima – Ein Blick in die Zukunft

herausgegeben von

Hans Brand

Gerhard Hosemann

Klaus Riedle

ERLANGER FORSCHUNGEN
Reihe B • Naturwissenschaften und Medizin • Band 30

Energie und Klima – Ein Blick in die Zukunft

Fünf Vorträge aus dem Symposium
am 8. November 2012 in Erlangen, gemeinsam
veranstaltet von der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg und dem VDI/VDE-Arbeitskreis
Gesellschaft und Technik in Nordbayern

herausgegeben von

HANS BRAND
GERHARD HOSEMANN
KLAUS RIEDLE

Erlangen 2013

Die wissenschaftliche Buchreihe der ERLANGER FORSCHUNGEN wurde gegründet mit Mitteln der Jubiläumsspende der Siemens AG Erlangen

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über den OPUS Server der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg <http://www.opus.uni-erlangen.de/opus/> abrufbar.

Verlag und Auslieferung:

FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Lasersatz: Nieland, Textverarbeitung, Baiersdorf

Druck: Verlagsdruckerei SCHMIDT, Neustadt/Aisch

ISBN: 978-3-944057-06-4

ISSN: 0174 6081

Inhaltsverzeichnis

Vorwort 7

PROF. DR.RER.NAT. DIETHARD MAGER
Ministerialdirigent im BMWi, Berlin,
Honorarprofessor der FAU

Die Energiewende in Deutschland - Chancen und Risiken 9

UNIV.-PROF. DR.-ING. GERHARD HEROLD
Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung der
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Die Stromversorgung aus regenerativen Quellen und ihre Zwänge 33

UNIV.-PROF. DR.RER.NAT. HERMANN HARDE
Helmut-Schmidt-Universität Hamburg
Lehrstuhlinhaber i.R. für Lasertechnik und Werkstoffkunde
Autor des gleichnamigen Buchs

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei? 63

PROF. DR.RER.NAT. FRITZ VAHRENHOLT
Hamburg, Vors. des Aufsichtsrats der RWE Innogy GmbH
Mitautor des Buchs „Die kalte Sonne“

Sonne und Treibhausgase – Ursachen des Klimawandels 99

DR.-ING. DOMINIK ROHRMUS

Siemens AG, Corporate Technology, München

*Die Kohlenwasserstoff-Kreislaufwirtschaft – sichere Energie- und
Ressourcenversorgung mittels erneuerbarer Energien* 129

PROF. DR.-ING. D.Sc.h.c. KLAUS RIEDLE

Mitherausgeber und Sprecher des wissenschaftlichen Beirats des
Symposiums

Schlusswort 151

Danksagung 155

Herausgeber- und Autorenverzeichnis 157

Vorwort

Die Entwicklung der Energieversorgung und des Klimas vorherzusagen, ist schwierig. Dies gilt insbesondere für die Konsequenzen aus der deutschen Energiewende und für den Klimawandel.

Energie, die Basis unseres Lebens, wurde zusammen mit den dafür eingesetzten Ressourcen und dem Klima zum Thema eines Symposiums am 8. November 2012 in Erlangen. Was früher überwiegend die zuständigen Ingenieure und Naturwissenschaftler beschäftigte, interessiert heute vor dem Hintergrund aktueller politischer Entscheidungen in hohem Maße die Gesellschaft allgemein. Dies ist umso verständlicher, wenn eine bisher gesicherte Versorgung, vor allem mit dem allseits wichtigen Strom, in Frage gestellt wird. Probleme dieser Art lassen sich nicht mit politischem Wunschdenken, sondern nur mit solider Technik unter Beachtung der Physik, Wirtschaftlichkeit und Umweltschonung lösen.

Hierzu bieten die Technische Fakultät an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) und der VDI/VDE-Arbeitskreis Gesellschaft und Technik (GuT) eine kompetente Plattform.

Es hat mich daher sehr gefreut, dass Mitglieder der Technischen Fakultät der FAU und der beiden Ingenieurverbände die Initiative ergriffen haben, die komplexen Zusammenhänge dieser Thematik in einem Symposium der Öffentlichkeit vorzustellen und zu erklären.

Dieser notwendigen Kommunikation zwischen den interessierten Laien und der kompetenten Fachwelt folgt nun nach dem

positiven Echo auf das Symposium die Veröffentlichung von fünf Vorträgen in der wissenschaftlichen Buchreihe *ERLANGER FORSCHUNGEN* der FAU.

Damit wird der sachlichen Diskussion in einem erweiterten Interessenskreis eine ergänzende Möglichkeit angeboten und den Symposiums-Teilnehmern ein häufig geäußerter Wunsch erfüllt.

Sommersemester 2013 Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein
Dekanin der Technischen Fakultät der
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Die Energiewende in Deutschland – Chancen und Risiken¹

DIETHARD MAGER²

Zusammenfassung

Mit den Beschlüssen des Bundeskabinetts vom 6. Juni 2011 hat die Bundesregierung die Grundlagen geschaffen, um die bereits zuvor mit dem Energiekonzept der Bundesregierung auf den Weg gebrachte Energiewende zu beschleunigen. Hintergrund für die Entscheidung, die Energieversorgung noch schneller als geplant umzubauen, war die Reaktorkatastrophe von Fukushima und die politische Entscheidung, bis 2022 schrittweise auf die Nutzung der Kernenergie in Deutschland zu verzichten.

Der Ausstieg aus der Kernenergie wurde erstmals verbunden mit einem langfristigen, auf vier Jahrzehnte angelegten Gesamtkonzept für eine neue Art der Energieversorgung: Zentrale Elemente dabei sind der dynamische Ausbau der Erneuerbaren Energien sowie eine ambitionierte Steigerung der Energieeffizienz. Diese Elemente sind die Grundlage dafür, in Zukunft eine klima- und umweltverträgliche, zuverlässige sowie wirtschaftliche Energieversorgung sicherzustellen.

1 Vortrag beim Symposium „Energie und Klima – Ein Blick in die Zukunft“ am 8. November 2012 an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (mit einigen Aktualisierungen vom Januar 2013)

2 Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Scharnhorststraße 35-37, 10115 Berlin

Politisches Ziel des energiewirtschaftlichen Transformationsprozesses ist, Deutschland bei wettbewerbsfähigen Energiepreisen und unter Beibehaltung eines hohen Wohlstandsniveaus zu einer der energieeffizientesten und umweltschonendsten Volkswirtschaften der Welt zu entwickeln. Ein hohes Maß an Versorgungssicherheit, ein wirksamer Klima- und Umweltschutz sowie eine wirtschaftlich tragfähige Energieversorgung sind zugleich die Voraussetzungen dafür, dass Deutschland auch langfristig ein wettbewerbsfähiger Industrie- und Technologiestandort bleibt.

Das für Energiepolitik innerhalb der Bundesregierung federführend zuständige Bundeswirtschaftsministerium ist bestrebt, den Wettbewerb und eine marktwirtschaftliche Orientierung auf den Energiemärkten zu stärken. Damit sollen die wirtschaftliche Prosperität Deutschlands, zukunftsfeste Arbeitsplätze, Innovationen und Modernisierungspotentiale nachhaltig erhalten und gesichert werden. Eine wichtige Rolle spielt dabei das neue Energieforschungsprogramm der Bundesregierung.

1 Einführung

Die Energiewende ist auf die vier kommenden Jahrzehnte ausgerichtet. Sie beginnt nicht bei Null, sondern setzt auf einer bewegten energiewirtschaftlichen und energiepolitischen Vergangenheit auf. Im Zeitraffer einige wichtige Eckpunkte in der deutschen Nachkriegsgeschichte:

- In den 1950er Jahren legte eine stark expandierende Kohlegewinnung an Saar und Ruhr mit neuen bergbaulichen Gewinnungstechnologien und der Erschließung neuer Kohlelagerstätten die Grundlage für das deutsche „Wirtschaftswunder“.
- Die 1970er und 1980er Jahre waren geprägt von den Energiekrisen und in Verbindung damit von einer „Weg-vom-Öl-Strategie“

sowie dem Ausbau der friedlichen Nutzung der Kernenergie als quasi „heimischer“ Energiequelle.

- Nach der deutschen Wiedervereinigung und der Einbindung der ostdeutschen Stromerzeugungskapazitäten in die gesamtdeutsche Stromversorgungsstruktur begann 1998 die Liberalisierung der Energiemärkte durch das Inkrafttreten des Gesetzes zur Neuregelung des Energiewirtschaftsrechtes.
- Im Jahr 2000 wurde das Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG) verabschiedet, das das Stromeinspeisungsgesetz vom Dezember 1990 ablöste und eine rasche Markteinführung der Erneuerbaren Energien zum Ziel hatte.
- Außerdem wurde unter der damaligen rot-grünen Regierungskoalition im Jahr 2002 der „Atomausstieg“ im Atomgesetz festgeschrieben.
- 2005 begann der EU-Emissionshandel. Ziel war es, den Klimaschutz mit einem marktwirtschaftlichen Instrument innerhalb der Europäischen Union möglichst wettbewerbsneutral für die europäischen Industrieunternehmen voranzubringen.
- Im Jahr 2007 wurde der Klimaschutz zur „Chefsache“ auf der politischen Agenda: Klimaschutzfragen standen im Vordergrund des EU-Aktionsplanes, des G8-Gipfels in Heiligendamm und des Integrierten Energie- und Klimaschutzprogramms (IEKP). Grundlage und Auslöser war u.a. die am 30. Oktober 2006 veröffentlichte und viel beachtete Studie des ehemaligen Weltbank-Ökonomen Sir Nicholas Stern („*Stern Review on the Economics of Climate Change*“) über die wirtschaftlichen Folgen der globalen Erwärmung.
- Die kurzfristige Preisexplosion auf den Weltrohölmärkten im Jahr 2008 und die zweite russisch-ukrainische Gaskrise rückten die Frage der Energieversorgungssicherheit wieder verstärkt in den Fokus der öffentlichen Wahrnehmung.

Dieser holzschnittartige Rückblick zeigt, dass die deutsche Energiepolitik in den vergangenen Jahrzehnten alles andere als geradlinig verlief. Vielmehr wurden energiewirtschaftliche Entwicklungen und energiepolitische Entscheidungen in hohem Maße von externen Faktoren, neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen sowie neuen technologischen Entwicklungen und Innovationen beeinflusst. Dies wird auch in den kommenden Jahrzehnten im Verlaufe des Energiewendeprozesses der Fall sein.

2 Energiekonzept und Energiepaket

Das Bundeskabinett hat am 28. September 2010 das neue Energiekonzept beschlossen. Es handelte sich dabei um das erste Energiekonzept der Bundesregierung seit dem Jahr 1991 und war nach einem intensiven Diskussionsprozess insbesondere zwischen dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) zustande gekommen.

Das Energiekonzept enthält grundlegende Weichenstellungen für die Neuausrichtung der Energiepolitik: Erstmals wird die Kernenergie als „Brückentechnologie“ auf dem Weg in das Zeitalter der Erneuerbaren Energien beschrieben. Schwerpunkte sollten demzufolge insbesondere ein forcierter Ausbau der Erneuerbaren Energien sein, die Steigerung der Energieeffizienz, der Ausbau der Stromübertragungsnetze sowie die Gebäudesanierung. Dabei soll als ordnungspolitische Grundorientierung eine marktorientierte und technologieoffene Energiepolitik zugrunde gelegt werden. Intelligente Förderung und Anreize sollen als Steuerinstrumente Vorrang gegenüber staatlichen Zwangsmaßnahmen haben.

Dem Energiekonzept vom September 2010 liegt eine langfristige Vision bis zum Jahr 2050 mit folgenden Eckpunkten zugrunde:

- Ambitionierte Minderungsziele für Treibhausgase

Die Energiewende in Deutschland - Chancen und Risiken

- Hohe Ausbauziele für Erneuerbare Energien
- Signifikante Effizienzsteigerungen.

Die wichtigsten quantitativen Ziele und Meilensteine sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Für die Umsetzung sieht das Energiekonzept ein konkretes Maßnahmenprogramm mit über 100 Einzelmaßnahmen in 9 Handlungsfeldern vor, außerdem einen umfassenden Finanzierungsplan und schließlich die Begleitung aller Maßnahmen durch ein wissenschaftlich fundiertes Monitoring.

	<i>heute</i>	<i>2020</i>	<i>2030</i>	<i>2040</i>	<i>2050</i>
Absenkung Treibhausgasemissionen (ggü. 1990)	- 23 %	- 40 %	- 55 %	- 70 %	- 80 %
Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch	11 %	18 %	30 %	45 %	60 %
Anteil der erneuerbaren Energien am Stromverbrauch	20 %	35 %	50 %	65 %	80 %
Absenkung Primärenergieverbrauch (ggü. 2008)	- 6 %	- 20 %			- 50 %

Tabelle 1: Ziele und Meilensteine im Energiekonzept vom Oktober 2010

Das Energiekonzept war durch umfassende wirtschaftswissenschaftliche Begleitforschung untermauert worden. PROGROS AG (Basel), EWI (Köln) und GWS (Osnabrück) hatten im Auftrag des BMWi und des BMU zahlreiche Szenarienanalysen durchgeführt. Die wichtigsten Ergebnisse:

- Die Energiewende werde zu erheblichen Kostenbelastungen führen.
- Allerdings seien durch die (damals noch geplante) Laufzeitverlängerung für Kernkraftwerke unter den zugrunde gelegten Annahmen nur moderate volkswirtschaftliche Vorteile zu erwarten, insbesondere mit Blick auf die Wirkung auf die Strompreise.
- Dagegen würden sich deutliche volkswirtschaftliche Vorteile durch die Energiewende ergeben, sofern der Strukturwandel effizient durchgeführt werde.
- Insgesamt würden die Stromimporte zwar ansteigen, die Energiewende werde langfristig jedoch zu einer Verringerung der Importe an Primärenergieträgern führen.

Soweit zum Energiekonzept der Bundesregierung, das im September 2010 – ein halbes Jahr vor Fukushima – vom Bundeskabinett beschlossen wurde .

Die im März 2011 durch den verheerenden Tsunami ausgelösten Ereignisse am japanischen Kernkraftwerksstandort Fukushima führten bekanntlich zu einem energiepolitischen Umdenken über die künftige Rolle der Kernenergie, insbesondere mit Blick auf die im Energiekonzept angelegte Laufzeitverlängerung. Die oben beschriebenen wirtschaftswissenschaftlichen Szenarienanalysen wurden um kurzfristig beauftragte Zusatzszenarien mit beschleunigtem Ausstieg ergänzt. Deren Ergebnisse waren, in den wesentlichen Punkten zusammengefasst:

- Ein beschleunigter Kernenergieausstieg bis 2022 werde nur zu moderaten negativen makroökonomischen Effekten führen.
- Die unmittelbar nach Fukushima vorzeitig vom Netz genommenen nuklearen Stromerzeugungskapazitäten würden kurzfristig insbesondere durch Einsatz von Steinkohle, mittelfristig von Erdgas und langfristig durch Erneuerbare Energien ersetzt.
- Langfristig gebe es positive volkswirtschaftliche Effekte, Voraussetzung dafür sei allerdings das Zustandekommen eines internationalen Klimaschutzabkommens.
- Der beschleunigte Ausstieg werde im übrigen zu einem mäßigen Strompreisanstieg für die Privathaushalte führen, allerdings werde die Wettbewerbsfähigkeit der energieintensiven Industrie durch höhere Kosten substanziell beeinträchtigt, sofern keine Gegenmaßnahmen (Kompensationen) ergriffen werden.

Der beschleunigte Ausstieg wurde auf dieser Grundlage bis zum Juni 2011 in ein umfangreiches Gesetzespaket („Energiepaket“) gegossen. Energiekonzept und Energiepaket bilden gemeinsam nunmehr die Basis für die Umsetzung der Energiewende. Die wichtigsten Handlungsfelder werden im Folgenden näher beschrieben.

3 Ausbau der Stromübertragungsnetze

Der Ausbau der Stromübertragungsnetze ist die entscheidende Voraussetzung für die Energiewende. Im Kern geht es dabei um die Transformation einer historisch gewachsenen Stromnetzinfrastruktur: Fossile und nukleare Kraftwerke haben in der Vergangenheit relativ nahe an den Verbraucherzentren der dicht besiedelten Industrieregionen Deutschlands in Höchstspannungsübertragungsnetze eingespeist, Erneuerbare Energien speisen künftig hingegen eher dezentral in die Verteilnetze ein. Eine derartige grundlegende Änderung der Infrastruktur kann nicht über Nacht realisiert werden.

Der bisherige Netzausbau hinkt hinter dem Ausbau der Erneuerbaren Energien hinterher. Erforderlich ist eine schnelle Ermittlung des künftigen Netzausbaubedarfes. Daher ist erstmalig eine koordinierte, deutschlandweite Netzentwicklungsplanung durch die Bundesnetzagentur vorgesehen; an ihrer Erstellung wurde im Herbst 2012 intensiv gearbeitet, sie wurde Ende 2012 vorgelegt. Die 10-jährigen Netzentwicklungspläne der Netzbetreiber werden jährlich aktualisiert. Partizipation durch umfassende intranetbasierte Konsultationen soll zu einer Erhöhung der öffentlichen Akzeptanz führen.

Durch die Regelungen des Netzausbaubeschleunigungsgesetzes soll die Planung für neue Stromübertragungsleitungen von 10 auf 4 Jahre verkürzt werden. Anders als in der Vergangenheit ist die Planfeststellung für länderübergreifende oder grenzüberschreitende Leitungen auf Bundesebene durch die Bundesnetzagentur vorgesehen.

Die deutschen Übertragungsnetze sind fest in die europäischen Strukturen eingebunden. Dies wird durch folgende Zahlen deutlich: Insgesamt war im Jahr 2011 – auch nach Abschaltung von 8 deutschen Kernkraftwerken – die Struktur der Lastflüsse gegenüber dem Ausland relativ stabil. 56 TWh wurden exportiert, 50 TWh importiert. Die gesamte inländische deutsche Stromerzeugung lag im Jahr 2011 bei 609 TWh. Aufgrund des höheren Strompreisniveaus in Deutschland wurden marktgetrieben die Importe aus Frankreich und aus der Tschechischen Republik im Vergleich zu den Vorjahren erhöht; gleichzeitig wurde deutscher Strom verstärkt nach Österreich, in die Schweiz und in die Niederlande exportiert. Dies verdeutlicht, dass die Lastflüsse gegenüber dem Ausland nicht von Knappheiten, sondern vom Strommarkt getrieben sind, ein deutlicher Beleg für die Funktionsfähigkeit des europäischen Strom-Binnenmarktes und ein Grund dafür, den deutschen Netzausbau weiterhin an der Struktur des europäischen Stromnetzes auszurichten.

4 Kraftwerke und Speicher

Abbildung 1 zeigt eine Karte der Verteilung der Kraftwerkskapazitäten in Deutschland. Die großen Anlagen befinden sich meist in unmittelbarer Nähe der Verbraucherzentren bzw. bei Braunkohlekraftwerken in unmittelbarer Nähe der entsprechenden Lagerstätten.

Die Energieversorgungssicherheit ergibt sich vor allem aus gesicherter Kraftwerksleistung und Netzstabilität. Die Stilllegung von 8 Kernkraftwerken im Frühjahr 2011 hat die Situation der Versorgungssicherheit in Deutschland merklich verschlechtert. Die Übertragungsnetzbetreiber müssen mittlerweile immer häufiger in den Strommarkt eingreifen, um die Netzstabilität zu gewährleisten. Bei zu viel Strom im Netz müssen Windanlagen vom Netz genommen und Kraftwerke heruntergefahren werden. Bei zu wenig Strom im Netz oder bei Engpässen müssen weniger effiziente Kraftwerke angeworfen werden.

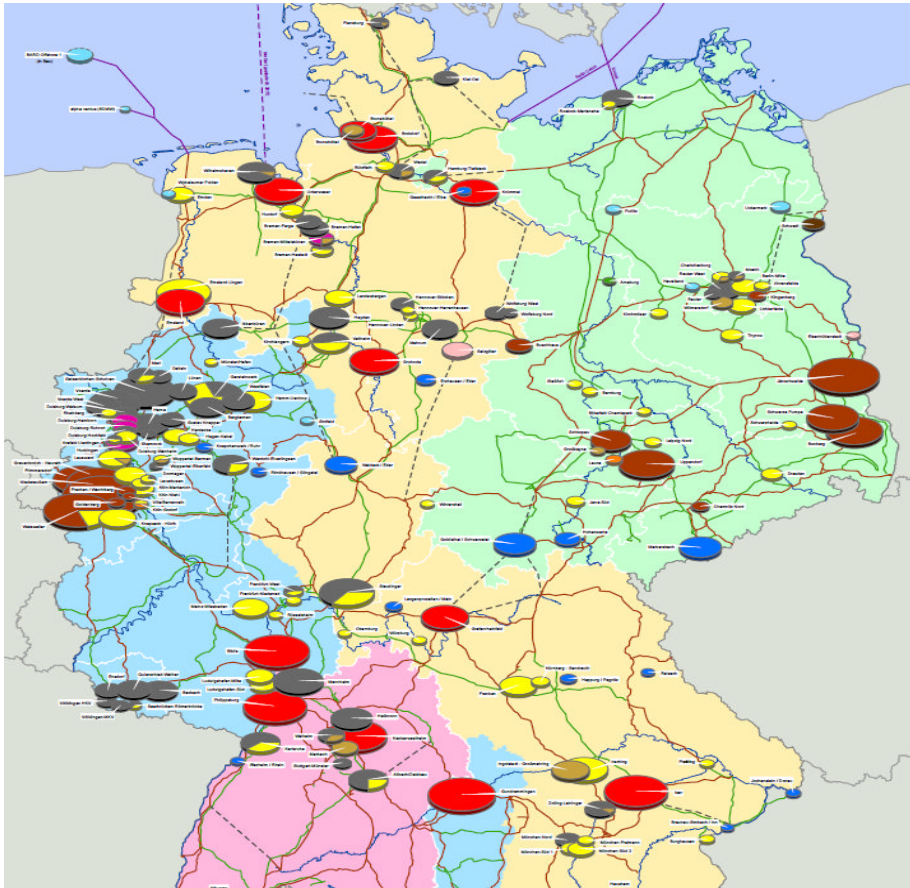
Trotz der 2011 vom Netz genommenen Kernkraft-Erzeugungskapazitäten von rund 8,4 GW ist die Versorgungssicherheit derzeit gewährleistet. Gleichwohl bleibt die Netzsituation vorerst angespannt. Als zusätzliche kurzfristige Vorsorgemaßnahme wurden für den Winter 2012 / 2013 über 2,5 GW Reservekapazität unter Vertrag genommen. Mittelfristig, für die darauf folgenden Winter, wurden Übergangsregelungen durch die sog. „Wintergesetze“ rechtlich festgeschrieben. Langfristig besteht die Notwendigkeit, einen neuen ordnungspolitischen Rahmen für die Stromerzeugung zu schaffen, um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Wie dieser neue Ordnungsrahmen aussehen wird, ist derzeit Gegenstand intensiver Diskussion und wissenschaftlicher Studien zu den sog. Kapazitätsmechanismen. Bis Mitte 2013 werden wir hier voraussichtlich mehr Klarheit haben. Klar ist aber bereits jetzt, dass die Stabilität der Übertragungs- und Verteilnetze bei einem neuen Strommarktdesign der Zukunft von besonderer Bedeutung sein wird. Diese sind bereits jetzt einer erhöhten Belastung in Nord-Südrichtung ausgesetzt, die

tendenziell weiter zunehmen wird. Außerdem führt der Mangel an Kraftwerken mit Systemdienstleistungen dazu, dass Blindleistung und Kurzschlussleistung zunehmend regional erbracht werden müssen.

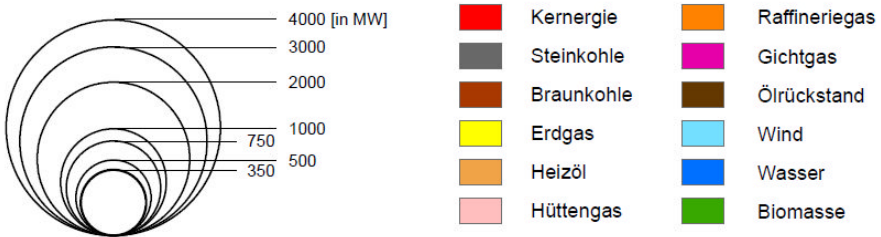
Die Volatilität der Erneuerbaren Energien erfordert eine Speicherung von Strom. Allerdings gibt es hierbei eine Vielzahl an Problemen. Zum einen ist der Bedarf nur sehr schwer prognostizierbar, er ist in hohem Maße abhängig vom Netzausbau. Voraussichtlich wird nach Expertenaussagen etwa ab dem Jahr 2030 ein starker Anstieg des Speicherbedarfes vorliegen, auch bei massivem Netzausbau. Alternativen zu Speichern sind schnell regelbare Erzeugungseinheiten (z.B. Gasturbinen) oder ein stärkeres Lastmanagement. Das Gesamtzusammenspiel ist aus heutiger Sicht noch eine Gleichung mit vielen Unbekannten.

Zu diesen Unbekannten zählt auch der Stand der Entwicklung von Speichertechnologien. Technisch reif, wirtschaftlich tragfähig und erprobt sind derzeit nur Pumpspeicher. Sie weisen Kosten von ca. 4 bis 11 Cent pro kWh auf. Andere Technologien müssen erst noch entwickelt bzw. an einen Wirtschaftlichkeitsstand herangeführt werden, der ihren kommerziellen Einsatz erlaubt. Hierzu gehören die Druckluft- und Wasserstoffspeicherung, die Speicherung von Wasserstoff aus Überschuss-Strom im Gasnetz, die *Power-to-Gas-Technologie* oder die *Power-to-Gas-to-Power-Technologie* mit (derzeit noch) relativ niedrigen Gesamtwirkungsgraden und hohen spezifischen Kosten.

Die Energiewende in Deutschland - Chancen und Risiken



Kraftwerke ab 100 Megawatt



(Quelle: UBA)

Abb. 1: Kraftwerkskapazitäten in Deutschland

5 Erneuerbare Energien

Das im Jahr 2000 in Kraft getretene Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) hat das seinerzeitige Ziel einer umfassenden Markteinführung der Erneuerbaren Energien in vollem Umfang erreicht. Erneuerbare Energien hatten im Jahr 2012 bereits einen Anteil von 21,9 % an der gesamten deutschen Stromerzeugung, und sie trugen mit etwa 11 % zum Primärenergieverbrauch bei. Ein großer Teil entfiel auf Windenergie, Biomasse und Wasserkraft, ein kleinerer auf die Photovoltaik (Abbildung 2). Erneuerbare Energien sind allerdings nach wie vor trotz stark gesunkener Preise für die Anlageninvestitionen nicht am Markt wettbewerbsfähig und werden daher insbesondere durch den Einspeisevorrang und durch eine umlagefinanzierte Förderung subventioniert.

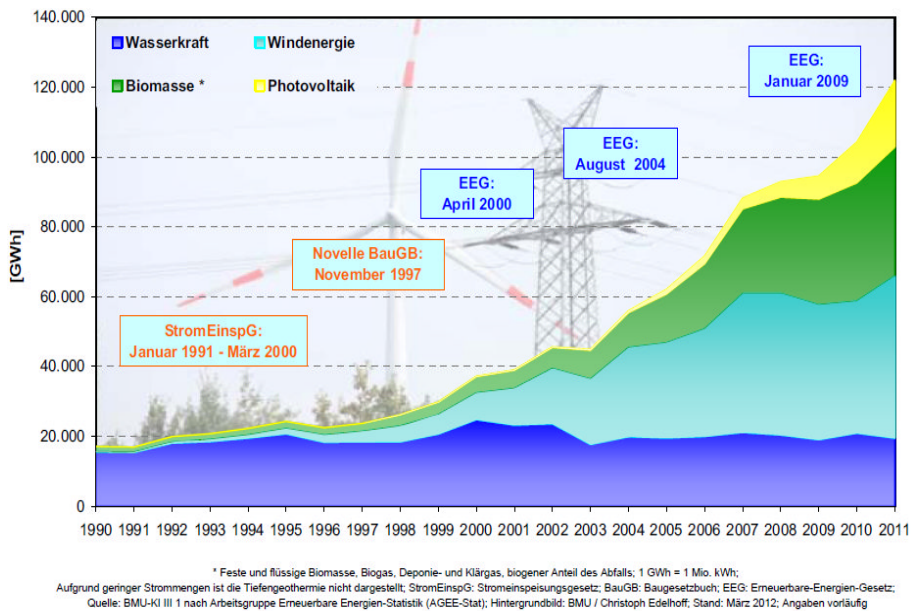


Abb. 2: Entwicklung der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien in den Jahren 1990 bis 2011

Aufgrund der stark angestiegenen, von allen Stromverbrauchern zu tragenden Umlagefinanzierung, die zu einem großen Teil auf den intensiven Ausbau von Photovoltaikanlagen insbesondere in Süddeutschland zurückgeht, war 2012 eine Novellierung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes erforderlich geworden. Ziel war es, eine verbesserte Fördereffizienz zu erreichen, ohne die Grundprinzipien des Einspeisevorrangs und der umlagefinanzierten Einspeisevergütungen aufzugeben. Die Fördersätze sollten – auch mit Blick auf den nicht mit dem Ausbau der Erneuerbaren Energien schritthaltenden Netzausbau – dazu führen, dass der Ausbau der Photovoltaik auf einen Korridor von 2.500 bis 3.500 Megawatt begrenzt wird. Der Zubau hatte 2010 7.400 Megawatt und 2011 7.500 Megawatt betragen.

Die beabsichtigte Ausbaubegrenzung wurde, soweit dies heute erkennbar ist, nicht erreicht: 2012 wurden Photovoltaikanlagen mit einer Erzeugungskapazität von über 7.600 Megawatt gebaut und in Betrieb genommen, die monatlichen Zubauwerte lassen aufgrund des von Preisverfall und Überkapazitäten geprägten Weltmarktes für Photovoltaik-Module einen weiteren ungebremsten Anstieg erwarten, der zu weiter steigenden umlagefinanzierten Förderkosten führen wird. Im Jahr 2013 wird die von den Stromverbrauchern zu tragende Umlage von 3,592 auf 5,277 Cent pro kWh steigen (Abbildung 3), das gesamte Umlagevolumen wird etwa 20 Mrd. Euro betragen.

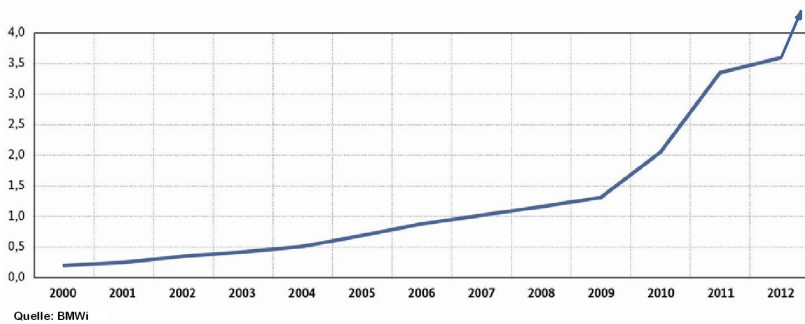


Abb. 3: Die Entwicklung der EEG-Umlage von 2000 bis 2012 in Cent pro kWh. Mitte Oktober 2012 wurde bekannt gegeben, dass die Umlage für 2013 5,277 Cent pro kWh betragen wird

Bei den Erneuerbaren Energien kommt der Windenergie eine Schlüsselrolle zu. Insbesondere von Offshore-Anlagen werden große Erzeugungspotentiale mit einer hohen Anzahl von Volllaststunden im Jahr erwartet. Die Kreditanstalt für Wiederaufbau hat für die Einrichtung von Offshore-Anlagen ein 5 Mrd. Euro Kreditprogramm eingerichtet. Bei der Einspeisevergütung werden Offshore-Anlagen durch ein so genanntes Stauchungsmodell mit höheren Vergütungssätzen in den Anfangsjahren unterstützt. Aber auch für Onshore-Windanlagen wurde im Zuge der jüngsten EEG-Novelle die Voraussetzungen für das Repowering älterer Anlagen erleichtert.

Für die Erneuerbaren Energien, die inzwischen mit hohen Anteilen an der Stromerzeugung „erwachsen geworden“ sind, besteht ein dringender Bedarf an weit reichenden Reformen: Das Erneuerbare-Energien-Gesetz muss von einem Fördergesetz mit dem Ziel der Markteinführung hin zu einem Marktordnungsgesetz entwickelt werden. Aufgrund der Volatilität der Einspeisung eines Großteils der Erneuerbaren Energien muss das Zusammenspiel zwischen dem konventionellen Kraftwerkspark und der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien optimiert werden. Strom aus Erneuerbaren Energien muss zunehmend bedarfsgerecht erzeugt werden und Sys-

temdienstleistungen für die Netz- und Versorgungssicherheit erbringen. Dies könnte beispielsweise durch eine verpflichtende Kombination volatiler Erneuerbarer Energien mit Speichertechnologien und flexiblen konventionellen Kraftwerken ermöglicht werden.

Die Entwicklung der Einspeisevergütungen für Erneuerbare Energien hat aufgrund ihrer Auswirkungen auf die Strompreise weitreichende sozialpolitische, industriepolitische und mittelstandspolitische Implikationen. Zu erwarten ist, dass dies in der energiepolitischen Diskussion im bevorstehenden Wahlkampfjahr eine herausgehobene Rolle einnehmen wird. Bereits jetzt werden erste Ansätze für Reformvorschläge diskutiert. Einige Stichworte sind dabei weitere, stärkere Degressionsschritte der Einspeisevergütungen, die Prüfung der Ausnahmeregelungen für energieintensive, im internationalen Wettbewerb stehende Industrieunternehmen, Wechsel zu einem Quoten- bzw. Mengensystem für Erneuerbare Energien, Einspeiseprämie in Verbindung mit einem Ausschreibungsverfahren und die europäische Harmonisierung der Fördersysteme.

Die Reform des Erneuerbare-Energien-Gesetzes wird in den kommenden Jahren zu einem Prüfstein für die Energiewende. Im Kern geht es um die Frage, ob es gelingt, auf einem schmalen Grat die richtige Balance zu finden: Zum einen mit einem sinnvollen, mit dem Netzausbau synchronisierten Zubau von Erzeugungskapazitäten und zum anderen mit der Bezahlbarkeit von Strom – für Privathaushalte sowie für die Wirtschaft; denn es gilt, den Lebensnerv unseres Wohlstands, die Wettbewerbsfähigkeit unserer Industrie und unserer mittelständischen Unternehmen zu erhalten.

6 Energieeffizienz

Die substantielle Steigerung der Energieeffizienz ist Schlüssel zum Erreichen der ehrgeizigen Ziele des Energiekonzeptes. Fördern und Fordern müssen dabei in einem vernünftigen Verhältnis stehen. An-

reize sind vorzuziehen, Zwangsmaßnahmen etwa zum Stromsparen oder zur energetischen Sanierung von Häusern sind nicht zielführend.

Die Kreditanstalt für Wiederaufbau hat ihr bewährtes Gebäudesanierungsprogramm ab 2012 auf 1,5 Mrd. Euro und ab 2013 auf 1,8 Mrd. Euro pro Jahr erhöht. Bedauerlich ist in diesem Zusammenhang, dass der Bundesrat steuerlichen Abschreibungsmöglichkeiten im Gebäudesektor wegen befürchteter Mindereinnahmen in den Länderhaushalten bisher nicht zugestimmt hat. Mit einer neuen gemeinsamen Mittelstandsinitiative Energiewende unterstützen das Bundeswirtschaftsministerium, das Bundesumweltministerium, der Deutsche Industrie- und Handelskammertag sowie der Zentralverband des Deutschen Handwerks ab 2013 mittelständische Unternehmen durch Informationen und Expertise zur Steigerung der Energieeffizienz. Auch bei der öffentlichen Beschaffung sollen hohe Effizienzstandards künftig ein wichtiges Kriterium bei der Vergabe öffentlicher Aufträge sein.

Abbildung 4 zeigt, dass wir bei der Energieeffizienz auf einem guten Weg sind. Die im Auftrag des BMWi in den vergangenen 20 Jahren angefertigten Energieprognosen und –szenarien zeigen beachtliche degressive Primärenergieverbräuche – je jünger diese Studien sind, umso stärker und damit optimistischer bezüglich der Energieeinsparung fällt dieser Trend bei den Prognosen aus. Die tatsächliche Entwicklung des Primärenergieverbrauches in Deutschland bis zum Jahr 2012 liegt – mit konjunkturbedingten Schwankungen – in etwa auf der Degressionslinie des optimistischsten jüngsten Szenarios, das im Jahr 2011 erstellt wurde und eine Verbrauchsreduktion von 15.000 Petajoule in 1990 auf unter 10.000 Petajoule im Jahr 2030 prognostiziert.

Die Energiewende in Deutschland - Chancen und Risiken

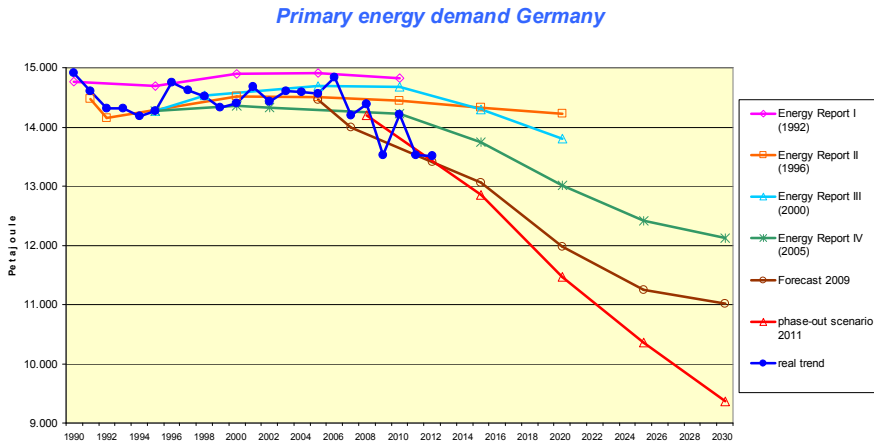


Abb. 4: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in Deutschland: Prognosen und Szenarien 1992 bis 2011 werden der tatsächlichen Entwicklung (dunkelblau) gegenübergestellt

7 Energieforschung

Das Bundeskabinett hat am 3. August 2011 das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung beschlossen. Das neue Programm soll einen wichtigen Beitrag zur Erfüllung der energiewirtschaftlichen und klimapolitischen Vorgaben der Bundesregierung leisten. Die Energieforschungspolitik ist damit zu einem strategischen Instrument der Energiepolitik geworden.

Das Programm enthält aber auch eine industriepolitische Komponente: Verstärkt sollen modernste Energietechnologien „made in Germany“ für die Weltmärkte entwickelt werden und die Exportchancen deutscher Unternehmen verbessern.

Darüber hinaus soll die Energieforschung einen Beitrag zur gesamtwirtschaftlichen und gesellschaftlichen Risikovorsorge leisten. Insbesondere sollen technologische Zukunftsoptionen gesichert und erweitert werden. Gleichzeitig soll die Flexibilität in der Energiever-

sorgung gewahrt werden, ein wichtiger Aspekt angesichts der in Kapitel I beschriebenen energiewirtschaftlichen und energiepolitischen Imponderabilien.

Thematisch ist das neue Energieforschungsprogramm auf Energieeffizienz, Erneuerbare Energien, Speicher, Netze sowie auf die Integration Erneuerbarer Energien in die Energieversorgungssysteme fokussiert. Durch eine enge ressortübergreifende Zusammenarbeit werden die Kernkompetenzen der verschiedenen zuständigen Bundesministerien synergetisch genutzt. Eine verstärkte internationale Kooperation konzentriert sich auf strategisch wichtige Bereiche wie die Mitarbeit an der Umsetzung des Europäischen Strategieplans für Energietechnologien (SET-Plan). Die Koordinierungsplattform Energieforschungspolitik wird gestärkt und auf Aktivitäten der Bundesländer und der EU ausgeweitet.

Die finanziellen Mittel des Bundes für die Energieforschung wurden deutlich erhöht. Für den Zeitraum 2011 bis 2014 stehen insgesamt 3,5 Mrd. Euro zur Verfügung, das sind 75 % mehr als in der vorausgegangenen Vergleichsperiode. Beispiele für Schwerpunkte der Projektförderung, die vom Bundeswirtschaftsministerium betreut werden, sind

- Energieeffizienz im Gebäudebereich und energieoptimiertes Bauen
- Energieeffiziente Stadt und dezentrale Energiesysteme
- Energieeffizienz in Industrie, im Gewerbe, im Handel und bei Dienstleistungen
- Energiespeicher für stationäre und mobile Anwendungen
- Netze für die Stromversorgung der Zukunft
- Kraftwerkstechnik und CCS-Technologien (Carbon Capture and Storage)
- Brennstoffzellen und Wasserstoff

- Systemanalyse und Informationsverbreitung
- Reaktorsicherheits- und Endlagerforschung

Zahlreiche Firmen und Institutionen aus dem Großraum Erlangen-Nürnberg sind an diesen Projekten beteiligt.

Im Bereich der Grundlagenforschung werden langfristig orientierte technologische und gesellschaftliche Optionen auf dem Gebiet der Energieforschung vom Bundesforschungsministerium gefördert, teilweise im Rahmen der Projektförderung oder durch institutionelle Förderung der Großforschungseinrichtungen (Helmholtz-Gemeinschaft, Fraunhofer Gesellschaft, Max Planck Gesellschaft, Leibniz-Gemeinschaft). Hierzu gehört auch die Kernfusionsforschung als mögliche Option für eine langfristige, grundlastfähige Energieerzeugungstechnologie jenseits des auf den Zeithorizont bis 2050 orientierten Energiekonzeptes.

8 Dialog und Kommunikation

Neben den regelmäßig tagenden politischen Gremien (Energiegespräche der Bundeskanzlerin mit den Ministerpräsidenten und Ministerpräsidentinnen der Länder, Steuerungskreis der Bundesressorts zur Energiewende auf Staatssekretärebene) haben die Bundesministerien für Wirtschaft und für Umwelt Dialogplattformen eingerichtet, um in engem Gedankenaustausch mit den Akteuren und mit gesellschaftlichen Gruppierungen energiepolitische Fragen zu erörtern und Entscheidungen vorzubereiten. Hierzu gehört die Plattform „Zukunftsfähige Energienetze“, die über einen Beirat und eine eigene Geschäftsstelle im BMWi verfügt und in 9 Arbeitsgruppen Fachfragen beispielsweise zu Genehmigungsverfahren, Regulierung, neue Technologien, Speicher u.a. erörtert und Vorschläge erarbeitet.

Das „Kraftwerksforum“ wurde im Sommer 2011 gegründet und dient insbesondere dem Austausch zwischen Politik, Energiewirt-

schafts- und Umweltverbänden zu den für die Stromerzeugung wesentlichen energiewirtschaftlichen Fragen. In diesem Forum werden u.a. die bereits erwähnten Fragen zu „Kapazitätsmechanismen“ erörtert.

Die Plattform „Erneuerbare Energien“ ist beim Bundesumweltministerium angesiedelt und verfügt über 3 Arbeitsgruppen.

9 Monitoring

Gemäß Beschluss des Bundeskabinetts wird von der Bundesregierung jährlich ein Monitoringbericht erstellt, in dem auf der Grundlage umfassender insbesondere energiestatistischer Daten faktenorientiert der Stand der Umsetzung der Energiewende dargestellt wird. Alle drei Jahre wird ein Fortschrittsbericht vorgelegt, der über die Faktendarstellung hinaus bewertende Aussagen über die Zielerreichung der Energiewende oder mögliche Fehlentwicklungen enthalten soll.

Eine vierköpfige wissenschaftliche Expertenkommission wurde berufen, um den jährlichen Bericht der Bundesregierung begleitend mit einer Stellungnahme zu versehen. Bericht und Expertenstellungnahme werden jeweils gemeinsam nach der Beschlussfassung durch das Bundeskabinett dem Deutschen Bundesrat und dem Bundesrat zugeleitet.

Der erste Monitoringbericht, der sich auf Daten des Jahres 2011 bezieht, ist Mitte Dezember 2012 dem Bundeskabinett vorgelegt und anschließend in einer Pressekonferenz von den Bundesministern Dr. Rösler und Altmaier der Öffentlichkeit vorgestellt worden.

10 Kosten der Energiewende

Die Kosten der auf mehrere Dekaden angelegten Energiewende sind heute nicht im einzelnen bezifferbar. Klar ist aber, dass die Energie-

wende erhebliche Investitionen erfordern und hohe Kosten generieren wird. Dabei ist deutlich zu unterscheiden zwischen Kosten der Energiewende und den Kosten, die durch den Kernenergieausstieg bedingt sind.

Die jüngsten Szenarienrechnungen zum Energiekonzept und Energiepaket gehen von jährlichen Mehrinvestitionen bis 2050 in Höhe von 15 Mrd. Euro pro Jahr aus, ein Betrag, der immerhin 0,5 % des derzeitigen Bruttoinlandsproduktes entspricht. Die Kosten für den beschleunigten Ausstieg aus der Kernenergie bis 2022 werden nach Berechnungen verschiedener Institute auf 0,5 bis 1,5 Cent pro kWh beziffert, je nach zugrunde gelegten Annahmen der Szenarien.

Die Kosten der Energiewende tragen letztlich die Verbraucher. Allein die Umlage für die Einspeisevergütungen nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz betrug 2012 rund 14 Mrd. Euro (3,592 Cent pro kWh), davon entfielen 7,5 Mrd. Euro auf die Photovoltaik. Im Jahr 2013 wird die Umlage für Erneuerbare Energien wie oben beschrieben rund 20 Mrd. Euro betragen (5,277 Cent pro kWh). Da die Einspeisevergütungen gesetzlich für 20 Jahre fixiert sind, liegen die bisher eingegangenen und in den kommenden Jahren von den Verbrauchern aufzubringenden Förderverpflichtungen allein für die Photovoltaik bereits bei über 100 Mrd. Euro.

Der Entwurf des Netzentwicklungsplanes sieht Investitionen in den Ausbau der Stromübertragungsleitungen in Höhe von 20 Mrd. Euro bis 2030 vor. Ausnahmeregelungen wie die Netzentgeltbefreiung sichern die Wettbewerbsfähigkeit energieintensiver Industrieunternehmen, verlagern allerdings Kosten auf die übrigen Verbraucher (Haushalte, Mittelstand).

Ein Blick in die Statistik verdeutlicht den Anstieg der Energiekosten in den letzten 20 Jahren: Die Kosten eines durchschnittlichen Vierpersonenhaushaltes für Kraftstoffe, Erdgasheizung und Strom lagen im Jahr 1990 etwa bei 1.800 Euro und entsprachen damit etwa 5,5 % des damaligen durchschnittlichen Nettoeinkommens. Im Jahr

2011 gab dieser Musterhaushalt knapp 4.000 Euro für Energie aus, was etwa 7 % des mittlerweile angestiegenen Durchschnitts-Nettoeinkommens entspricht. Dieser steigende Trend der Energiekosten für die Verbraucher wird durch die Energiewende voraussichtlich deutlich verstärkt werden.

11 Schlussbemerkungen

Bei der Energiewende handelt es sich um einen grundlegenden Transformationsprozess unserer Energieinfrastruktur, der auf mehrere Jahrzehnte angelegt ist. Sie bietet für die deutschen Unternehmen wirtschaftliche Chancen. Gleichzeitig ist allerdings eine sichere und bezahlbare Energieversorgung entscheidend für den Industriestandort Deutschland und damit für Arbeitsplätze und Wohlstand. Wichtig ist deshalb die sorgfältige Auswahl der geeigneten Instrumente für einen möglichst effizienten Umbau des Energieversorgungssystems.

- Richtschnur der Energiepolitik der kommenden Jahre auf dem viel zitierten „Weg in das regenerative Zeitalter“ muss daher sein,
- die Erneuerbaren Energien zielgerichtet auszubauen,
- diesen Ausbau aber möglichst effizient und sicher gestalten und mit dem Netzausbau zu synchronisieren, und
- dabei die „ökonomische Vernunft“ im Auge zu behalten, d. h. die Wettbewerbsfähigkeit des Wirtschaftsstandortes Deutschland zu bewahren.

Die Energiewende ist eine große Herausforderung sowohl für die Energiepolitik als auch für die Gesellschaft insgesamt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Energiewirtschaft schon immer ein dynamisches System war und auch in der Zukunft sein wird: Technologien von heute werden weiterentwickelt und abgelöst durch Technologien

von morgen. Daher ist das technologieoffene Energieforschungsprogramm der Bundesregierung ein wichtiger Meilenstein der Energiewende.

Ich bin insgesamt zuversichtlich: Der Umbau unserer Energieversorgung ist nicht einfach, aber machbar.

Quellenangaben

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie & Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. – 33 S., Berlin 28. September 2010.

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie & Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Erster Monitoring-Bericht „Energie der Zukunft“. 125 S., Berlin Dezember 2012.

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung. 133 S., Berlin Juli 2011.

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: 2. Nationaler Energieeffizienz-Aktionsplan (NEEAP) der Bundesrepublik Deutschland gemäß EU-Richtlinie über Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen (2006/32/EG) sowie Gesetz über Energiedienstleistungen und andere Energieeffizienzmaßnahmen (EDL-G). – 109 S., Berlin, Juli 2011.

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Die Energiewende in Deutschland. Mit sicherer, bezahlbarer und umweltschonender Energie ins Jahr 2050. – Sonderheft Schlaglichter der Wirtschaftspolitik, 52 S., Berlin September 2012.

Bundesnetzagentur: Netzentwicklungsplan Strom. – 395 S. und Anhänge, Bonn 25. November 2012.

Kommission der Europäischen Gemeinschaften: Ein Europäischer Strategieplan für Energietechnologie (SET-Plan) „Der Weg zu einer kohlenstoffemissionsarmen Zukunft“. – Mitteilung der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. 16 S., Brüssel, 11. November 2007.

LÖSCHEL, A., ERDMANN, G., STAISS, F. & ZIESING, H.-J.: Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“. Stellungnahme zum ersten Monitoring-Bericht der Bundesregierung für das Berichtsjahr 2011. 138 S., Berlin/Mannheim/Stuttgart Dezember 2012.

P3 Energy GmbH & Institut für Hochspannungstechnik der RWTH Aachen: Szenarien für eine langfristige Netzentwicklung. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. – 78 S., Aachen 2. November 2012.

PROGNOS AG, Energiewirtschaftliches Institut zu Köln (EWI), Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung (GWS): Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung. Projekt Nr. 12/10 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. 193 S., Basel/Köln/Osnabrück, August 2010.

STERN, N.: Review on the Economics of Climate Change. – 712 pp, London 2007.

Umweltbundesamt: Kraftwerke in Deutschland. Datenbank Stand August 2012. Berlin.

Die Stromversorgung aus regenerativen Quellen und ihre Zwänge

GERHARD HEROLD

1 Stromversorgung als Aufgabe der Infrastruktur

Die Stromversorgung ist eine zentrale Aufgabe der Infrastruktur moderner Gesellschaften; ein Verzicht darauf ist im täglichen Leben nicht mehr vorstellbar. Aber nur etwa 20 % des Energiebedarfs in Deutschland wird über Strom gedeckt und nur ein Viertel davon wird in privaten Haushalten verbraucht. In der Menge benötigter elektrischer Energie liegt die hohe Bedeutung von Strom also nicht. Sie liegt einerseits vielmehr darin, daß die Wirtschaftskraft und der damit einhergehende Wohlstand wegen der Vorzüge elektrischer Energie fest an Strom gekoppelt sind. Andererseits ist Strom die Grundlage aller Automatisierungs- und Informationstechnik, selbst dort, wo er als Energiequelle keine Bedeutung besitzt, also sein Beitrag zur Energieversorgung des Prozesses selbst vernachlässigbar ist. Gerade dadurch ist eine totale Abhängigkeit von Strom entstanden. Wegen der Unumkehrbarkeit dieser Entwicklung ist die Umstellung der Stromversorgung auf neue, regenerative Primärenergiequellen nicht einfach nur eine Maßnahme der „Energiewende“, sondern sie kommt einem Eingriff in das zentrale Nervensystem moderner Staaten gleich, der mit Achtsamkeit, Umsicht und Weitblick ausgeführt werden muß.

2 Prozeß der elektrischen Energieversorgung

Alle von Menschen angestrebte Entwicklung sollte sich am Ideal orientieren, wenn auch dieses niemals erreichbar sein wird. Der idea-

le Prozeß der Stromversorgung verläuft bei konstanter Leistung, wie jeder andere Transportprozeß bei konstantem Mengendurchsatz pro Zeiteinheit ebenfalls ideal verläuft. Dieses Ideal zeichnet sich durch geringsten Materialaufwand, minimale Verluste und maximalen Wirkungsgrad aus. Bei frei verfügbaren Ressourcen sind die Kosten des idealen Prozesses minimal. Minimale Kosten, „Bezahlbarkeit“ aber scheinen für die „Energiewende“ keinesfalls auszureichen, wenn aus ihr keine „Rohstoffkrise“ erwachsen soll.

In kleinen Zeiten betrachtet, ist der ideale Prozeß der Stromversorgung nur bei Gleichstrom oder Drehstrom mit sinusförmigen und symmetrischen Strömen und Spannungen durchführbar, da die Leistung nur bei diesen beiden Stromsystemen zeitlich konstant sein kann. Aber auch dann wird der reale Prozeß wegen der Unterschiede zwischen Tag und Nacht, dem Wechsel der Jahreszeiten und den damit einhergehenden Lebens- und Wirtschaftsgewohnheiten vom Ideal abweichen. Die äußerst volatile Stromerzeugung aus Wind und Sonne trägt in starkem Maße zu den Abweichungen vom Ideal bei.

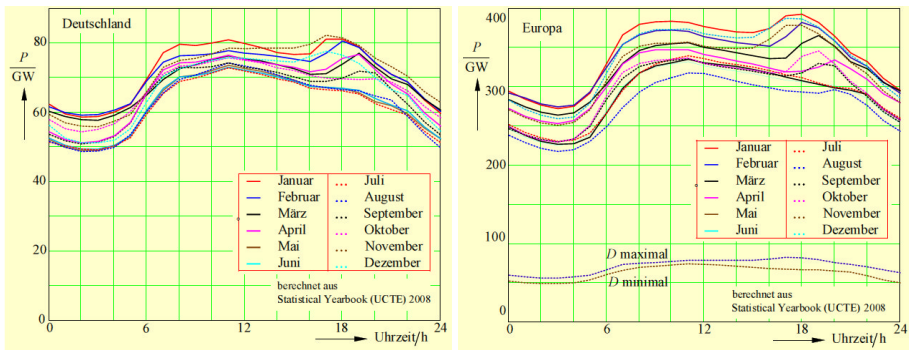


Bild 1: Tagesbelastungsgänge im deutschen und im europäischen Verbundnetz

Die Tagesbelastungsgänge nach Bild 1 im deutschen und im europäischen Verbundnetz sind sehr ähnlich. Sie unterscheiden sich lediglich

in der Höhe der Leistungen. Das Geschäfts- und Wirtschaftsgeschehen hat Europa „synchronisiert“, d.h., der Belastungsausgleich infolge der territorialen Ausdehnung unseres Erdteils ist gering.

3 Beanspruchung der Systemelemente bei der Stromversorgung

Der Prozeß der Stromversorgung führt zu einer Beanspruchung der Komponenten und Betriebsmittel elektrischer Netze, die nahezu unabhängig voneinander durch Belastung mit Strom und Spannung hervorgerufen wird. Der Aufwand für eine aus Strom und Spannung gebildete Leistung ist deshalb minimal, wenn die Aufwände für die Stromleitung und für die Spannungsisolierung gleich sind. Ein elektrisches Energieversorgungssystem muß daher mehrere Spannungsebenen besitzen. Da Gleichstrom nicht transformierbar ist, bleibt als Stromsystem nur Drehstrom mit symmetrischen Strömen und Spannungen übrig. Das soll hier die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) einschließen, deren Enden stets mit Drehstromnetzen verbunden sind.

Innerhalb einer Spannungsebene steigt das Volumen des Leitermaterials und mit ihm die Stromleitungsverluste stärker als quadratisch mit dem Strom bzw. der Leistung an. Je größer die Leistung ist, desto höher muß die Spannung sein, wenn ein Netz ressourcenschonend errichtet und betrieben werden soll. Auch bei Speisung aus regenerativen Quellen kann somit der Leistungsfluß nicht einfach vom Nieder- zum Hochspannungsnetz umgedreht werden. Das ist nur in einer Übergangszeit zu rechtfertigen. Eine zukunftssträchtige Lösung erfordert neue, der regenerativen Stromerzeugung angepaßte Netzkonzepte.

Die Übertragung elektrischer Energie ist aufwändiger als der Transport von Gas, Kohle und vieler anderer Energieträger. Abnehmer- und Erzeugerschwerpunkte sollten daher mit der höchsten

Erzeugerleistungsdichte in oder in der Nähe von Ballungszentren dicht beieinander liegen. Praktisch wird, häufig aus guten Gründen, von diesem Ideal der dezentralen Stromversorgung oft abgewichen, z.B. weil die Vorteile und Synergien des Verbundbetriebes mit Kraftwerken unterschiedlicher Betriebscharakteristik oder Wasserkraft bzw. nicht transportwürdige Braunkohle genutzt werden sollen. Auch eine territorial unausgeglichene Windstromerzeugung führt zu einer stärkeren Trennung von Abnehmer- und Erzeugerstandorten. Und schließlich gelten in der marktwirtschaftlich orientierten Elektrizitätswirtschaft mit ihrem ausgeprägten Stromhandel andere Kriterien, die ein kostspieligeres Netz verlangen.

Bei gegebener Beanspruchung durch Strom und Spannung ist die Nennleistung eines elektrischen Betriebsmittels dem Produkt zweier Querschnittsflächen, also der vierten Potenz einer Länge, proportional. Die Leistung wächst somit stärker als das Volumen oder die Masse. Wegen der ebenfalls dem Volumen proportionalen Verluste steigt mit der Leistung der Wirkungsgrad. Ein elektrisches Betriebsmittel wird deshalb sowohl im Hinblick auf den Materialeinsatz als auch auf die Betriebsverluste um so wirtschaftlicher, je größer seine Leistung ist. Daraus erklärt sich der Trend zu immer größeren Bau- und Nennleistungen, der jedoch aus hier nicht zu besprechenden Erwägungen seine Grenzen hat. Für die regenerative Stromerzeugung ist die Umkehrung dieses Wachstumsgesetzes von großer Bedeutung, denn man muß wissen, daß viele kleine Stromerzeuger mehr Material benötigen, mit größeren Verlusten arbeiten und einen niedrigeren Wirkungsgrad besitzen als ein entsprechend großer. Regenerative Stromerzeugung muß allein aus diesem Grund aufwändiger sein als konventionelle.

4 Abnehmer der Stromversorgung

Der entscheidende Vorteil der Stromversorgung besteht in ihrer absoluten Freizügigkeit. Jeder Abnehmer kann bei passenden Anschluß-

Die Stromversorgung aus regenerativen Quellen und ihre Zwänge

bedingungen völlig frei entscheiden, wann, wie lange und mit welcher Leistung er Strom beziehen will, solange es dem Versorger technisch und wirtschaftlich gelingt, die Erzeugung ständig mit der dynamisch veränderlichen Abnahme im Gleichgewicht zu halten.

Der Elektroherd nach Bild 2, oben links, stellt eine sehr unausgeglichene Last dar. Wollte man nur für ihn ein „Kraftwerk“ bauen, so müsste es eine Leistung von 3800 W besitzen. Könnte man dagegen die zum Kochen benötigte elektrische Energie über eine Zeit von vierundzwanzig Stunden beziehen, dann bräuchte man ein „Kraftwerk“ mit einer Leistung von nicht mehr als 335 W und würde so die Wirtschaftlichkeit der Stromversorgung erhöhen. Da die weiteren Abnehmer im Einfamilienhaus eine andere Betriebscharakteristik als der Elektroherd besitzen, sorgen sie nach Bild 2 für einen Belastungs-

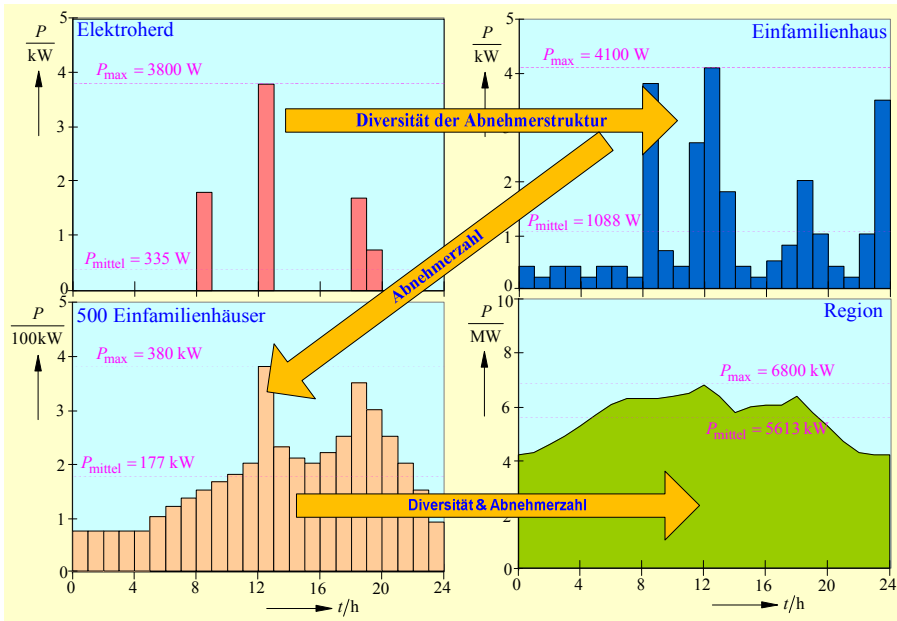


Bild 2: Abnehmerstruktur in der elektrischen Energieversorgung

ausgleich. Einen zusätzlichen Ausgleich der Last erhält man durch die Erhöhung der Abnehmerzahl, d.h., die Vergrößerung des Versorgungsgebietes, da sich selbst gleichartige Abnehmer nicht gleich verhalten.

Die Diversifizierung der Abnehmerstruktur durch ständig neue Stromanwendungen besitzt für die elektrische Energieversorgung eine ganz besondere Bedeutung. An ihrem Anfang steht als zweiter Abnehmer neben dem Licht der Motor (Licht & Kraft) mit völlig anderer Betriebscharakteristik, da er zu jeder Tageszeit gebraucht werden kann. Im Laufe der Zeit sind viele weitere Abnehmer hinzugekommen und haben zum Ausgleich des Lastganges beigetragen. Das Paradox, daß der wirtschaftliche Einsatz eines Gutes nicht etwa zur Abnahme des Verbrauchs, sondern vielmehr zu seiner Zunahme führt, das der Brite Jevons bereits Mitte des neunzehnten Jahrhunderts für die Kohlenutzung gefunden hatte, ist so in der Stromversorgung zur vollen Geltung gekommen und hat schließlich unumkehrbar zur völligen Abhängigkeit hochentwickelter Länder von elektrischer Energie geführt. Effizienzsteigerung scheint also kein Erfolgsrezept für eine „Energiewende“ zu sein.

Mit der zeitlichen Verschiebung, also der Vorwegnahme oder dem Aufschub, des Strombezugs kann der Lastgang weiter geglättet und dem Ideal angenähert werden. Das verlangt immer Speicher im weitesten Sinne und schränkt womöglich die Freizügigkeit der Abnehmer ein. Ein Beispiel dafür ist die altbekannte Nachtspeicherheizung, die die Wärme zum Heizen vorweg (nachts zuvor) aus Strom erzeugt, damit den heimischen Wärmespeicher füllt, um sie später (tags darauf) zu nutzen. Mit moderner Informationstechnik (smart grids) sind heute weitere Anwendungen erschließbar.

Der Stromversorger kann aber auch Speicher im elektrischen Netz, die dem Abnehmer verborgen bleiben, einsetzen, die er mit vorab produzierter Energie lädt, um daraus später Strom zu erzeugen, wenn die Lastsituation es verlangt. Die Wirkung eines Pump-

speicherkraftwerkes wird am Beispiel des Lastganges nach Bild 2, unten rechts, im Bild 3 gezeigt. Die rote Linie markiert den Lastgang, die Fläche darunter ist der elektrischen Lastenergie proportional.

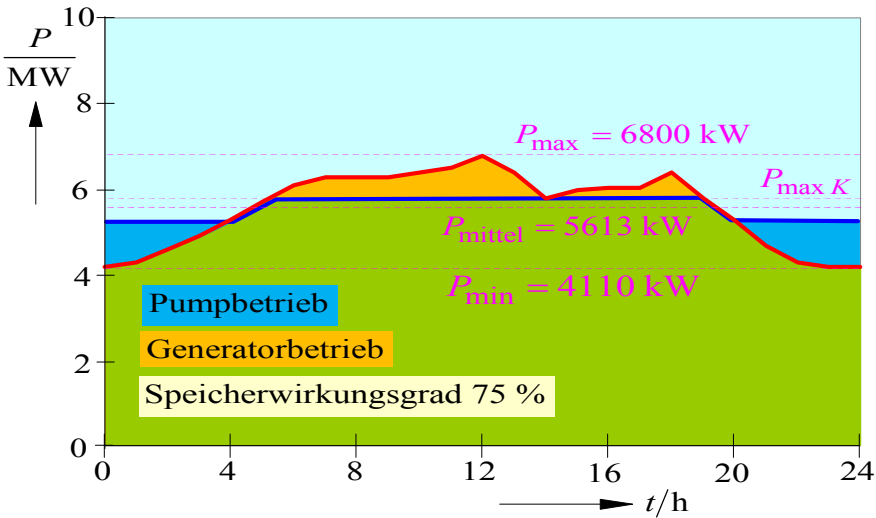


Bild 3: Lastgang mit Pumpspeicherwerk

Im Lasttal (hier von etwa 20 Uhr bis 4 Uhr) arbeitet das Pumpspeicherwerk im Pumpbetrieb, also als Last. Die blauen Flächen im Bild 3 entsprechen der dabei aufgenommenen Energie. In den Zeiten hoher Last arbeitet es im Generatorbetrieb, also als Erzeuger. Die okerfarbene Fläche im Bild 3 steht für die abgegebene Energie, die wegen der Speicherverluste um ein Viertel kleiner ist als die aufgenommene, weil hier ein Wirkungsgrad von 75 % angenommen wurde. Die blaue Linie stellt den neuen Lastgang für die Kraftwerke dar. Die maximale Kraftwerksleistung ist mit Pumpspeicherwerk kleiner als die maximale Last. Sie beträgt nur noch etwa 5800 kW. Gleichzeitig wird die minimale Kraftwerksleistung angehoben und so die Ganglinie weiter geglättet.

5 Parameter der Last

Bereits das einfache Beispiel des Elektroherds als Last zeigt, daß die Angabe der zum Kochen benötigten Energie für seine Charakterisierung nicht nur unzureichend ist, sondern sogar in höchstem Maße irreführend.

Der Haushalt benötigt zum Kochen nach Bild 2 täglich eine Energie von $W_{\text{Herd}} = 335 \text{ W} \cdot 24 \text{ h} \approx 8 \text{ kWh}$. Aber niemand könnte mit dieser Energiemenge kochen, wenn sie gleichmäßig über 24 Stunden zugeführt würde. Um die Mittagszeit muß der Herd mit einer Leistung von 3800 W arbeiten, damit das Essen gelingt. Mit dieser Leistung würde er die gesamte Kochenergie in nur 2,12 Stunden (≈ 127 Minuten) aufnehmen. Nach dem Bild arbeitet der Herd tatsächlich vier Stunden pro Tag, weil die Mahlzeiten morgens und abends nicht so aufwändig sind wie mittags. Der Elektroherd wird im privaten Haushalt demzufolge schlecht ausgelastet, aber es liegt nicht an ihm. Bei einem Gas- oder gar Kohleherd wäre es auch nicht anders. Es liegt an unseren Lebensgewohnheiten, die diesen unausgeglichene Energieverbrauch verlangen. Im wirklichen Leben ist der gesamte Energieverbrauch wie in diesem Beispiel zeitlich immer unausgeglichen. Aus diesem Grunde ist es stets falsch, z.B. eine Anlage zur regenerativen Stromerzeugung nur nach der erzeugten Energiemenge zu charakterisieren.

Das Beispiel zeigt, dass neben der Energiemenge zur Prozeßcharakterisierung immer zusätzlich die Angabe der maximalen Leistung, mit der diese Energie bezogen (oder erzeugt) wird, nötig ist, da das System in der Lage sein muß, diese bei zulässigen Beanspruchungen bereitzustellen. Der Belastungsgrad m als das Verhältnis von mittlerer zu maximaler Leistung bringt das auf einfache Weise zum Ausdruck.

$$m = \frac{P_{\text{mittel}}}{P_{\text{max}}} = \frac{W}{T_n P_{\text{max}}} \quad (5.1)$$

Die Stromversorgung aus regenerativen Quellen und ihre Zwänge

In Gleichung (5.1) ist P_{mittel} die mittlere Leistung, W die (am Zähler abgelesene) elektrische Energie, die während der Dauer T_n (z.B. ein Tag, ein Jahr) verbraucht wurde, und P_{max} stellt die in diesem Zeitraum aufgetretene maximale Leistung dar. Der ideale Betrieb mit dem Belastungsgrad von eins wird allein durch die mittlere Leistung P_{mittel} beschrieben, denn $W = P_{\text{mittel}} \cdot T_n$. Besonders bei längeren Dauern (z.B. 1 Jahr \equiv 8760 Stunden) verwendet man als weiteres Maß die sogenannte Benutzungsdauer (der Höchstlast) T_m als die Dauer, während der mit konstanter maximaler Leistung P_{max} die benötigte Energiemenge W geliefert bzw. bezogen wird.

$$m = \frac{P_{\text{mittel}}}{P_{\text{max}}} = \frac{W}{T_n P_{\text{max}}} = \frac{T_m P_{\text{max}}}{T_n P_{\text{max}}} = \frac{T_m}{T_n} \quad (5.2)$$

Die Parameter der Last im deutschen und im europäischen Verbundnetz nach Bild 1 betragen

	P_{max}/GW	$P_{\text{mittel}}/\text{GW}$	P_{min}/GW	W/TWh	m	$T_m/\text{h/a}$
<i>D</i>	82,2	66,8	48,7	585	0,812	7113
<i>Eu</i>	392,4	310,1	217,1	2717	0,790	6920

(5.3)

Für Deutschland bringen die Zahlen in (5.3) zum Ausdruck, daß sich die gesamte innerhalb eines Jahres benötigte elektrische Energie mit einer mittleren Kraftwerksleistung von 66,8 GW über eine Dauer von 8760 Stunden erzeugen ließe. Die Unausgeglichenheit der Last verlangt aber eine maximale Leistung von 82,2 GW zur Erzeugung des benötigten Stroms. Dafür würde ein Kraftwerkspark mit maximaler Leistung nur 7113 Stunden benötigen und ist damit nur zu 81,2 % ausgelastet.

Belastungsgrad und Benutzungsstundenzahl drücken auf verschiedene Weise die Unausgeglichenheit des Prozesses aus. Sie können zur Charakterisierung der gesamten Last, zusammengesetzter Abnehmer (Regionen, Orte, Betriebe, Gebäude usw.) oder einzelner Abnehmer (Motor, Lampe) dienen. In der Erzeugung sind sie sowohl auf einzelne Stromerzeuger als auch auf komplexere Kraftwerke oder

ganze Kraftwerksparks (Braunkohle-, Steinkohle-, Gas-, Kernkraftwerke) anwendbar, wobei aber die Ursachen der Unausgeglichenheit zu berücksichtigen sind. Der Belastungsgrad einer Windenergieanlage oder einer Solaranlage ist in der Regel wegen des geringen Primärenergiedargebots niedrig, während der niedrige Belastungsgrad eines Pumpspeicherwerkes oder eines gasbetriebenen Spitzenkraftwerkes vorwiegend durch den Lastgang, also die Erfordernisse des Systembetriebes, erzwungen wird. In einer vollintegrierten Stromversorgung tragen die Spitzenkraftwerke, richtig eingesetzt, trotzdem zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit bei, während eigennützige Stromerzeuger in der liberalisierten Elektrizitätswirtschaft nur über den Energiepreis zur Errichtung und zum Betrieb von Spitzenkraftwerken angereizt werden können, ein gewichtiges Hindernis für die „Energiewende“.

Durch den Übergang von der Gang- zur Dauerlinie mit der Größe nach geordneten Leistungen (ab- oder aufsteigend) im Bild 4 wird die konkrete Zeitabhängigkeit der Last eliminiert, um dann später doch Aussagen über Extremfälle der Zeitabhängigkeit treffen zu können.

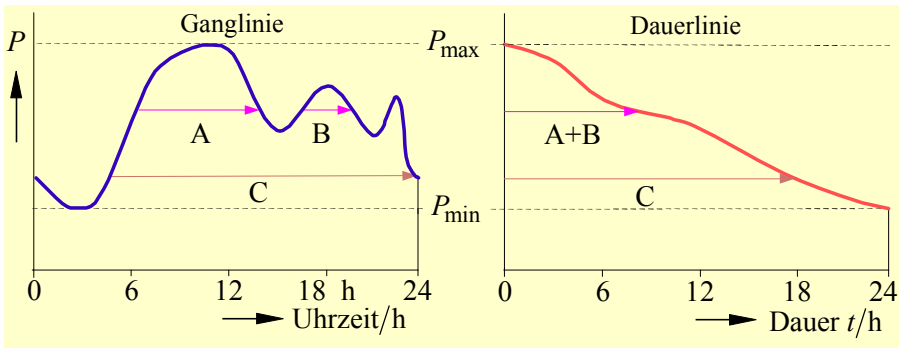


Bild 4: Gang- und Dauerlinie

Die Dauerlinie liegt nach Bild 5 zwischen zwei Extremen, dem idealen Prozeß mit mittlerer Leistung P_{mittel} über die gesamte Dauer T_n

Die Stromversorgung aus regenerativen Quellen und ihre Zwänge

und dem extrem unausgeglichnen Prozeß mit maximaler Leistung P_{\max} nur über die Benutzungsdauer T_m . Die okerfarbene Fläche unter der roten Dauerlinie ist der elektrischen Energie des Prozesses proportional und den graugefüllten Rechtecken in Bild 5 jeweils flächengleich.

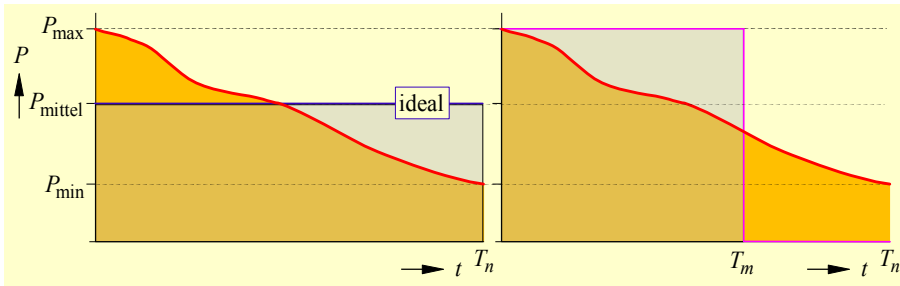


Bild 5: Dauerlinie zwischen zwei Extremen

6 Quellen der Stromversorgung und Speicherung

Speicher in einem Energiesystem entkoppeln Erzeugung und Verbrauch. Bei ausreichender Speicherkapazität können Erzeugung und Verbrauch unabhängig voneinander behandelt und ggf. optimiert werden. Ein Beispiel dafür ist der Öltank in einem Eigenheim. Besitzt er eine ausreichende Größe, dann kann über die Betankung in Abhängigkeit von der Ölpreisentwicklung entschieden und trotzdem relativ freizügig geheizt werden. Es gehört zu den schwerwiegenden Nachteilen der Stromversorgung, daß elektrische Energie in den dafür erforderlichen Mengen weder direkt noch indirekt speicherbar ist. Die größten gegenwärtig verfügbaren Stromspeicher sind Pumpspeicherkraftwerke mit einer Speicherkapazität von etwa 40 GWh in Deutschland bei einem gesamten Strombedarf von annähernd 600.000 GWh pro Jahr. In einem Speicherzyklus sind also nur ca. 0,007 % der Jahresenergie speicherbar. Selbst bei einer Zyklusdauer

(Ladung – Entladung) von nur einem Tag könnten lediglich 2,4 % der Jahresenergie zwischengespeichert werden.

Die verschiedenen Quellen der Stromversorgung stellen unterschiedliche Anforderungen an die Stromspeicherung. Die Nutzung fossiler Energieträger bedeutet die Entleerung endlicher natürlicher Speicher nach dem jeweiligen Bedarf. Eine allein darauf aufbauende Stromversorgung käme ohne künstliche Speicher aus. Die vorhandenen verbessern die Wirtschaftlichkeit und erhöhen die Versorgungssicherheit, wären aber verzichtbar. Der Gebrauch von Wasserkraft geschieht im natürlichen Wasserkreislauf. Er benötigt künstliche Wasserspeicher zur Nutzung von Höhenunterschieden und für den haushälterischen Umgang mit veränderlichen Wasserreserven im Jahreslauf. Der Einsatz von Biomasse ist an die Vegetationsperiode gebunden und verlangt je nach Art künstliche Speicher, deren Kapazität bis zur nächsten Ernte reichen muß.

Die direkte Stromerzeugung aus Sonne und Wind wird dagegen allein vom Dargebot bestimmt und erfordert den Einsatz aufwändiger Erntetechnik bei unvorhersehbarer Ausbeute. Wie überall in Erntezeiten kann großer Überfluß herrschen, der jedoch nur nutzbar ist, wenn er konserviert und für Zeiten der Flaute in irgendeiner Form gespeichert werden kann. Diese Form der Stromerzeugung verlangt also besonders große Speicher oder sie stellt bei begrenzter Menge nur einen willkommenen Zugewinn dar, wenn der Systembetrieb in zulässigen Grenzen verlaufen soll.

7 Parameter der Windstromerzeugung in Deutschland

Im Bild 6 ist die Entwicklung der Windenergiegewinnung in Deutschland von 1993 bis 2010 dargestellt. Es zeigt, daß die installierte Leistung P_{IW} und die gewonnene Energie W_W mit wenigen Ausnahmen in der gleichen Weise ansteigen. Unabhängig von der Höhe der installierten Leistung, die im Jahr 2010 in Deutschland etwa

Die Stromversorgung aus regenerativen Quellen und ihre Zwänge

30 GW betrug, sind die Parameter der Gang- und der Dauerlinie etwa gleich geblieben. Ihre Mittelwerte über den betrachteten Zeitraum sind im Bild angegeben. Die maximale Windleistung $P_{\max W}$ ist stets kleiner als die installierte P_{IW} . Das Verhältnis beider beträgt im Mittel 89 %. Das soll später unberücksichtigt bleiben, da sichere Stromversorgung ohnehin immer Redundanz verlangt. Belastungsgrad und Benutzungszahl nach Bild 6 sagen aus, daß Windenergieanlagen im Mittel nur zu 18,7 % ausgelastet sind. Sie würden die Jahresenergie erzeugen, wenn sie nur 1643 Stunden (von 8760 Stunden) mit Vollast liefen. Wenn jährlich eine bestimmte Energiemenge aus Windkraft gewonnen werden soll, dann müssen Anlagen mit einer Gesamtleistung zur Verfügung stehen, die es erlaubt, diese Menge bei Vollast bereits in 1643 Stunden zu erzeugen.

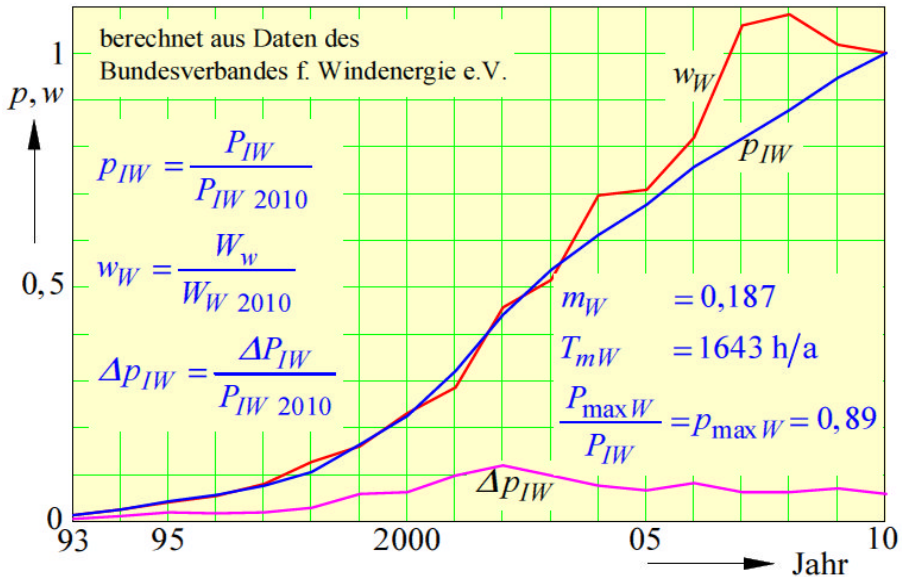


Bild 6: Stromerzeugung aus Wind in Deutschland

Im Bild 7 sind Beispiele der Windenergienutzung in Norddeutschland angegeben. Das linke Bild zeigt die Gang- und die Dauerlinie (rot & blau) der windreichsten Woche im Jahr 2002 mit einem außergewöhnlich hohen Belastungsgrad. Die beiden windreichsten Tage, die unmittelbar aufeinander folgen, sind grau unterlegt. Im rechten Bild ist die tägliche Windstromernte über das gesamte Jahr 2002 dargestellt.

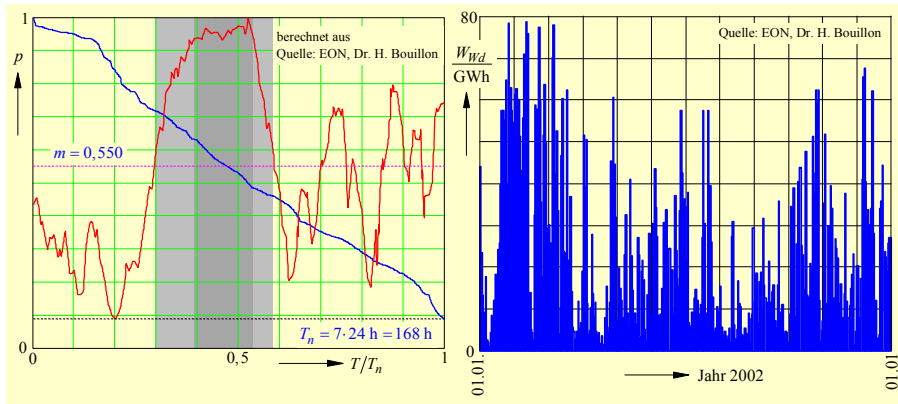


Bild 7: Windstromerzeugung im Gebiet eines Übertragungsnetzbetreibers

Beide Bilder belegen, daß die Windstromerzeugung vollkommen aperiodisch verläuft, wobei aber die Ernte in den Wintermonaten höher ist als im Sommer. Diese saisonale Energiedifferenz betrug für die Jahre 2008 bis 2011 im Mittel etwa ein Viertel der gesamten Erzeugung. Im Bild 8 ist die Dauerlinie der Windstromerzeugung zu Bild 7 mit den zugehörigen Kerngrößen angegeben.

Die Stromversorgung aus regenerativen Quellen und ihre Zwänge

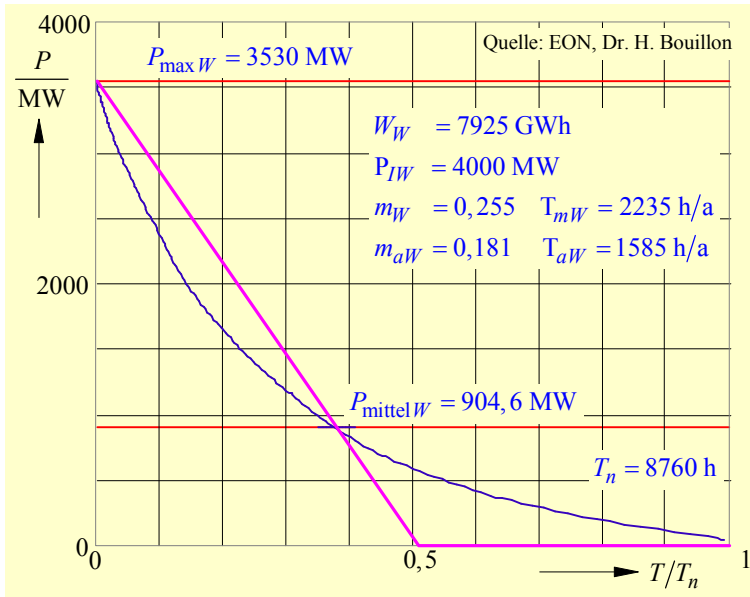


Bild 8: Dauerlinie der Windstromerzeugung

Im folgenden Beispiel wird mit dem Belastungsgrad m_W bzw. der Benutzungsdauer T_{mW} aus Bild 8 gerechnet. Beide Werte sind günstiger als die mittleren deutschen Werte nach Bild 6. Die Dauerlinie wird dagegen durch den magentafarbenen linearen Verlauf in Bild 8 angenähert. Dieser verläuft bei gleichen Parametern etwas ungünstiger als die ursprüngliche Dauerlinie, weil nach ihm fast ein halbes Jahr lang totale Flaute herrscht.

8 Stromerzeugung allein aus Wind

Ein elektrisches Energieversorgungssystem, dessen Erzeugung allein auf Windenergie beruht, muß über Speicher verfügen, die die Differenz zwischen Erzeugung und Last vollständig ausgleichen können. Schlägt man die Netzverluste der Last zu, dann wäre das System bei einem Speicherwirkungsgrad von 100 % ideal. In diesem Fall muß die

erzeugte elektrische Energie gleich der in den Lasten verbrauchten sein und mit den Erzeugungsparemtern und den Lastparametern gilt

$$W_W = P_{\max W} T_{mW} = W_L = P_{\max L} T_{mL} \quad (8.1)$$

Die Umstellung von Gleichung (8.1) führt unter Verwendung der Erzeugungsparemter nach Bild 8 und der Last des deutschen Verbundnetzes nach Gleichung (5.3) auf das Verhältnis von maximaler Windleistung zu Maximallast.

$$\frac{P_{\max W}}{P_{\max L}} = \frac{T_{mL}}{T_{mW}} = \frac{m_L}{m_W} = \frac{7113 \text{ h/a}}{2235 \text{ h/a}} = \frac{0,812}{0,255} = 3,18 \quad (8.2)$$

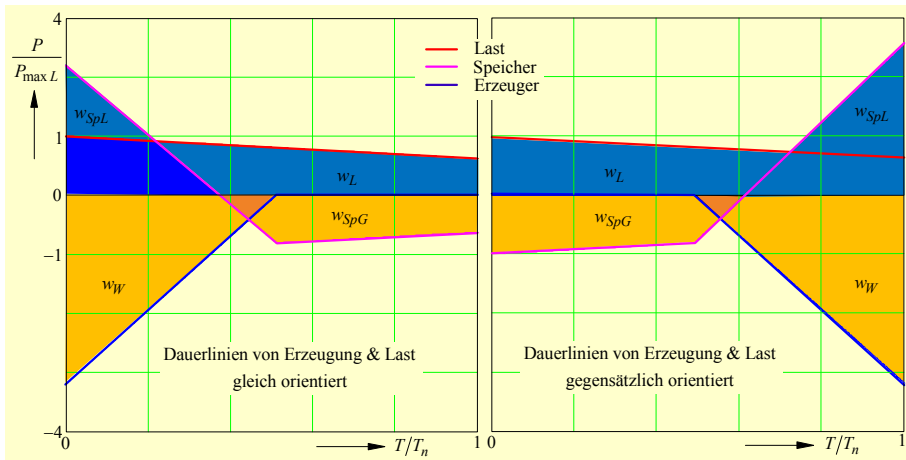


Bild 9: Dauerlinien eines Energieversorgungssystems mit reiner Windstromerzeugung

Um die Last allein mit Windenergie versorgen zu können, muß die maximale Windleistung unter den idealen Bedingungen 318 % der Maximallast betragen. Für die Bestimmung der weiteren Größen aus den Dauerlinien gibt es zwei Grenzfälle: entweder sind beide Dauerlinien gleich orientiert (beide aufsteigend oder beide absteigend) oder beide Dauerlinien sind gespiegelt (eine auf- und die andere abstei-

gend). Im ersten Fall trifft die maximale Erzeugung mit der Maximallast zusammen und im zweiten ist die Erzeugung bei minimaler Last maximal. Die Differenz zwischen beiden Grenzfällen, die im Bild 9 für lineare Dauerlinien dargestellt sind, ergibt den theoretischen Spielraum, der in intelligenten Netzen (smart grids) durch Manipulation der Last (zeitliche Verschiebung des Energiebezugs) ausgeglichen werden kann, wenn das Winddargebot immer voll genutzt werden soll.

Die maximale Ladeleistung des Speichers $p_{\max SpL}$, die maximale Erzeuger- bzw. Entladeleistung des Speichers $p_{\max SpG}$ und die Ladeenergie des Speichers (Speicherkapazität) w_{SpL} ergeben sich aus den Diagrammen im Bild 9. Sie betragen

Dauerlinien	$p_{\max W}$	$p_{\max SpL}$	$p_{\max SpG}$	w_{SpL}/w_L
gleichorientiert	3,18	2,18	0,81	0,50
gespiegelt	3,18	2,56	1	0,61

(8.3)

Die Leistungen sind in Gleichung (8.3) auf die Maximallast bezogen und die Speicherkapazität auf die Lastenergie. Der Speicherwirkungsgrad beeinflusst die Ergebnisse sehr. Für einen Wert von $\eta_{sp} = 75 \%$, einem unteren Grenzwert für Pumpspeicherwerke, erhält man

Dauerlinien	$p_{\max W}$	$p_{\max SpL}$	$p_{\max SpG}$	w_{SpL}/w_L	η
gleichorientiert	3,70	2,70	0,81	0,65	0,86
gespiegelt	3,82	3,20	1	0,80	0,83

(8.4)

Der Speicherwirkungsgrad wirkt auch auf den Gesamtwirkungsgrad η des Systems ein, und zwar umso stärker, je größer die Speicherkapazität ist.

Die absoluten Werte für das deutsche Verbundnetz mit reiner Windstromerzeugung sind mit den Gleichungen (5.3) und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** bis auf die

Speicherkapazität leicht bestimmbar. Der aperiodische Verlauf der Windstromerzeugung legt zunächst einen Jahresspeicher nahe. Seine Speicherkapazität müsste für die deutsche Last zwischen etwa 390 TWh und 480 TWh liegen. Das ist praktisch nicht realisierbar. Ein Wochenspeicher würde aus heutiger Sicht nicht ausreichen und ein Monatsspeicher müsste noch immer eine Kapazität von 32 TWh bis 40 TWh, d.h. das Tausendfache der deutschen Pumpspeicherkapazität, besitzen. Selbst das ist eine heute unvorstellbare Größe.

Die installierte Windleistung betrug in Deutschland im Jahr 2011 etwa 30 GW. Bei voller Verfügbarkeit würde man damit eine Maximallast mit den deutschen Parametern von etwa 7,9 GW allein versorgen können. Dazu benötigte man zusätzlich Speicher mit einer Ladeleistung von 25 GW und einer Entladeleistung von 7,9 GW. Die kumulative Speicherkapazität für ein Jahr müsste etwa 45 TWh betragen. Das ist mehr als das Eintausendfache der heute in Deutschland verfügbaren Pumpspeicherkapazität. Ein Jahresspeicher wäre also selbst für weniger als ein Zehntel der deutschen Last nicht realisierbar. Selbst ein Monatsspeicher müsste immer noch eine Speicherkapazität von etwa 3,8 TWh, dem 95fachen der deutschen Pumpspeicherkapazität, besitzen. Windenergieerzeugung ist demnach auf lange Sicht nur im Verbund mit konventioneller Stromerzeugung nutzbar.

9 Stromerzeugung aus Wind und Sonne

Die Stromerzeugung aus Wind und Sonne bedeutet bei Beachtung spezifischer Eigenschaften nicht einfach nur die Nutzung zweier verschiedener Quellen. Die saisonalen Energiedifferenzen der Stromerzeugung aus Wind und Sonne gleichen sich in unseren Breiten aus. Ein Gemisch aus Wind- und Sonnenenergie kann daher mildernd auf die Kapazität der Langzeitspeicherung wirken.

Die Stromversorgung aus regenerativen Quellen und ihre Zwänge

Windenergiegewinnung geschieht nur auf unbesiedelten Flächen und ist deswegen nicht dezentral. Die damit verbundenen Nachteile werden durch das Ungleichgewicht der Erzeugung zwischen Nord- und Süddeutschland und den Trend ihrer Verlagerung vor die Küsten so verstärkt, daß die Trennung der Erzeuger- und Abnehmer-schwerpunkte einen aufwändigen Stromtransport in Nord-Süd-Richtung verlangt. Sonnenenergie kann an Land ebenfalls auf unbesiedelten Flächen gewonnen werden und leider wird das mit allen Nachteilen aufwändig und bei geringer Ausbeute auch praktiziert. Sie kann dagegen ebenso auf dicht besiedelten bzw. wirtschaftlich genutzten Flächen mit hoher elektrischer Lastdichte in Strom umgewandelt und dort (zum Teil) genutzt werden. Eine solche solare Stromversorgung könnte im besten Sinne des Wortes dezentral sein.

Im Bild 10, links, sind die Gang- und die Dauerlinie der solaren Stromerzeugung für einen sonnenreichen Tag am Sommeranfang in einer kleinen Großstadt dargestellt. Außerdem ist die wesentlich unausgeglichene Jahresdauerlinie eingetragen. Die Belastungsgrade und Benutzungsdauern sind im Bild angegeben. Bild 10, rechts, enthält die Ganglinien typischer Lasten der Stadt mit den dazugehörigen Parametern. Die Linie p_H beschreibt eine Haushaltslast, die Linie p_G eine Gewerbelast und die Linie p_{HG} eine Mischlast für ein Stadtgebiet mit 70 % Gewerbe und 30 % Haushalten. Die Mischlast ist die ausgeglichendste, ihre Leistungsspitze liegt dicht bei der Spitze der solaren Stromerzeugung.

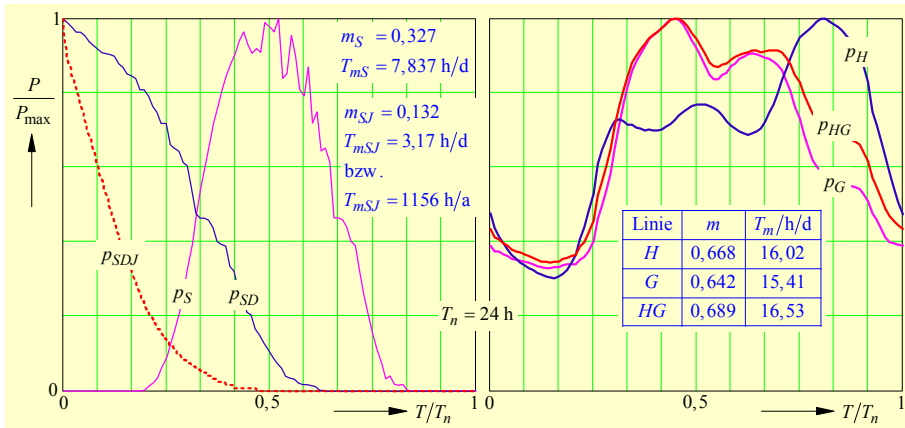


Bild 10: Solare Stromerzeugung und Lasten in einem Stadtgebiet

Die Ganglinien der Mischlast aus Gewerbe und Haushalten und der solaren Stromerzeugung lassen sich gut miteinander kombinieren. Wenn die Spitzenlast dabei nicht signifikant erhöht werden soll, um die Belastung des Netzes und der Hauptbetriebsmittel (z.B. der Transformatoren) dadurch nicht zu vergrößern, dann darf die Spitzenleistung der Erzeuger hier etwa doppelt so hoch sein wie die der Last. Die Ganglinien für diesen Fall sind im Bild 11 dargestellt. Die Ganglinie der Kombination $|p_M|$ ist unausgeglichener als die der Mischlast p_{HG} .

Solare Stromerzeugung läßt sich dort umso besser in das elektrische Energieversorgungssystem integrieren, wo die Flächenlast tagsüber hoch ist, und auf diese Weise wirtschaftlicher nutzen.

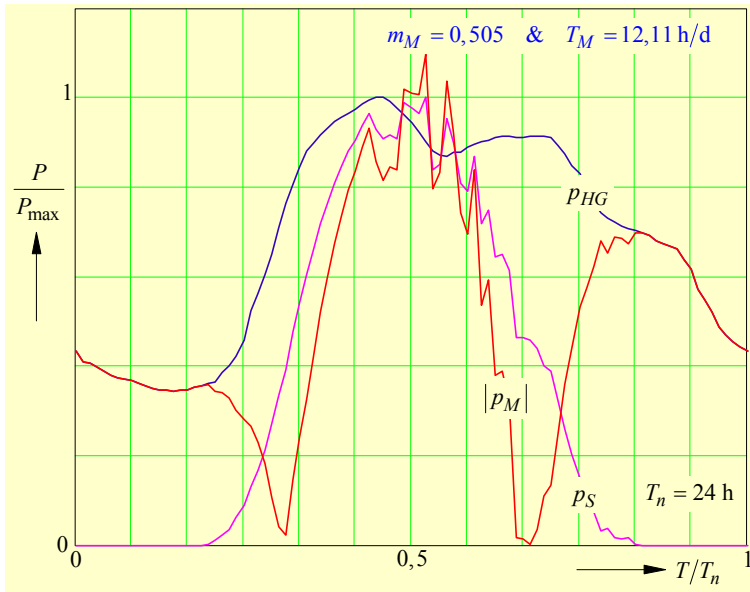


Bild 11: Kombination der Last mit solarer Stromerzeugung

10 Speicherkonzept für eine Stromversorgung aus regenerativen Quellen

Die Stromversorgung aus regenerativen Quellen verlangt nach den bisherigen Überlegungen die Speicherung sehr großer Energiemengen über längere Zeiträume. Der Speicher muß mit großer Leistung in kurzer Zeit geladen und mit kleinerer Leistung (etwa einem Drittel der Ladeleistung) entladen werden. Ein Pumpspeicherwerk, bei dem Lade- und Entladeleistung annähernd gleich sind, könnte z.B. allein wegen der Wachstumsgesetze der elektrischen Maschinen so nicht wirtschaftlich ausgelegt und betrieben werden. Eine andere, (all-)elektrische Lösung, die den einmal erzeugten Strom bis zur Nutzung im elektrischen Netz behält, ist nicht in Sicht. Unter heutigen Gesichtspunkten ist daher nur ein Speicherkonzept für die Stromversorgung nach Bild 12 vorstellbar.

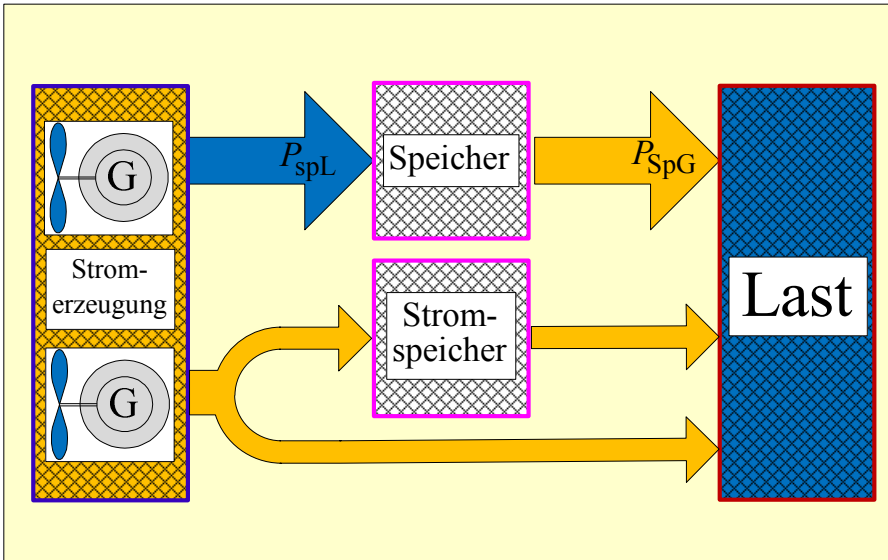


Bild 12: Speicherkonzept für eine Stromversorgung aus regenerativen Quellen

Ein (größerer) Teil der regenerativen Stromerzeuger speist nicht in das elektrische Netz ein, sondern lädt direkt (noch unbekannte) Langzeitspeicher großer Kapazität, die dann bei Bedarf zum Gleichgewicht der Stromversorgung beitragen. Ein (kleinerer) Teil der regenerativen Stromerzeuger speist dagegen in das elektrische Netz mit Stromspeichern kleinerer Kapazität ein, wobei nur soviel Strom die Lasten unmittelbar versorgen sollte, wie die anderen Kraftwerke des Netzes ohne Beeinträchtigung der Stabilität des Betriebes auszuregeln in der Lage sind. Diese Vorgehensweise würde gleichzeitig zu einer dezentraleren Stromversorgung mit all ihren Vorteilen führen.

11 Regenerative Stromerzeugung und Stabilität

Zwischen einem Generator und einem Netz kann nur dann stationär Leistung ausgetauscht werden, wenn ihre Leerlaufspannungen die

gleiche Frequenz besitzen. Das bedeutet allgemeiner: **Alle Stromerzeuger eines elektrischen Energieversorgungssystems müssen im stationären Betrieb die gleiche Frequenz besitzen.** In einem Gleichstromnetz oder in einem hypothetischen Drehstromnetz mit rein ohmschen Leitungswiderständen fließt die Leistung von Knotenpunkten höherer Spannung zu Knotenpunkten niedrigerer Spannung. Dadurch stellt sich im Netz ein Spannungsprofil ein. In einem realen Drehstromnetz mit überwiegend induktiven bzw. reaktiven Leitungsimpedanzen fließt die Leistung zwischen zwei Knotenpunkten dagegen in Abhängigkeit vom Phasenwinkel zwischen den Knotenspannungen. Sie kann dabei auch von einem Knoten niedrigerer Spannung zu einem Knoten höherer Spannung fließen. Das ist ein großer Vorteil von Wechsel- und Drehstromnetzen, der die Spannungshaltung nach vorgegebenen Qualitätskriterien und die Steuerung des Leistungsflusses wesentlich erleichtert.

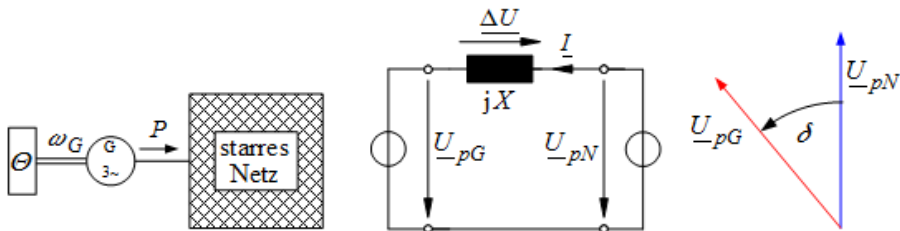


Bild 13: Leistungsaustausch zwischen einem Generator und einem Netz

Die über einen rein induktiven Netzzweig nach Bild 13 übertragene Leistung beträgt

$$P = \frac{U_{pG} U_{pN}}{X} \sin \delta \quad (8.5)$$

Der Winkel δ zwischen der Generatorleerlaufspannung U_{pG} und der Netzleerlaufspannung U_{pN} in Gleichung (8.5) wird Lastwinkel genannt. Im Bild 13, rechts, eilt die Generatorspannung der Netzspannung vor-

aus. Der Generator speist so Leistung in das Netz ein, er zieht gewissermaßen das Netz hinter sich her. Nach Gleichung (8.5) wird die Leistung bei einem Lastwinkel von 90 Grad maximal. Dieser Zustand bezeichnet die statische Stabilitätsgrenze.

In einem Drehstromnetz mit vielen Stromquellen bestehen im stationären Betrieb feste Winkelbeziehungen zwischen den Leerlaufspannungen. Eine Änderung des Leistungsflusses durch Ein- und Ausschalten von Lasten und/oder Stromerzeugern muß sich also als Änderung der Lastwinkel äußern. Das aber bedeutet: Die Netzfrequenz darf keine starre Größe sein, denn die einzelnen Stromquellen können ihre Lastwinkel nur ändern, indem sie bei Entlastung (vorübergehend) beschleunigen und bei Belastung verzögern, also mit ihrer Frequenz gegenüber der Netzfrequenz schlüpfen, denn die zeitliche Lastwinkeländerung ist dem Schlupf, also der Frequenzabweichung, proportional. Zu einem Laststoß (Ein- oder Ausschaltung) gehört im Drehstromnetz immer eine Änderung des Lastwinkels. Aus Gleichung (8.5) kann der Zusammenhang zwischen einem Laststoß ΔP und der zugehörigen Lastwinkeländerung $\Delta\delta$ abgeleitet werden.

$$\Delta P \approx \frac{dP}{d\delta} \Delta\delta = \frac{U_{pG} U_{pN}}{X} \cos\delta \Delta\delta = P_{syn} \Delta\delta \quad (8.6)$$

Der Laststoß ist der Lastwinkeländerung näherungsweise proportional. Der Proportionalitätsfaktor P_{syn} heißt synchronisierende Leistung. Sie ist als die Kraft vorstellbar, die den Verbund zwischen Generator und Netz bei Sprüngen bis zur Stabilitätsgrenze aufrechterhält, d.h., sie bewirkt, daß das System nach dem Wegfall des Sprunges dann wieder in den alten Zustand zurückkehrt. Wird die Stabilitätsgrenze bei einem Sprung jedoch überschritten, dann ändert die synchronisierende Leistung ihr Vorzeichen und der Lastwinkel steigt danach weiter an. Der Synchronismus geht verloren, der Verbundbetrieb bricht zusammen, das System fällt außer Tritt. Je größer die synchronisierende Leistung ist, desto größer ist die Stabilität des Verbundbetriebes. Ein konventio-

neller Stromerzeuger besitzt nach Gleichung (8.6) bei kleinem Lastwinkel, d.h. nach Gleichung (8.5) bei kleiner Leistung, also auch geringer Auslastung, die größte Stabilität. **Ein stabiler Verbundbetrieb erfordert angemessene Leistungsreserven.**

Ein Leistungsstoß im System stört das Gleichgewicht zwischen elektrischer und mechanischer Leistung, da letztere wegen der Massenträgheit nicht springen kann. Die in den rotierenden Massen des konventionellen Systems (Läufer rotierender elektrischer Maschinen, Turbinenläufer usw.) gespeicherte mechanische Energie schafft dazu einen Ausgleich. Unter ihrer Wirkung, im Bild 13 symbolisch dargestellt durch das mechanische Massenträgheitsmoment Θ , ändert sich die mittlere Netzfrequenz, um die die Frequenzen der einzelnen Stromquellen mit sehr niedriger Frequenz (ca. $\frac{1}{4}$ Hz bis < 1 Hz) schwingen, wobei die Schwingungsamplituden nach Gleichung (8.6) von den individuellen synchronisierenden Leistungen bestimmt werden. Die Regelung greift verzögert ein und stellt durch Änderung der mechanischen Leistungseinspeisung (Turbinenregelung) die ursprüngliche Betriebsfrequenz wieder ein. Dabei genügt es nicht, mit der sogenannten Primärregelung jeden einzelnen Generator auf Betriebsfrequenz zu regeln, sondern über die Sekundärregelung muß außerdem der Leistungsstoß so auf die verfügbaren Quellen des Systems aufgeteilt werden, daß sich ein gewünschter und zulässiger Leistungsfluß im System ergibt. Dazu werden Regelkraftwerke mit dynamisch veränderbarer Leistungsabgabe benötigt. **Die Leistungs-Frequenz-Regelung ist eine Systemaufgabe, die das Zusammenwirken aller Beteiligten über ökonomische Grenzen hinaus verlangt.**

Regenerative Stromerzeuger werden über Stromrichter an das Drehstromnetz angebunden. Die für ihre Steuerung benötigte Betriebsfrequenz wird in der Regel als Meßgröße aus dem Drehstromnetz gewonnen. **Regenerative Stromerzeuger liefern, wie auch Einspeisungen in das Drehstromnetz über Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungen, keinen Beitrag zur synchronisierenden**

Leistung. Diese muß bisher weiterhin von konventionellen Kraftwerken aufgebracht werden. Es ist zwar bekannt und vielfach nachgewiesen, daß Stromrichter sehr dynamisch geregelt werden können, aber die schnelle Regelung vieler einzelner Stromrichter im Sinne der oben erwähnten Primärregelung löst die Systemaufgabe nicht. Dazu müßte eine Vielzahl regenerativer Stromquellen konzertiert so geregelt werden, daß sich nach jedem Sprung bei Gewährleistung der Systemstabilität ein zulässiger Lastfluß ergibt. Zulässig bedeutet hier, daß nirgendwo im System eine Überlastung auftritt, die ggf. zum Ausfall eines Betriebsmittels führt. Diese Aufgabe ist nicht nur nicht gelöst, sondern sie wird bisher außerdem kaum beachtet.

Im Bild 14 ist die Einspeiseleistung regenerativer Stromerzeugung in den ersten drei Aprilwochen 2011 in Deutschland dargestellt. Die Solarstromerzeugung zeigt die Tagesperiode, wenn auch mit unterschiedlichen Maximalleistungen. Die Windstromerzeugung unterstreicht die Aussagen im Abschnitt 7. Sie verläuft vollkommen aperiodisch mit z. T. tagelang anhaltendem Stark- als auch Schwachwind. Die Windleistung erreicht am 12. April ihren Maximalwert mit 18,553 GW. In der gesamten dritten Woche ist sie aber äußerst gering und die minimale Windleistung beträgt nur 368,5 MW, das sind 2 % des Maximalwertes. Die Parameter der Belastungsgänge zeigen, daß sich Wind- und Sonnenenergie zu einer etwas ausgeglicheneren Ganglinie ergänzen.

Für die Stabilität des Netzbetriebes sind hier die steilen Flanken des Leistungsanstiegs und -abfalls von Bedeutung. Die Leistung ändert sich über die Dauer von jeweils etwa einem Vierteltag z. T. um mehr als 20 GW, also um mehr als ein Viertel der deutschen Jahreshöchstlast. Dazu trägt in dem Beispiel die Solarenergie mit ihrer Tagesperiode besonders viel bei, obwohl die maximale Windleistung um 40 % höher ist als die maximale Sonnenleistung.

Die regenerative Stromerzeugung liefert wegen dem besonderen Betriebsverhalten der Stromerzeuger nicht nur keinen Beitrag zur

Die Stromversorgung aus regenerativen Quellen und ihre Zwänge

Systemstabilität, sondern sie gefährdet diese darüber hinaus durch ihre extreme Volatilität. Daß es im gegenwärtigen System gelingt, die starken Schwankungen immer wieder auszugleichen, verdient Hochachtung. Unabhängig davon wäre es eine bedeutsame Aufgabe der Energiewende, Systemlösungen zu finden, die den Besonderheiten der regenerativen Stromquellen besser angepaßt sind als die heutigen.

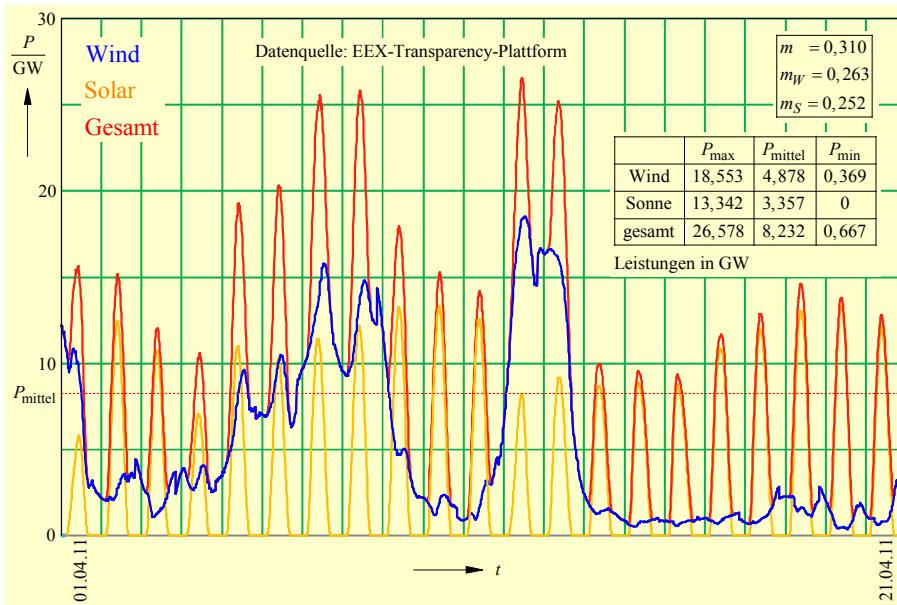


Bild 14: Leistungseinspeisung aus Wind und Sonne in Deutschland

12 Regenerative Stromerzeugung und Versorgungssicherheit

Die Sicherheit der elektrischen Energieversorgung beinhaltet drei Aspekte: die Diversität der Quellen, die Redundanz und die Resilienz des Systems. Bisher war man in der Stromversorgung bemüht, möglichst viele verschiedene Primärenergiequellen, einen Energiemix, zu

nutzen und die Erzeugerstandorte der Lastdichte gemäß über das Land zu verteilen. **Vielfalt erzeugt Sicherheit.** Die Fokussierung auf die Nutzung von Wind und Sonne als Primärenergiequellen schränkt diese Diversität ein. Nicht nur die Palette der Primärenergiequellen wird kleiner, sondern die ungleichmäßige Verteilung der Windstromerzeugung über die Fläche bis vor die Küsten und ggf. die Solarstromerzeugung in Wüsten (Desertec) sorgen für eine stärkere Trennung zwischen Erzeuger- und Abnehmerstandorten, die durch aufwändige und ggf. anfällige Übertragungen überbrückt werden muß. Die Frage der Diversität muß also im Zusammenhang mit der Nutzung regenerativer Energieträger zur Stromerzeugung neu bedacht werden.

Kein Betriebsmittel ist vor Ausfall geschützt. Elektrische Energieversorgungssysteme wurden daher schon immer redundant ausgelegt. Sie besitzen Systemkomponenten und Reserven, die in Normal-situationen vollkommen überflüssig, unter außergewöhnlichen und unvorhergesehenen Umständen aber für eine sichere Versorgung unverzichtbar sind. **Sicherheit braucht Reserven.** Die Kapazität der Stromerzeugung aus regenerativen Quellen und der Speicherung müssen also höher sein als nach den Überlegungen der vorhergehenden Abschnitte ermittelt. Ebenso sind die in Deutschland notwendigen Nord-Süd-Verbindungen redundant auszulegen, weil ihr Ausfall nicht anderweitig kompensiert werden kann, da die Erzeugung an ihren Nordenden, die Last aber an ihren Süden konzentriert ist.

Ein elektrisches Energieversorgungssystem, das vermutlich gerade in der Lage wäre, seinen Anforderungen zu genügen, ist praktisch untauglich, denn niemand kann reale Anforderungen vorhersehen. Eine sichere Stromversorgung muß daher stets in einem angemessenen Abstand zu ihren Grenzen betrieben werden und eine genügende Elastizität oder Robustheit beim Abfangen von Störungen besitzen, sie muß angemessen resilient sein, wie es im Abschnitt 11 am Beispiel der Stabilität angedeutet ist. Die „Ausschöpfung aller

Reserven“ bei der Energiewende ist daher in höchstem Maße kontraproduktiv.

Die Entwicklung der Stromversorgung muß festen Grundsätzen folgen und dabei gleichzeitig offen für neue Wege und Ideen bleiben. Es gibt niemals nur eine Lösung, wie heute oft behauptet. Mit Vertrauen in die menschliche Kreativität bleibt auch in einer modernen Gesellschaft die Hoffnung, schließlich doch einen guten Weg zu finden.

Literatur

- [1] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
Energieverbrauch und Stromerzeugung in Deutschland 1990
bis 2010
Stand März 2011
- [2] Bouillon, H.
Das Windjahr 2002
EON 2004
- [3] Bundesverband WindEnergie
Installierte Windenergieleistung in Deutschland
Excel-Datenblatt 2011
- [4] UCTE
Statistical Yearbook 2008
Edition September 2009
- [5] EEX-Transparenzplattform – Erzeugungsdaten 2012
Online verfügbar unter www.transparency.eex.com
- [6] Neuner, Felix
Anforderungen an Energiespeicher für eine erneuerbare Strom-
versorgung in Deutschland, Projektarbeit, Rechts- & Wirt-
schaftswissenschaftlichen Fakultät & Lehrstuhl für Elektrische

Energieversorgung der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2012

- [7] Herold, G.
Elektrische Energieversorgung I – V
J. Schlembach Fachverlag, Wilburgstetten 2003 bis 2011
- [8] Herold, G.
Elektrische Energieversorgung – Rahmen, Prinzipien & Zwänge
Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung der FAU 2012, unveröffentlicht

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

HERMANN HARDE

1 Einleitung

Der Titel dieses Vortrags steht zugleich für eine der wichtigsten Fragen unserer Zeit, auf die wir möglichst rasch eine verlässliche Antwort finden sollten, um weiteren möglicherweise umweltpolitischen Unfug, der uns jetzt schon sehr teuer zu stehen kommt, zu vermeiden!

Wie sich da so mancher die Lösung der CO₂-Problematik vorstellt, wird vielleicht aus dem musikalischen Beitrag von Frank Ramond „Ich zähl bis drei ...“ ersichtlich [1]. In der entscheidenden Strophe heißt es:

Er dachte: "Hey, das läuft ja prima,
jetzt kümmere ich mich noch ums Klima.

Ihr reduziert jetzt CO₂ -
Und zwar sofort! Ich zähl bis drei!

Die halbe Welt gehorchte blind
doch eines Tages stand da'n Kind.

Er zählte: "Eins, zwei", es rief: "Drei!"
Der ganze Zauber war vorbei ...

Eins, zwei ... und alle riefen: Hau bloß ab.
Eins, zwei ... das hat danach nie mehr geklappt,

weil dieser Trick nur funktioniert,
wenn keiner weiß, was bei 3 passiert!

Es wäre in der Tat toll, wenn man nur bis 3 zählen müsste und der ganze faule Zauber um das CO_2 wäre vorbei. Es heißt hier abschließend: „weil dieser Trick nur funktioniert, wenn keiner weiß, was bei 3 - im übertragenen Sinn bei Verdopplung von CO_2 - wirklich passiert! Es wird also höchste Zeit, eine möglichst verlässliche Antwort und reale Einschätzung auf diese Frage zu finden, die sich nicht an irgendwelchen Spekulationen oder möglichen Vorteilsnahmen orientiert, sondern sich ausschließlich aus fundierten wissenschaftlichen Kriterien ableitet.

Der Weltklimarat (*IPCC – Intergovernmental Panel of Climate Change*) vertritt in seinen Veröffentlichungen (Assessment-Reports) von mehreren 1000 Seiten Umfang hierzu bereits eine klare Position, dass durch den vom Menschen verursachten CO_2 -Ausstoß eine Erwärmung von 3-6°C bis zum Ende des Jahrhunderts zu erwarten ist, wenn in den nächsten Jahren keine drastische Reduzierung der CO_2 -Emissionen erfolgt. All dies ist verbunden mit Prognosen zu einer bevorstehenden Klimakatastrophe, wie sie die Welt noch nicht gekannt hat. Horrormeldungen über eine Bevölkerungsexplosion und eine bevorstehende Hungersnot in den 80er Jahren, das Waldsterben oder das Ozonloch sind harmlos gegen die prognostizierten Klimafolgen. Dies hat zu einer der weltweit größten Regulierungen und internationalen Verträgen geführt mit weitreichenden Auswirkungen auf die Energiepolitik, Industrie und das gesamte wirtschaftliche Leben, insbesondere verbunden mit strengen Forderungen zur Reduzierung von Treibhausgasen und Sanktionen der Industriestaaten. Daher ist dies zu einer Frage des besonderen öffentlichen Interesses geworden.

So entstehen aus dem Kyoto-Abkommen für die *EU* nach Rechnungen der *EU*-Klimaschutzkommissarin Connie Hedegaard in den nächsten 40 Jahren schätzungsweise Belastungen von 11 *Bill.* € [2], um die im Klima-Schutz-Paket 2008 festgelegten Ziele für die CO_2 -Einsparungen erreichen zu können. Dies sind bis 2050 jeweils 270

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

Mrd. €/Jahr, für Deutschland entsprechend ca. *80 Mrd. €/Jahr*, also für jeden deutschen Bürger *1.000 €/Jahr*.

Allerdings werden die von offiziellen Institutionen wie dem Weltklimarat publizierten Daten und die daraus abgeleiteten dramatischen Prognosen mehr und mehr von Wissenschaftlern und Klimaexperten in Zweifel gezogen oder kritisch hinterfragt. Ebenso stößt die massive Einflussnahme auf Politik und öffentliche Institutionen, teils verbunden mit möglichen eigenen Interessen, auf zunehmende Kritik. In der Öffentlichkeit und in den Medien hat dies mittlerweile zu einem regelrechten Glaubenskrieg zwischen Alarmisten und Skeptikern in unserer Gesellschaft geführt mit massiven gegenseitigen Schuldzuweisungen.

Ich bin kein Klimawissenschaftler, aber habe mich mit der Ausbreitung von elektromagnetischer Strahlung in der Atmosphäre ausführlicher beschäftigt, insbesondere mit der Absorption von Strahlung durch die Treibhausgase. Daraus entstanden auch bei mir Zweifel an einigen Prognosen, denen ich daher etwas genauer nachgegangen bin. Bevor ich hierauf genauer eingehe, zunächst ein paar allgemeine Anmerkungen zum CO₂ und zum Treibhauseffekt.

2 Bedeutung von CO₂ für unser Ökosystem

Aus der Schule wissen wir, CO₂ ist ein unsichtbares, geruchloses und geschmackloses Gas. Wir kennen es von kohlensäurehaltigen Getränken, Feuerlöschanlagen, als Kältemittel in Klimaanlageanlagen und Wärmepumpen, in Backhefe als Treibmittel, als Lasergas oder als Endprodukt bei Verbrennungsvorgängen.

Aus der Presse und teils offiziellen Berichten entnehmen wir, CO₂ ist ein gefährliches, schädliches und gar toxisches Gas. Es ist verantwortlich für den grauen Smog über Städten, die weißen Wolken aus Kühltürmen, den schwarzen Rauch aus Schornsteinen (Abb. 1) und vor allem für die globale Erwärmung als Klimakiller Nr. 1.



Abb. 1: Duisburg in den 60er Jahren: Qualmende Schornsteine als Beleg, dass CO_2 die Umwelt schädigt.

Kaum jemand weiß aber um die für unser Leben so bedeutsame Einbindung dieses Gases in den Kreislauf zwischen autotrophen und heterotrophen Organismen (siehe Abb. 2).

So nehmen Pflanzen, Algen und einige Bakterien Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre auf und wandeln dieses durch Photosynthese bei Aufnahme von Wasser in Kohlehydrate wie Glucose um. Dieser Prozess setzt gleichzeitig Sauerstoff aus der Zersetzung von Wasser frei.

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

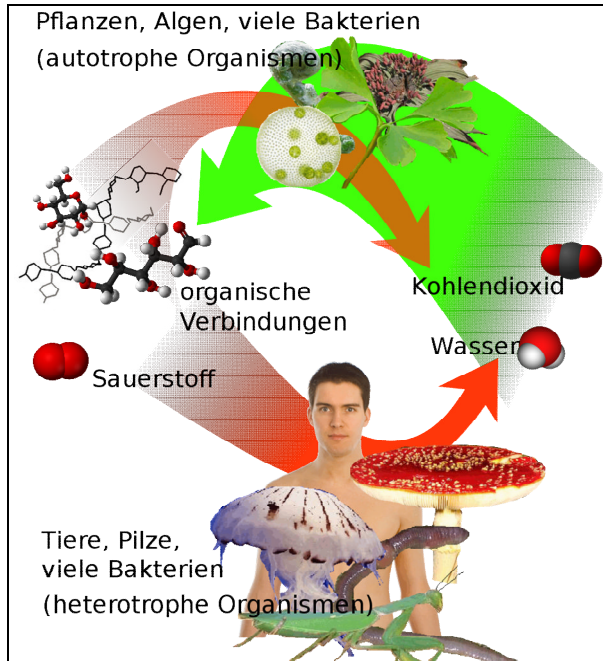


Abb. 2: Auto- und heterotropher Zyklus: CO₂ als Energieträger und Rohstoff aller Biomasse unseres Ökosystems.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Autotrophie>

Die entstehenden Kohlehydrate dienen als Energieträger und Baustoff für alle höherwertigen biochemischen Substanzen wie Polysaccharide, Nukleinsäuren und Proteine. Kohlenstoffdioxid stellt damit den Rohstoff für die Bildung aller Biomasse in der Primärproduktion unseres Ökosystems dar.

Umgekehrt erfolgt der Abbau von Biomasse durch Atmung von Tieren, Pilzen und vielen Bakterien wieder durch Bildung von Kohlenstoffdioxid bei gleichzeitigem Verbrauch des vorher freigesetzten Sauerstoffs, also gerade gegenläufig zum Prozess der Photosynthese.

Auch wir sind in diesen heterotrophen Prozess eingebunden. Mit jedem Atemzug geben wir dabei CO₂ an die Umgebung ab: In der

eingeatmeten Luft sind 0,4 %, im Atem mehr als 4 %. Dies entspricht einer Anreicherung mit jedem Atemzug um das 100-fache. Pro Tag erzeugen wir so etwa 1 kg an CO₂, bei 7 Mrd. Menschen sind dies 7 Mrd. kg /Tag oder 2,5 Mrd. t /Jahr.

Aus Abb. 3 ist zu ersehen, welche unterschiedlichen physiologischen Auswirkungen CO₂, abhängig von der Konzentration, auf unseren Organismus hat. Unterhalb von 3 % gibt es noch keine gesundheitlichen Beeinträchtigungen, aber mit einer Konzentration, die der ausgeatmeten Luft entspricht, kann bereits eine leichtere Narkose eingeleitet werden. Über 8 % an CO₂ führt dies zunächst zur Ohnmacht und bei längerer Einwirkzeit (größer 1 h) zum Tod.

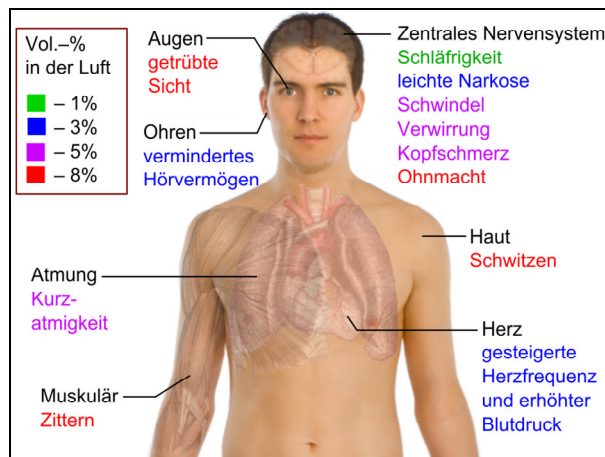


Abb. 3: Physiologische Wirkung von CO₂ auf den menschlichen Organismus. Quelle: <http://de.wikipedia.org>

Bei einer großen Zahl von Pflanzen dagegen fördert eine erhöhte Konzentration das Wachstum. So wurde in Versuchsreihen festgestellt, dass dies mit dem heute vorliegenden CO₂-Gehalt in der Luft, der gegenüber dem vorletzten Jahrhundert um 35 % zugenommen hat, zu einer Ertragssteigerung von ungefähr 25 % führt. Daher wird

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

in Treibhäusern z.T. CO₂ eingeleitet, um das synthetisierte CO₂ nachzuliefern und so das Wachstum zu steigern (siehe auch Ref. 3).

Der CO₂-Gehalt ist weder von der Konzentration noch dem Inhalt eine fixe Größe, sondern erneuert sich kontinuierlich durch die auto- und heterotrophen Prozesse. Jährlich werden so ca. 750 Mrd. t erzeugt und etwa auch so viel wieder durch Pflanzen und Ozeane aufgenommen. Das ist rund $\frac{1}{4}$ des in der Atmosphäre vorkommenden CO₂, das so ständig erneuert wird.

Der anthropogene Anteil hieran beträgt etwa 4,5 % (34 Mrd. t), wovon wiederum gut 7 % aus menschlicher Atmung stammen. An der weltweiten Emission ist die BRD derzeit gerade einmal mit 2,4 % (800 Mio. t) beteiligt [4].

In der Atmosphäre befinden sich heute ca. 3 Bill. t CO₂. Dies entspricht einer Konzentration von 380 ppm oder 0,38 ‰. Damit ist CO₂ ein Spurengas, nur jedes 3.000ste Molekül ist ein CO₂-Molekül. Selbstverständlich können Gase in dieser oder auch noch deutlich niedrigerer Konzentration ebenso wie Pharmazeutika, Drogen oder Gifte schon in kleinsten Spuren Auswirkungen auf die Umwelt und den Menschen ausüben. Aber CO₂ ist in den vorkommenden Konzentrationen eben kein toxisches Gas, und es bleibt die Frage: Führt ein weiterer Anstieg ebenso wie der einiger anderer Klimagase tatsächlich zu einer so drastischen Änderung unseres Klimas, wie vom IPCC prognostiziert?

Vor 500 Mill. Jahren war die CO₂-Konzentration noch 20x höher (~ 7 ‰) und vor 100 Mio. Jahren ca. 7-8x größer als heute (~ 2,8 ‰). Aus paläoklimatischen Untersuchungen an Eisbohrkernen [5] lässt sich ersehen (Abb. 4),

- dass es immer schon erhebliche Schwankungen in der CO₂-Konzentration gab (oberer Graph), auch ohne das Zutun des Menschen,
- dass diese Zyklen einher gehen mit den Wärme- und Kälteperio-

den auf der Erde (untere Kurve in Abb. 4), die nach allem paläoklimatischen Wissen von der Sonne und der Stellung der Erde zur Sonne (Milanković-Zyklen), vielleicht noch überlagert von Vulkanausbrüchen oder geothermischen Ereignissen verursacht worden sein müssen und

- dass es bisher keine Anzeichen dafür gibt, dass sich die CO_2 -Konzentration in den zurückliegenden tausenden Jahren von sich aus geändert und eine Temperaturänderung nach sich gezogen hätte. Vielmehr ist umgekehrt davon auszugehen, dass eine Erwärmung zur teilweisen Freisetzung der *Bill. t* an CO_2 und Methan führt, die als Permafrost in Sibirien und Alaska lagern, sowie das in den Weltmeeren gelöste CO_2 teilweise freigesetzt wird. Aktuelle Forschungsergebnisse weisen jedenfalls hierauf hin [6].

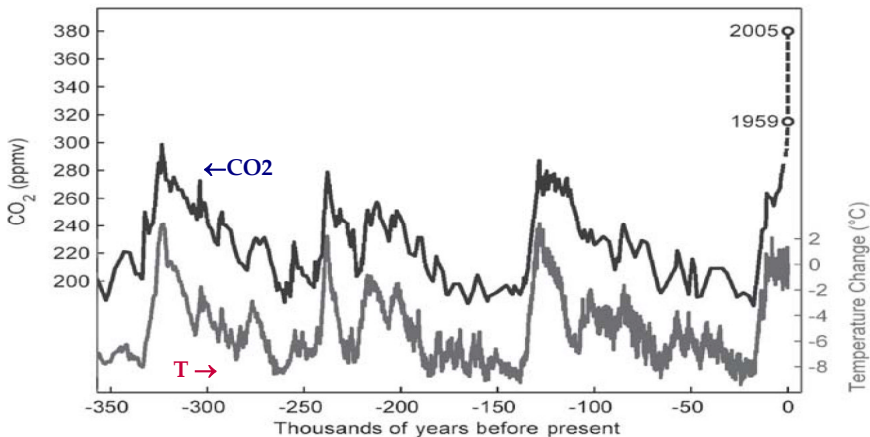


Abb. 4: CO_2 -Konzentration und Temperaturentwicklung über die letzten 350.000 Jahre [5].

Der weitere deutliche Anstieg von CO_2 in Abb. 4 über die letzten Jahrzehnte deutet zunächst auf die ausschließlich vom Menschen verursachten Emissionen hin. Dieser Anstieg geht aber offensichtlich zurück auf ein anderes Messverfahren und einen veränderten Daten-

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

satz, der sich nicht mehr aus den Untersuchungen an Eisbohrkernen ableitet, sondern aus direkten Messungen der CO₂-Konzentration in der Luft gewonnen wurde, wie dies erst seit den 50er Jahren genutzt werden kann [7]. Nach neueren Untersuchungen an Blättern von Ginkgo-Bäumen [8] ist durchaus davon auszugehen, dass auch in den letzten *Mio. Jahren* sehr wohl Spitzenkonzentrationen auftraten, die vergleichbar zu denen von heute waren.

Die Diskrepanz zu den Messungen an Eisbohrkernen lässt sich offensichtlich darauf zurückführen, dass als Folge von Diffusionseffekten im Eis größere Schwankungen des CO₂-Gehaltes eher nivelliert und so niedrigere Maximalkonzentrationen vorgetäuscht werden.

Das IPCC macht allerdings für den in den letzten 130 Jahren gemessenen Temperatur-Anstieg von 0.74°C [9] zu 95 % die anthropogenen CO₂-Emissionen verantwortlich [10].

3 Atmosphärischer Treibhauseffekt

Der Einfluss von CO₂ sowie einiger weiterer Gase auf das Klima mit einer daraus abgeleiteten Erwärmung der Erdoberfläche geht auf den vieldiskutierten Atmosphärischen Treibhauseffekt zurück. Bei Klimaskeptikern und insbesondere den „Klimaleugnern“ wird dieser Effekt immer wieder angezweifelt oder bestritten. Aus physikalischer Sicht gibt es jedoch keine wirklich stichhaltigen Gründe gegen die Existenz dieses Effektes, lediglich dass er aus verschiedenen Gründen nicht direkt in der Atmosphäre gemessen werden kann (Überlagerung durch Konvektion, Wetteränderungen, Konzentrationsvariationen), sondern aus Einzelergebnissen mit teilweise unterschiedlicher Vorgehensweise abgeleitet werden muss. Ebenso gibt es erhebliche Diskrepanzen über dessen Größe und Einfluss auf eine globale Erwärmung.

Da sowohl die *IPCC*-Rechnungen wie auch die eigenen Betrachtungen sich auf den Treibhauseffekt beziehen, seien hier nochmals die wesentlichen Grundlagen hierzu in Erinnerung gerufen.

Der normale Treibhauseffekt, wie er bei Gewächshäusern zum schnelleren Reifen von Pflanzen genutzt wird, lässt sich darauf zurückführen, dass kurzwellige Sonnenstrahlung die Glasfenster eines Treibhauses weitgehend verlustfrei passieren kann und vom Boden absorbiert wird, der sich hierdurch erwärmt. Vom Boden geht dabei langwellige Infrarotstrahlung aus, die aber die Fenster nicht passieren kann und so im Treibhaus gefangen ist. Dies sorgt für eine weitere Aufheizung, da die Wärme nicht durch Konvektion weggetragen werden kann, und beschleunigt so den Wachstumsprozess.

Dieser Treibhauseffekt wurde erstmals von dem französischen Mathematiker und Physiker Jean Baptist Joseph Fourier um 1824 beschrieben und dabei bereits auf die Atmosphäre übertragen [11]. Knapp 40 Jahre später griff der Engländer John Tyndall Fourier's Überlegungen auf, um hierdurch die Warm- und Kaltzeiten auf der Erde auf Schwankungen in der CO_2 Konzentration, verbunden mit einer weiteren Verstärkung durch Wasserdampf, zurückzuführen [12]. Diese Gedanken wurden von dem schwedischen Nobelpreisträger Swante Arrhenius 1896 weiter verfolgt, der bei einer Verdoppelung der CO_2 -Konzentration eine Erwärmung um $5\text{-}6^\circ\text{C}$ abschätzte [13]. Dabei ging er allerdings von deutlich zu großen Absorptionswerten für das CO_2 aus, dessen Wechselwirkung mit *IR*-Strahlung zu diesem Zeitpunkt noch weitgehend unbekannt war.

Unter dem Atmosphärischen Treibhauseffekt verstehen wir heute, dass das Sonnenlicht die Atmosphäre - wie vorher das Glas - weitgehend verlustfrei passiert und vom Boden absorbiert wird (siehe Abb. 5).

Der Boden heizt sich auf und wirkt seinerseits als thermischer Strahler im infraroten Bereich (dicke rote Pfeile). Diese Strahlung wird dabei von den Treibhausgasen deutlich stärker als die Sonnen-

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

strahlung absorbiert. Die angeregten Moleküle strahlen ihrerseits einen Teil der absorbierten Energie in Richtung All und ebenso einen Teil zurück zur Erde (dünne rote Pfeile). Die zum Boden gerichtete Strahlung wird allgemein als Gegenstrahlung bezeichnet und führt dazu, dass sich ebenso wie durch Rückstreuung an Wolken oder durch Reflektion der IR-Strahlung an den Scheiben des Gewächshauses an der Erdoberfläche eine höhere Temperatur einstellt, als dies ohne die rückstreuenden Gase in der Atmosphäre der Fall wäre.

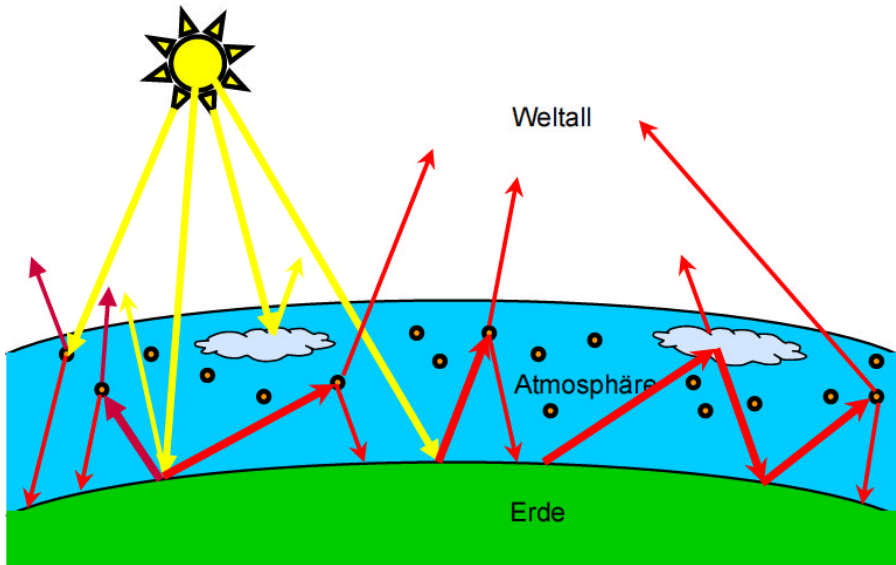


Abb. 5: Darstellung der Strahlungsprozesse zum Atmosphärischen Treibhauseffekt.

Dieser Prozess steht im Gleichgewicht zwischen einfallender und ins All wieder entweichender Strahlung und findet so seit Jahrtausenden statt. Er wird als natürlicher Treibhauseffekt bezeichnet und bestimmt zusammen mit der Direktaufheizung der Erde, dass die mittlere Erdtemperatur bei gut 15°C liegt und nicht auf -18°C abgekühlt ist.

Unter dem anthropogenen Treibhauseffekt versteht man, dass die Konzentration der Treibhausgase, besonders die des CO_2 , durch menschliche Eingriffe in den letzten Jahrzehnten erhöht worden ist und hieraus die wesentliche Temperaturerhöhung (95%) resultieren soll.

Dabei kommt es im infraroten Spektralbereich nur zu einer Wechselwirkung von elektromagnetischen Wellen mit einem Gas (Rotations-Vibrationsanregungen), wenn die Moleküle des Gases eine asymmetrische Ladungsverteilung besitzen (Dipolmoment) oder diese durch die Strahlung induziert wird und die Strahlung quasi resonant mit den Molekülen wechselwirkt (Anregung auf einem molekularen Übergang).

Es gibt keine Wechselwirkung mit den Edelgasen und eine vernachlässigbare Absorption durch Stickstoff- und Sauerstoffmoleküle.

Die wichtigsten Treibhausgase mit den jeweiligen Konzentrationen in der Atmosphäre sind in Tabelle 1 aufgeführt. Nur diese Gase werden in die weiteren Betrachtungen einbezogen.

Tabelle 1: Berücksichtigte Gase zur Berechnung des Atmosphärischen Treibhauseffekts.

Treibhausgas	Konzentration (ppm)
Wasserdampf: Tropen	22.900
Mittl. Breiten	7.253
Polarregionen	2.359
Kohlenstoffdioxid	380
Methan	1,8
Ozon zwischen 15 – 47 km	6,0

Um die Größe des Atmosphärischen Treibhauseffektes und damit auch einen möglichen Beitrag des anthropogenen Anteils bestimmen zu können, sind aufwändigere spektroskopische Rechnungen erforderlich, auf die hier nicht im Einzelnen eingegangen werden kann, aber doch einige Punkte angedeutet werden sollen (weitere Details siehe Ref. 14).

4 Spektroskopische Rechnungen

Die Rechnungen zum Treibhauseffekt umfassen sowohl die kurzwellige Absorption des Sonnenspektrums als auch die Infrarotabsorption der terrestrischen Strahlung und Re-Emission durch die Treibhausgase. Insgesamt werden über *1 Mio.* Linien dieser Gase herangezogen, die den kurz- wie langwelligen Spektralbereich überdecken.

Von jedem Übergang werden die spezifischen Daten wie Übergangsfrequenz, Linienintensität, Linienverbreiterung durch Eigen- und Umgebungsdruck sowie die Temperaturabhängigkeit dieser Größen benötigt, die von einer Datenbank abgerufen werden (*HITRAN08*–Datenbank [15]). Mit diesen Daten ist dann für jede dieser Linien das individuelle Linienprofil zu berechnen, um hieraus das Gesamtspektrum zu konstruieren.

Dabei ändern sich die Bedingungen in der Atmosphäre ganz erheblich mit der geographischen Breite und der Höhe über dem Erdboden. Deswegen sind solche Rechnungen für unterschiedliche klimatische Zonen, die Tropen, gemäßigten Breiten und Polargebiete durchzuführen (Abb. 6), über die sich vor allem die mittlere Temperatur und damit besonders der Wasserdampf in der Atmosphäre verändern.

Ebenfalls ändert sich der Einfallswinkel der Sonne und damit der Weg der Strahlung durch die Atmosphäre. Hierzu wird die Erdoberfläche wie ein abgestumpftes Ikosaeder, also wie ein überdimensionaler Fußball in Hexagonal- und Pentagonalflächen zerlegt (Abb. 7), um

so die Berechnungen auf eine endliche Zahl von Einfallswinkeln begrenzen zu können.

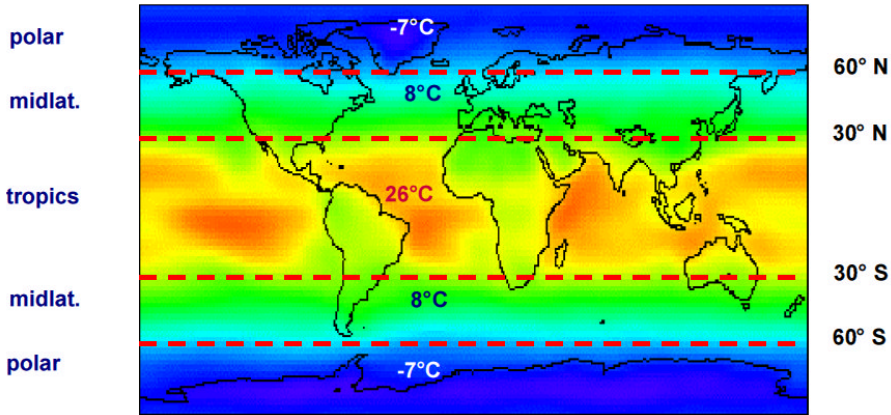


Abb. 6: Aufteilung in Klimazonen.

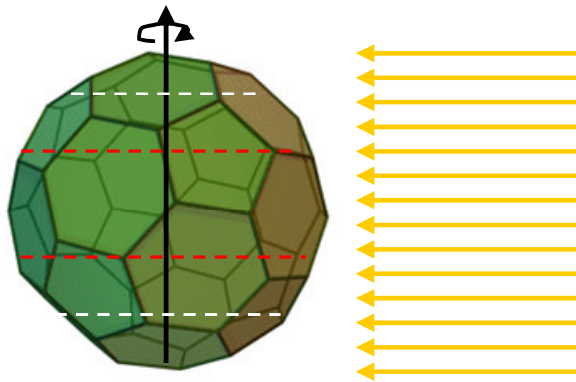


Abb. 7: Erde wird als abgestumpftes Ikosaeder (Bucky-Ball) betrachtet.

Und vor allem ändert sich die Dichte und Temperatur der Gase auch mit der Höhe über dem Erdboden, für Wasserdampf und Ozon auch ganz erheblich die Konzentration im Vergleich zu Stickstoff- und

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

Sauerstoff-Molekülen. Deshalb wird die Atmosphäre hierzu in bis zu 228 Schichten unterteilt, mit den dort jeweils herrschenden Bedingungen für die über 1 Mio. Linien die Teilabsorption in einer Schicht berechnet und schließlich über alle Schichten summiert (Abb. 8).

Um eine ausreichende spektrale Auflösung zu erreichen, die vor allem für die Erfassung der Flankenabsorption und den spektralen Überlapp der Gase von Bedeutung ist, wird das Gesamtspektrum in Teilbereiche aufgeteilt und erfordert mehr als 10.000 Einzelspektren, die jeder wiederum eine Berechnung über die zugrunde gelegten Höhenlagen beinhaltet.

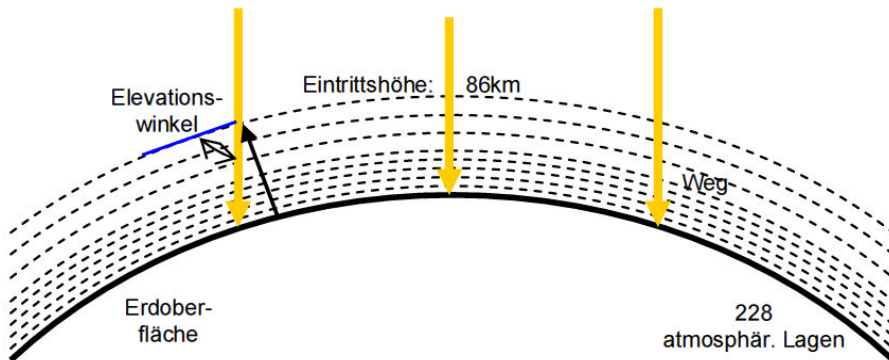


Abb. 8: Aufteilung der Atmosphäre in bis zu 228 Kugelschalen (Lagen).

Ein Beispiel für die Absorption des Sonnenlichts durch die Atmosphäre ist in Abb. 9 dargestellt. Die gestrichelte Kurve repräsentiert die nach Planck berechnete spektrale Intensität der Sonne als Funktion der Wellenlänge mit einem Maximum im grünen Spektralbereich bei einer Oberflächentemperatur der Sonne von 5.500 °C.

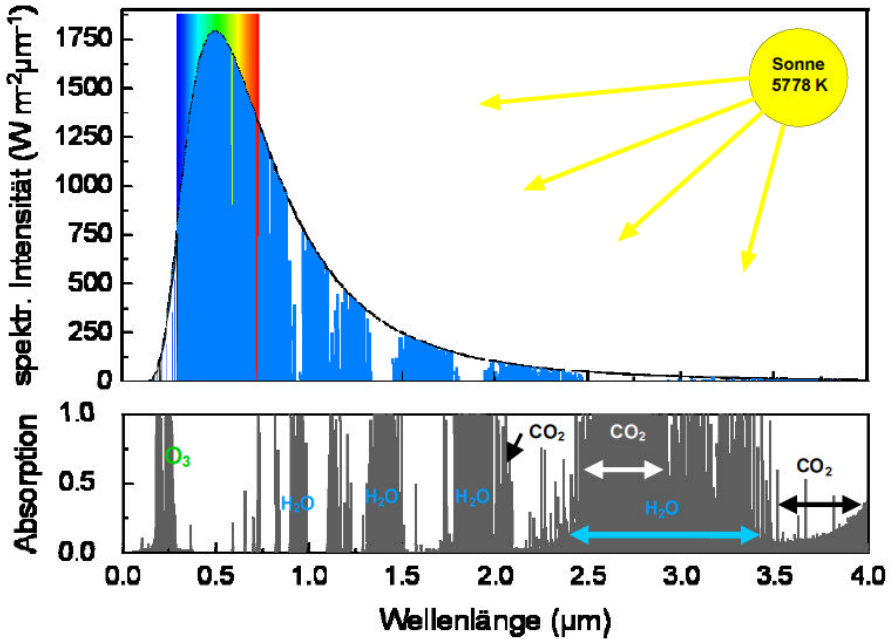


Abb. 9: Absorption des Sonnenlichts in der Atmosphäre durch H_2O , CO_2 , CH_4 und O_3 .

Darunter ist die Absorption durch die Atmosphäre in den Tropen dargestellt, verursacht durch CO_2 , CH_4 , O_3 und vor allem durch H_2O -Dampf. Die Absorption erfolgt auf scharfen Linien, die sich in einigen Spektralbereichen zu breiten, intensiven Bändern erweitern und die auf diesen Wellenlängen einfallende Strahlung zu 100% absorbieren. Im transmittierten Spektrum erscheint dies als Einbruch, da die Eingangsintensität auf diesen Wellenlängen gedämpft oder komplett weggefressen wurde.

Die Gesamtabsorption als Integral über alle Wellenlängen und unter Berücksichtigung des spektralen Überlapps beträgt 18,7 %, wobei der Wasserdampf in tropischen Breiten allein bereits 13,1 % beisteuert. Das CO_2 für sich würde hierbei 2,2 % liefern, aufgrund der teilweise deutlichen Überlappung mit gesättigten Wasserlinien redu-

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

ziert sich dessen Anteil aber auf 0,5%. Das sind nur 2,7 % der Gesamtabsorption. Den restlichen Anteil steuern CH₄ mit 0,2 % und O₃ mit 5 % bei. Eine Dämpfung des Sonnenlichts durch Mie-Streuung an Wassertröpfchen oder Wolken sowie durch Rayleigh-Streuung an den Luftmolekülen ist hierin nicht berücksichtigt.

Ebenso ist das Absorptionsverhalten der von der Erde ausgehenden Wärmestrahlung durch die Atmosphäre zu untersuchen. Abb. 10 zeigt als Einhüllende das vom Erdboden emittierte Spektrum für eine mittlere Bodentemperatur um 15°C mit einem Maximum um 10µm.

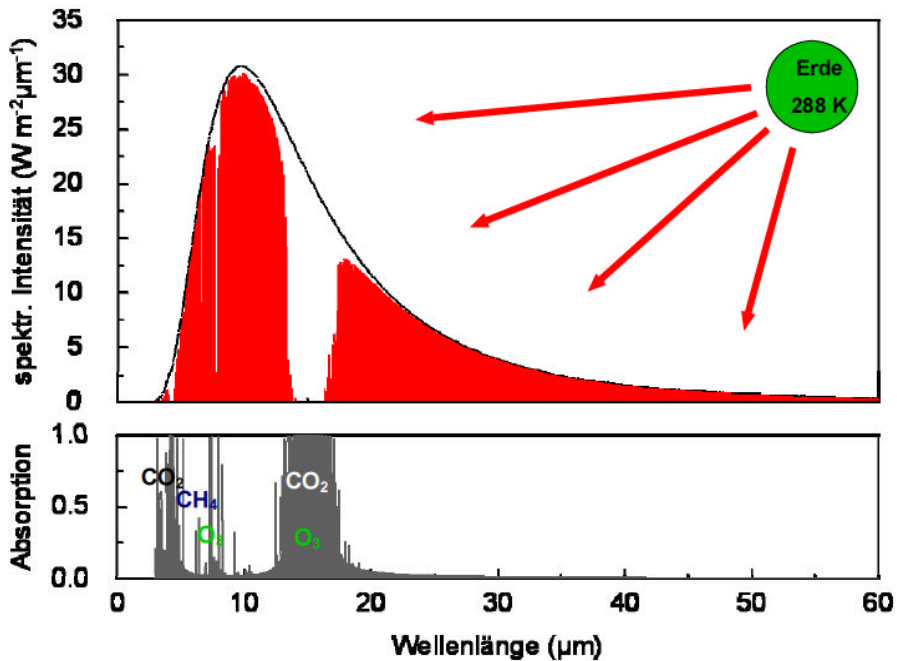


Abb. 10: Terrestrische Strahlung für eine Bodentemperatur von 15°C mit Absorption durch CO₂, CH₄ und O₃.

Dieses Spektrum, hier zunächst ohne Wasserdampf, wird besonders intensiv von CO₂ um 4 µm und als breite Bande um 15 µm absorbiert und führt zu den deutlich sichtbaren Einbrüchen im Transmissions-

spektrum. Die Absorption beträgt 24,1 %. Hinzu kommen noch 2 % durch Methan und 5,2 % durch O_3 .

Mit Wasser, das allein bereits einen Anteil von 77,7 % beisteuert, wird die Atmosphäre bis auf den Zentralbereich um $10\mu\text{m}$ vollständig undurchsichtig, und die GesamtabSORption unter Berücksichtigung von spektralen Überlagerungen steigt auf 85,3 % an (Abb. 11).

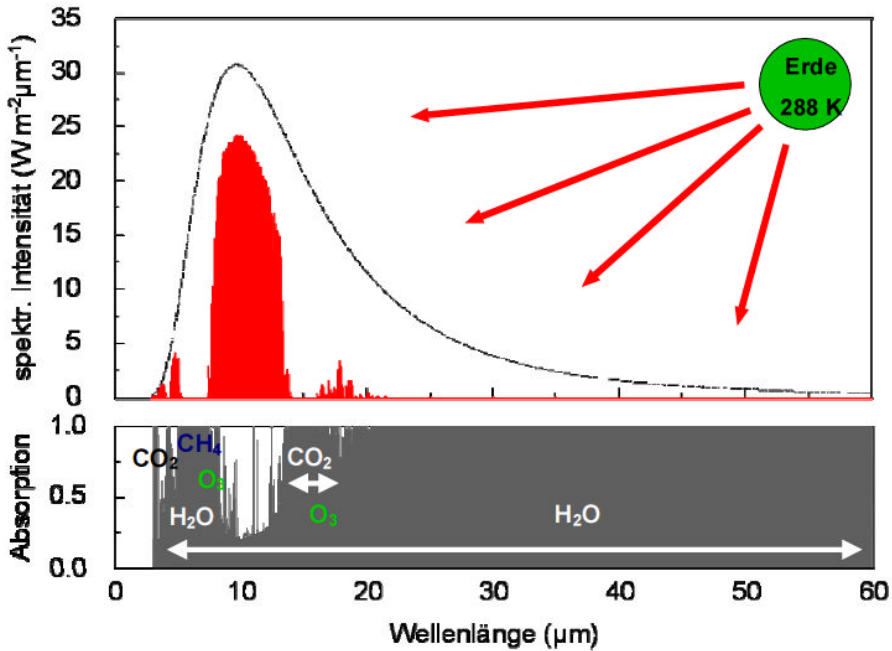


Abb. 11: Absorption der terrestrischen Strahlung durch H_2O , CO_2 , CH_4 und O_3 .

Ohne CO_2 wären dies 80,7 %, woraus folgt, dass der Anteil von CO_2 von ursprünglich 24,1 % auf 4,6 % zurückgedrängt wird.

Mit wachsender CO_2 -Konzentration zeigt sich dabei eine deutliche Sättigung, wie dies aus Abb. 12 ersichtlich wird und in ähnlicher Weise auch für den kurzwelligeren Bereich auftritt. So erhöht sich bei

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

Verdopplung des CO₂-Gehalts die Absorption nur noch um 1.2 %.
Dies entspricht einer Zunahme von 1.4 % der Gesamtabsorption.

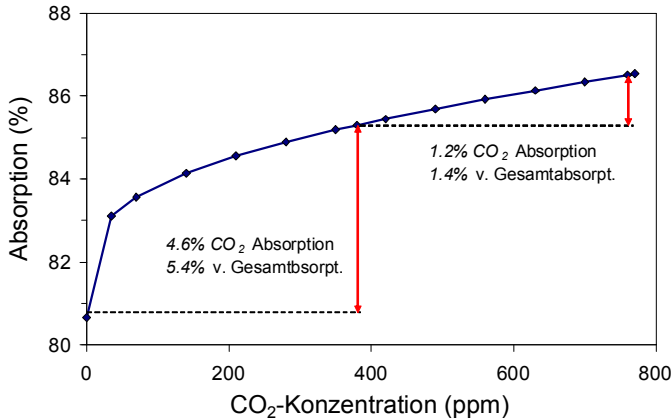


Abb. 12: Globale Absorption der terrestrischen Strahlung als Funktion der CO₂-Konzentration.

Es ist also festzustellen, dass der starke spektrale Überlapp insbesondere mit Wasser den Einfluss von CO₂ erheblich dämpft und dass die Sättigung auf den starken CO₂-Banden zu dem deutlich unterproportionalen Anstieg führt.

Für eine gesamt-klimatische Betrachtung reicht es nun allerdings noch nicht ganz aus, nur die Absorption in der Atmosphäre zu betrachten, denn ebenso wie die Erde strahlen auch die Gase entsprechend ihrer jeweiligen Temperatur die absorbierte oder über Stöße aufgenommene Energie wieder an die Umgebung ab. Dabei emittieren sie im *IR* auf den gleichen Frequenzen, auf denen sie auch absorbieren, denn genauer betrachtet ist die von den Molekülen ausgehende Wärmestrahlung nichts anderes als spontane Emission nach einer Anregung.

Strahlung, die sich in einer Schicht ausbreitet, wird einerseits durch Absorption gedämpft, gleichzeitig überlagert sich aber die in

alle Richtungen abgestrahlte spontane Emission (siehe Abb. 13). Die Netto-Änderung errechnet sich dann aus der spektralen Ausgangsintensität I_v^{i-1} der $(i-1)$ -ten Schicht, deren Dämpfung in der i -ten Schicht (vorgegeben durch den Absorptionskoeffizienten $\bar{\alpha}^i(\nu)$ auf der Frequenz ν) sowie der hinzukommenden Emission (ebenfalls abhängig vom Absorptionskoeffizienten sowie der Kirchhoff-Planck-Funktion $B_v^i(T^i)$ bei der Temperatur T^i).

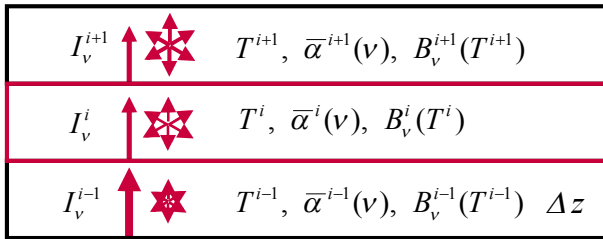


Abb. 13: Schrittweise Berechnung der spektralen Intensität nach dem Strahlungs-Transfer-Modell.

Da sich die Absorption und ebenso die Emission von Höhenlage zu Höhenlage mit der Temperatur und Dichte der Gase ändern, ist dies wieder Schicht für Schicht und für alle Ausbreitungsrichtungen zu bestimmen und schließlich über den Gesamtweg durch die Atmosphäre numerisch zu integrieren.

Diese Vorgehensweise zur Berechnung der Strahlausbreitung in der Atmosphäre ist bekannt als Strahlungs-Transfer-Modell und geht auf eine Grundgleichung zurück, die von dem Göttinger Astrophysiker Schwarzschild bereits 1906 aufgestellt wurde [16] (zur Ableitung der Strahlungs-Transfer-Gleichung aus den Einstein'schen Betrachtungen „Zur Quantentheorie der Strahlung“ sowie einer Verallgemeinerung für niedrige und hohe Stoßraten in der Atmosphäre siehe auch Ref. 17).

Ein Beispiel für die von der Erde und Atmosphäre ausgehende Strahlung, wie sie von einem Satelliten in 20 km Höhe bei wolkenfrei-

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

em Himmel über der Polarregion gemessen wird, ist aus Abb.14a zu
ersehen.

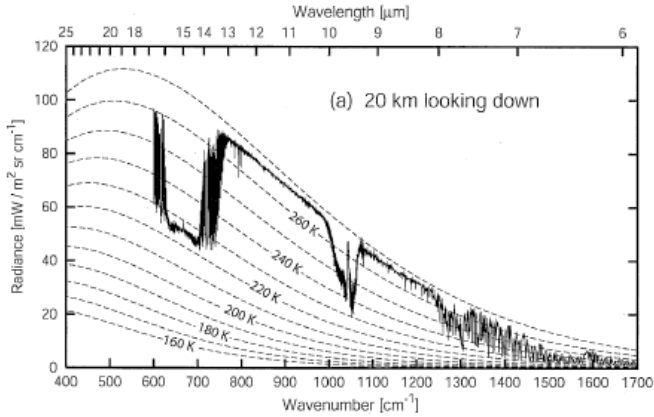


Abb. 14: a) Satelliten-Messung der von der Erde und Atmosphäre ausgehenden Strahlung aus 20 km Höhe über der Polarregion bei wolkenfreiem Himmel [18].

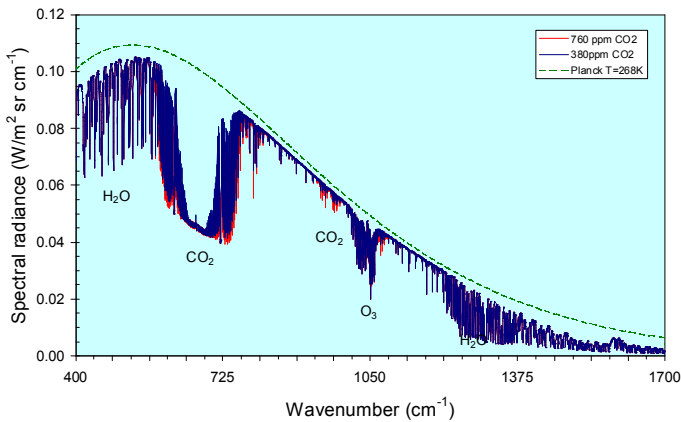


Abb. 14: b) Simuliertes Spektrum bei der Bodentemperatur von 266 K mit 380 ppm (blauer Graph) und 760 ppm (roter Graph) CO₂-Konzentration [19].

Von besonderem Interesse ist dabei der erste starke Einbruch um 650 cm^{-1} bzw. $15\mu\text{m}$, der seine Ursache in der Absorption durch die breite CO_2 -Bande in diesem Bereich hat. Trotz der vollständigen Absorption der vom Boden ausgehenden Strahlung auf diesen Wellenlängen über nur einige 10 m geht die Intensität nicht auf Null zurück, sondern bildet ein breiteres Plateau aus, das sich erklärt aus der Eigenemission der Atmosphäre durch die CO_2 -Moleküle mit einer Temperatur von etwa 225 K (Tropopause).

Der Vergleich mit einem berechneten Spektrum (siehe Abb. 14b) zeigt, dass solche Messungen mittlerweile gut verstanden werden und mit dem Strahlungs-Transfer-Modell recht zufriedenstellend nachgebildet werden können.

Welchen Einfluss eine Verdopplung der CO_2 -Konzentration auf die Strahlungsbilanz hat, ist aus dem Vergleich des blauen (380 ppm) und roten Graphen (760 ppm) in Abb. 14 b zu ersehen. Die Tiefe des Trichters verändert sich überhaupt nicht und die Breite nur relativ geringfügig. Dies resultiert aus der deutlichen Sättigung in der Absorption und ebenso in der Emission.

Lediglich in den Flanken und den sehr schwachen Absorptionsbanden um 900 cm^{-1} zeigen sich leichte Veränderungen, die dazu führen, dass bei erhöhter Konzentration als Nettobetrag eine leicht reduzierte Abstrahlung von Erdoberfläche und Atmosphäre zu verzeichnen ist.

Dieser Sachverhalt ist in Abb. 15 nochmals schematisch dargestellt. Bei einfacher CO_2 -Konzentration stellt sich eine Bodentemperatur T_0 ein mit einer daraus resultierenden terrestrischen Abstrahlung, die im Gleichgewicht zu der von der Sonne zugeführten Strahlungsleistung steht.

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

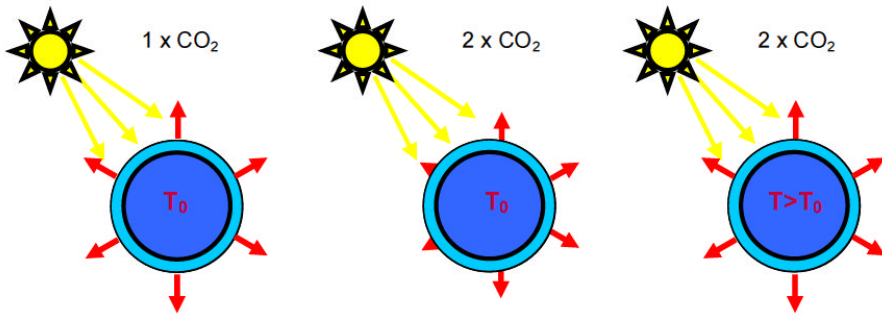


Abb. 15: Schematische Darstellung zur Erderwärmung, verursacht durch den CO₂-Strahlungsantrieb.

Bei doppeltem CO₂-Gehalt in der Atmosphäre kommt es dann zunächst zu einer reduzierten Abstrahlung und führt bei weiterhin konstanter Heizleistung durch die Sonne zu einer prinzipiell zusätzlichen Aufheizung der Erde, bis diese eine Temperatur angenommen hat, durch die die Strahlungsverluste gerade wieder kompensiert werden.

Eine solche Änderung, verursacht durch eine externe Störung, in diesem Fall durch das CO₂, wird als Strahlungsantrieb (radiative forcing) bezeichnet, der das Klimagleichgewicht verändert. Er wird angegeben in W/m^2 und üblicherweise berechnet in der Tropopause ($\sim 12,5$ km Höhe) als Netto-Betrag aus der einfallenden sowie auslaufenden Strahlungsbilanz, kurzwellig wie langwellig.

5 IPCC-Rechenweg

Aus diesem Strahlungsantrieb wird entsprechend dem IPCC-Rechenweg auf die Erderwärmung geschlossen. In Modellrechnungen wird dabei bevorzugt eine Verdopplung der CO₂-Konzentration angenommen, um eine einheitliche Basis für Vergleiche dieser Modelle untereinander zu haben. Gleichzeitig macht man sich so frei von Prognosen, wann eine solche Verdopplung eintreten

könnte. Eine unter diesen Gegebenheiten berechnete Erderwärmung wird dann als *CO₂-Klimasensitivität* bezeichnet.

Bei einer Verdopplung von CO₂ geht das IPCC von einem Strahlungsantrieb von $\Delta F = 3.71 \text{ W/m}^2$ aus [20], wobei sich dieser Wert allerdings, abhängig von den zugrunde gelegten Annahmen über den Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre sowie der Bewölkung, von Modell zu Modell erheblich unterscheiden kann.

Im Weiteren wird dann von einem sehr einfachen Ansatz ausgegangen, dass nämlich eine Änderung der Erdtemperatur ΔT_E direkt proportional zum Strahlungsantrieb verläuft mit

$$\Delta T_E = \lambda_s \cdot \Delta F .$$

Der Proportionalitätsfaktor λ_s wird als Klimasensitivitätsparameter bezeichnet und z.T. vereinfacht aus der Abstrahlung der Atmosphäre als breitbandiger Planck-Strahler abgeleitet. Abgesehen von dem Umstand, dass die Atmosphäre eben kein solcher breitbandiger Strahler ist, werden hierbei teils sehr unterschiedliche Temperaturen zugrunde gelegt, indem einmal von der Bodentemperatur, in anderen Fällen von einer mittleren Atmosphärentemperatur ausgegangen wird. Ebenso gibt es aber auch umfangreiche Klima-Modellrechnungen, bei denen λ_s direkt ermittelt wird [21]. Die Ergebnisse variieren dabei *i.W.* zwischen $\lambda_s = 0.25 - 1 \text{ K/(Wm}^2\text{)}$. Für den vereinfachten Fall mit einer effektiven Temperatur der Atmosphäre von 254 K (-19°C, entspricht *~5 km Höhe*) ergibt sich für λ_s ein Wert von $\lambda_s = 0,27 \text{ K/(Wm}^2\text{)}$ [21] und zusammen mit dem Strahlungsantrieb von $3,71 \text{ W/m}^2$ hieraus eine Temperaturerhöhung von $\Delta T_E = 1,0 \text{ K}$.

Neben dieser Erwärmung, die gewissermaßen als Basiswert für einen Anstieg bei CO₂-Verdopplung zu interpretieren ist, kann es durch die Temperaturänderung der Erde und der Atmosphäre zu einer Reihe weiterer Sekundäreffekte kommen, die zu einer zusätzlichen Erhöhung oder auch Reduzierung des Basiswertes führen. In den Klimawissenschaften wird in diesem Zusammenhang von sogenannten Rückkopplungseffekten gesprochen.

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

Eine besondere Rolle kommt hierbei wiederum dem Wasserdampf zu. So ist davon auszugehen, dass mit wachsender Temperatur auch der Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre zunimmt, dies zu einer erhöhten Absorption und damit wieder zu einer weiteren Erwärmung führt. Aus theoretischen Betrachtungen bei teils sehr unterschiedlichen Annahmen werden für die Wasserdampfrückkopplung Verstärkungsfaktoren zwischen 1,5 und 3 angeführt [22,10].

Noch größere Unkenntnis herrscht über den Einfluss von Wolken. So besteht zwar weitgehend Einigkeit darüber, dass hochstehende Cirrus-Wolken wärmend, tiefliegende Stratus-Wolken dagegen kühlend wirken, aber es gibt unterschiedliche Theorien und teils Beobachtungen darüber, ob mit erhöhter Temperatur sich niedrige Wolken eher auflösen und damit zu einer positiven Rückkopplung - also einer Verstärkung des Treibhauseffekts - führen [23] oder mit dem erhöhten Wasserdampf eher eine vermehrte Wolkenbildung auftreten wird, die eine negative Rückkopplung und damit kühlende Wirkung zur Folge hat [24].

Eine weitere positive Rückkopplung von ca. 10-15 % wird auf die Eis-Schnee-Albedo zurückgeführt, die besagt, dass mit steigender Temperatur die Schnee- und Eisbedeckung rückläufig ist und damit die von der Erdoberfläche reflektierte Sonneneinstrahlung abnimmt bzw. die vom Boden aufgenommene Strahlung zunimmt.

Schließlich werden noch Korrekturen durch Aerosol-Rückstreuung bzw. -Heizung sowie Änderungen in der Gegenstrahlung bei verändertem Temperaturgradienten über die Troposphäre (lapse-rate-feedback) einbezogen, beide in ihrer Größe und ihrem Vorzeichen stark abhängig von den jeweiligen Annahmen.

Ausgehend von dem obigen Ansatz und unter Berücksichtigung der verschiedenen Rückkopplungsprozesse, aber auch durch Einbeziehen einiger Modelle, in denen entsprechende Rückwirkungen

unmittelbar enthalten sind, gibt das *IPCC* die CO_2 -Klimasensitivität an zu

$$C_s = 3,2 \text{ } ^\circ\text{C in den Grenzen von } 2,1 - 4,4 \text{ } ^\circ\text{C [25].}$$

Sowohl die Unzulänglichkeiten und unterschiedlichen Angaben für den Basiswert, insbesondere aber die große Spannbreite für die Wasserdampfdruckkopplung, die Unkenntnis über den Einfluss von Wolken und die breite Streuung in den Ergebnissen der Modellrechnungen schlagen sich unmittelbar nieder in dem Misstrauen, das einer auf dieser Basis ermittelten Klimasensitivität entgegenzubringen ist.

Dies war Grund und Motivation genug, um eigene spektroskopische Rechnungen zur Absorption und Emission der wichtigsten Treibhausgase durchzuführen (siehe oben) und ein Klimamodell zu entwickeln, das speziell auf die Berechnung der CO_2 -Klimasensitivität ausgelegt ist und sich deutlich von dem zuvor skizzierten Rechenweg unterscheidet.

6 Eigene Modellrechnungen

Das zur eigenen Ermittlung der Klimasensitivität herangezogene Modell ist in Abb. 16 skizziert und lässt sich charakterisieren als Energie-Bilanz-Modell [14]. Die Atmosphäre und der Boden werden als zwei Lagen betrachtet, die gleichzeitig als Absorber und Wärmestrahler agieren.

Ebenfalls wird ein Wärmetransfer zwischen diesen Lagen durch Konvektion und Evapotranspiration sowie zu angrenzenden Klimazonen durch Wind und Meeresströmungen berücksichtigt.

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

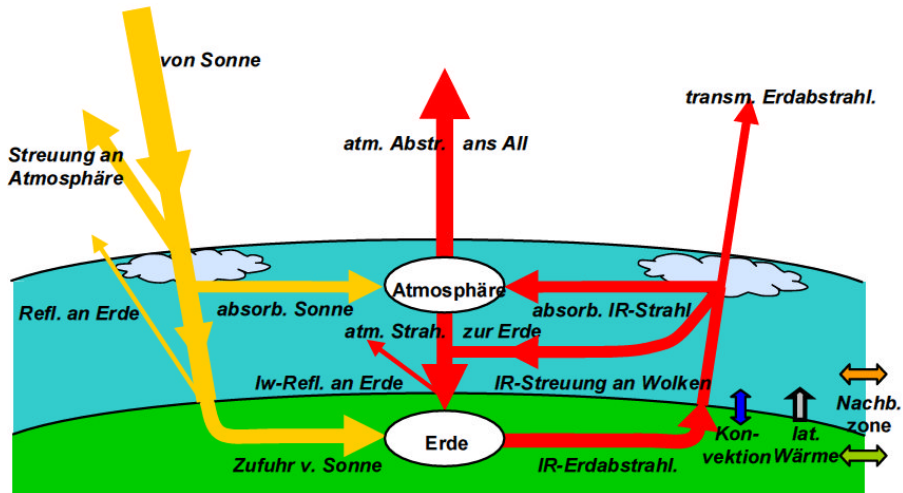


Abb. 16: Energie-Bilanz-Modell zur Berechnung der Klimasensitivität.

Im Gleichgewicht geben dabei die Atmosphäre wie die Erde soviel Energie wieder ab, wie sie von der Sonne und der Nachbarlage oder Klimazone aufgenommen haben. Dies ist nichts anderes als Energieerhaltung.

Dieses Gleichgewicht verschiebt sich allerdings zunächst leicht, wenn die Konzentration der Treibhausgase etwas anwächst und hierdurch eine erhöhte Absorption des Sonnenlichts und vor allem der langwelligeren Erdabstrahlung erfolgt. Daraus resultiert einerseits eine leicht reduzierte Direkterwärmung der Erde durch die Sonne, andererseits erwärmt sich die Atmosphäre zusätzlich und gibt ihrerseits den Temperaturüberschuss als Wärmestrahlung z.T. an die Erde und z.T. ans All wieder ab.

Die Änderungen in der Absorption und Emission werden dabei erfasst durch Bilanzgleichungen, die neben der Absorption und Emission von einer Reihe weiterer Parameter wie dem Reflexionsgrad an Wolken und der Erdoberfläche oder der Konvektion bestimmt werden. Letztlich darf sich an der Bilanz zu dem, was hinein- und heraus

fließt, nichts ändern, aber es kommt zu einem veränderten Gleichgewicht zwischen diesen Lagen.

Die laterale Auflösung der Rechnungen wird auf die drei Hauptklimazonen, Tropen, Gemäßigte Breiten und Polargebiete begrenzt (siehe Abb. 6), die sich wesentlich in den mittleren Bodentemperaturen, dem vertikalen Temperaturprofil (lapse rate) sowie in den Wasserdampfkonzentrationen und vertikalen Verteilungen hierfür unterscheiden. Der Wasserdampfgehalt ist dabei abgeleitet aus aktuellen GPS-Messungen für diese Zonen [26].

Die Simulation für eine Zone wird dann über die Atmosphären- und Oberflächen-Albedo sowie die *IR*-Rückstreuung an Wolken an die jeweilige Temperatur in einer Zone sowie die beobachteten auf- und abwärtsgerichteten Strahlungsflüsse angepasst. Auf diese Weise erfolgt gewissermaßen eine Eichung des Modells an den real vorliegenden Verhältnissen. Ausgehend von solch einem Gleichgewicht, das sich also weitgehend an den aktuellen Klimadaten orientiert und für eine CO_2 -Konzentration von 380 ppm berechnet ist, wird dann bei Änderung des CO_2 -Gehalts eine daraus resultierende neue Gleichgewichtsverteilung mit der sich daraus ergebenden Bodentemperatur ermittelt.

Da sich mit veränderten Temperaturen für den Boden und die Atmosphäre sowohl die Konvektion wie auch der Wasserdampfgehalt und der Temperaturgradient in der Atmosphäre ändern, führt dies zu einem nichtlinear gekoppelten Bilanzgleichungssystem, das iterativ gelöst wird, bis sich Selbstkonsistenz für das Gesamtsystem einstellt. Die Wasserdampf-Rückkopplung muss hierbei nicht spekulativ zugrunde gelegt werden, sondern ergibt sich aus den Messungen für den Wassergehalt in den drei Klimazonen, indem die Absorption und Emission für jede Klimazone aufgrund der unterschiedlichen Temperaturen und Konzentrationen der Gase jeweils individuell berechnet werden und aus deren Verlauf über die drei

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

Zonen die Absorptionsänderung mit der Temperatur unmittelbar abgelesen werden kann.

Ebenso lässt sich aus den Rechnungen nach dem Strahlungs-Transfer-Modell der sich mit dem Temperaturgradienten in der Atmosphäre (lapse-rate) verändernde aufwärts- und abwärtsgerichtete Strahlungsanteil für die drei Zonen ermitteln und hieraus wiederum die entsprechende Rückkopplung mit der Temperatur bestimmen.

Da die mit dem hier beschriebenen Klimamodell durchgeführten Rechnungen keine zeitlichen Entwicklungen oder Aussagen über lokale Einflüsse liefern sollen und sich andererseits zeigt, dass die für die einzelnen Klimazonen ermittelten Klimasensitivitäten nur vergleichsweise moderat voneinander abweichen (dies ist u.a. auf ein ähnlich deutliches Sättigungsverhalten in der Absorption von Wasserdampf wie beim CO₂ zurückzuführen), ist davon auszugehen, dass eine höhere laterale Auflösung über die drei Klimazonen hinaus keine wesentlichen Änderungen oder Verbesserungen ergeben wird. Hierdurch wird der Rechenaufwand gegenüber Modellen mit Maschinenweiten von *200 km* oder noch darunter und der Simulation weiterer Zusammenhänge, die für die hier anstehenden Betrachtungen nicht relevant sind, um Größenordnungen geringer. Hinzu kommt, dass solche Modelle systematisch zu chaotischem Verhalten neigen und kleinste Variationen in den Anfangsbedingungen zu deutlich veränderten oder unreproduzierbaren Ergebnissen führen.

Für die Berechnung der Absorption von solarer und terrestrischer Strahlung über ein Höhenprofil von *86 km* wird die Atmosphäre in *46* Schichten unterteilt, für die Ermittlung der aufwärts bzw. abwärts emittierten *IR*-Strahlung, die sich durch das Temperatur- und Dichteprofil der Gase deutlich asymmetrisch verhält, wird sogar eine Aufteilung in *228* Schichten vorgenommen. Um den Einfluss von Wasserdampf auf das Absorptionsverhalten von CO₂ durch den spektralen Überlapp sowie das Sättigungsverhalten und die verbleibende Flankenabsorption hinreichend präzise erfassen zu können,

werden die Spektralrechnungen mit einer Auflösung von 1 GHz durchgeführt.

Als gewichtetes Mittel über die drei Klimazonen ergibt sich für den globalen Temperaturanstieg als Funktion der CO_2 -Konzentration der in Abb. 17 wiedergegebene annähernd logarithmische Verlauf, aus dem sich unmittelbar die Klimasensitivität als Temperaturanstieg bei Verdopplung der CO_2 -Konzentration bestimmen lässt zu

$$C_s = 0,6 \pm 0,2^\circ C .$$

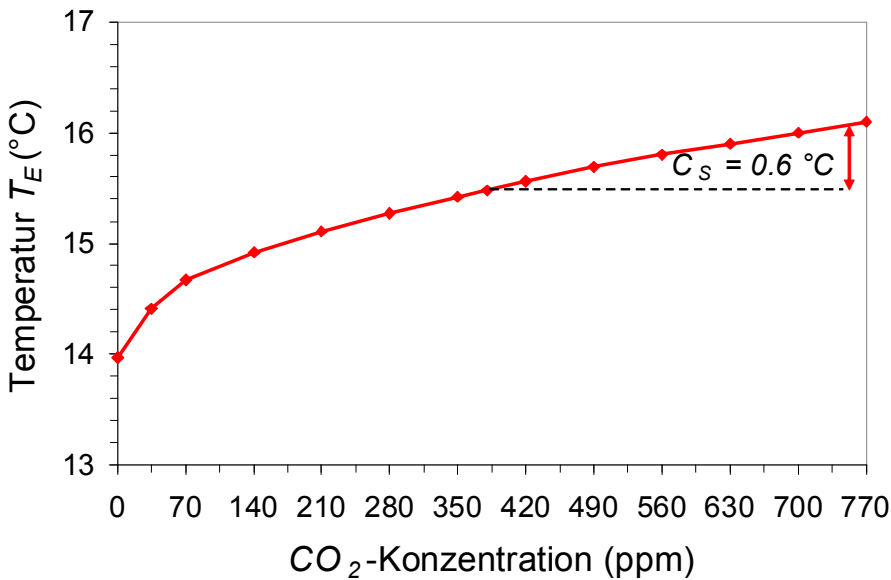


Abb. 17: Anstieg der mittleren Erdtemperatur als Funktion der CO_2 -Konzentration.

In diesem Ergebnis sind, wie bereits zuvor ausgeführt, die Wasserdampf- und "lapse-rate"-Rückkopplung berücksichtigt, die zusammen eine Erhöhung von 0,2 °C beisteuern. Nicht einbezogen sind dagegen die anderen genannten Rückwirkungen, deren Größe und teils auch Vorzeichen nicht genauer bekannt sind.

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

Um den Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Klimasensitivität (nicht die unmittelbare Erdtemperaturänderung) festzustellen, wurden die Parameterwerte systematisch in kleineren Grenzen variiert. Dabei zeigt sich, dass zwei Parameter einen wesentlichen Einfluss auf das obige Ergebnis haben, die Konvektion, die schon relativ hoch angesetzt wurde, und vor allem die Rückstreuung der IR-Strahlung an Wolken. Beide zusammen bestimmen i.W. die angeführte Unsicherheit von 30 % für die Klimasensitivität. So zeigt sich, dass bei einem Anstieg der vergleichsweise niedrig angesetzten Bewölkung von 55% auf 60 % die Klimasensitivität von 0,6°C weiter zurückgeht auf 0,53 °C, und sie würde Null für eine Bewölkung von 100 %, da dann jede Absorption und Rückstrahlung durch Klimagase vollständig überdeckt wird durch die Rückstreuung an Wolken.

7 Zusammenfassung

Die hier angegebene Klimasensitivität liegt gut einen Faktor 5 unter dem vom *IPCC* angeführten Wert. Diese große Diskrepanz wird zum einen darauf zurückgeführt, dass der hier ermittelte Beitrag für CO₂ an der Gesamtabsorption deutlich kleiner ausfällt als in den vom *IPCC* angeführten Arbeiten, und zum anderen eine wesentlich niedrigere Wasserdampfrückkopplung gefunden wurde, als sie vom *IPCC* verwendet wird. Beide Aspekte haben unmittelbar mit dem in der Atmosphäre zugrunde gelegten Wassergehalt sowie dem deutlich gesättigten Absorptionsverhalten von CO₂ und ebenso vom Wasserdampf zu tun. Die vom *IPCC* berücksichtigten Publikationen stützen sich vornehmlich auf ältere und vereinfachte spektroskopische Rechnungen, die nicht ausreichend die Überlagerung der Spektren mit der daraus resultierenden gegenseitigen Beeinflussung einbeziehen, und darüber hinaus wird in diesen Arbeiten offensichtlich von einer Zusammensetzung der Atmosphäre ausgegangen, die der über dem amerikanischen Kontinent (US Standard 1976 Atmosphere) aber nicht

der mittleren global anzutreffenden Atmosphäre (Average Global Atmosphere) mit einem fast 100 % höheren Wasseranteil entspricht.

Eine zusätzliche Berücksichtigung der Eis-Schnee-Albedo-Rückkopplung würde dagegen nur eine vergleichsweise kleine Korrektur von ca. $0,05^{\circ}\text{C}$ bewirken.

Mit der hier angegebenen Klimasensitivität kann ein erhöhter CO_2 -Anteil, der sowohl natürlichen wie anthropogenen Ursprungs sein wird, zu keiner maßgeblichen Erwärmung der Erde beigetragen haben. Der Anstieg von 280 auf 380 *ppm* in den letzten 150 Jahren würde gerade einmal $0,21^{\circ}\text{C}$ beisteuern, und dies erst, nachdem sich ein Gleichgewicht eingestellt hat. Damit sind von der durch das IPCC angegebenen Temperaturerhöhung von $0,74^{\circ}\text{C}$ über die letzten 130 Jahre dem CO_2 nicht 95 % sondern lediglich 28 % anzulasten.

Eine darüber hinausgehende Erwärmung, sofern es sich nicht um Messfehler oder urbane Einflüsse handelt, muss seinen Ursprung in anderen Ursachen haben wie beispielsweise einer erhöhten Sonnenaktivität, der Beeinflussung der Wolkenbildung durch kosmische Strahlung [27], der Stellung der Erde zur Sonne, der ozeanischen Oszillationen [28], dem Einfluss von Aerosolen in der Atmosphäre oder einer erhöhten Aktivität im Erdinneren.

Es gibt keinen Grund für Hysterie und Panik, und Spekulationen, die einer wissenschaftlichen Überprüfung nicht standhalten aber mit missionarischem Eifer weitergetragen werden, sollten wir schleunigst vermeiden. Es ist bekannt, dass Panikmeldungen sich besonders gut verkaufen. Sie dürfen aber niemals die Glaubwürdigkeit und Ehrenhaftigkeit weder im Journalismus noch in der Politik und schon gar nicht in den Wissenschaften infrage stellen.

Eine globale Erwärmung und mögliche Folgen sollen nicht verniedlicht werden, aber wir sollten rasch zu einer sachlicheren Bewertung und Diskussion zurückkehren, die sich auf Fakten und nicht Vermutungen abstützt. Vor allem dürfen nicht leichtfertig mögliche

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

andere Ursachen ausgeschlossen werden, und es sollte nicht vergessen werden, dass es immer schon erhebliche natürliche Temperaturschwankungen auf der Erde gab, unabhängig von anthropogenen Einflüssen.

Referenzen

1. Frank Ramond: *Ich zähl bis drei*, Oktober 2009
<http://www.youtube.com/watch?v=vUdEG0C1RNE>
2. Mitteilungen der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen:
Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO₂-armen Wirtschaft bis 2050, Brüssel, 8.3.2011, KOM(2011) 112
http://www.nachhaltigkeit.info/artikel/klima_roadmap_2050_1454.htm
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0112:FIN:DE:PDF>
3. M. Erbs, R. Manderscheid, H.-J. Weigel: *A combined rain shelter and free-air CO₂ enrichment system to study climate change impacts on plants in the field*, *Methods in Ecology and Evolution* 3(1), p. 81-88 (2012)
4. <http://www.cerina.org/co2-2011>
5. J. R. Petit et.al.: *Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica*, *Nature* 399, 429 (1999)
6. M. S. Torn, J. Harte: *Missing feedbacks, asymmetric uncertainties, and the underestimation of future warming*, *Geophysical Research Letters*, 33, L10 703(2006)
7. C. D. Keeling: *The Concentration and Isotopic Abundances of Carbon Dioxide in the Atmosphere*, *Tellus* 12, 200–203 (1960)
8. G. J. Retallack: *A 300-million-year record of atmospheric carbon dioxide from fossil plant cuticles*, *Nature* 411, 287-290 (2001)
9. Goddard Institute for Space Studies:
<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs>

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

10. IPCC, *Climate Change 2001: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Third Assessment Report*, ed. by R. J. Watson and the Core Writing Team (Geneva, 2001).
11. J. B. J. Fourier: *Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires*, *Annales de Chimie et de Physique*, Paris 1824
12. J. Tyndall: *On Radiation through the Earth's Atmosphere*. *Philosophical Magazine* ser. 4, 25, S. 200–206 (1863)
13. S. Arrhenius: *On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground*, *London, Philos. Mag. & Jour. of Sc.* 5, 237–276 (1896)
14. H. Harde: *Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei? Spektroskopische Untersuchungen und Modellrechnungen zum Einfluss von H₂O, CO₂, CH₄ und O₃ auf unser Klima*, BoD, Norderstedt 2011, ISBN: 9 783842 371576
15. L.S. Rothman et al.: *The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database*, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* 110, 533–572 (2009)
16. K. Schwarzschild, *Göttinger Nachrichten*, p. 41 (1906)
17. H. Harde: *Radiation and Heat Transfer in the Atmosphere: A Comprehensive Approach on a Molecular Basis*, eingereicht bei *International Journal of Atmospheric Sciences*, April 2013
18. D. Tobin, Space Science and Engineering Center, Univ. Wisconsin-Madison
19. Eigene Rechnungen
20. G. Myhre, E. J. Highwood, K. P. Shine, F. Stordal: *New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases*, *Geophys. Res. Letters* 25, pp. 2715-2718 (1998)
21. V. Ramanathan, L. Callis, R. Cess, J. Hansen, I. Isaksen, W. Kuhn, A. Lacis, F. Luther, J. Mahlman, R. Reck, M. Schlesinger: *Climate-*

- Chemical Interactions and Effects of Changing Atmospheric Trace Gases*, Rev. Geophys. 25, 1441-1482 (1987)
22. V. Ramanathan, and J. A. Coakley Jr.: *Climate modeling through radiative-convective models*, Rev. Geophys., 16, 465-489 (1978)
 23. A. C. Clement, R. Burgman, J. R. Norris: *Observational and Model Evidence for Positive Low-Level Cloud Feedback*, Science 325 no. 5939, pp. 460-464 (2009)
 24. R. S. Lindzen, M.-D. Chou, A. Y. Hou: *Does the Earth Have an Adaptive Infrared Iris?*, Bull. Am. Meteorol. Soc. 82, 417-432 (2011)
 25. D. A. Randall, R. A. Wood, S. Bony, R. Colman, T. Fichefet, J. Fyfe, V. Kattsov, A. Pitman, J. Shukla, J. Srinivasan, R. J. Stouffer, A. Sumi, K. E. Taylor: *Climate Models and Their Evaluation*, in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007
 26. S. Vey: *Bestimmung und Analyse des atmosphärischen Wasserdampfgehaltes aus globalen GPS-Beobachtungen einer Dekade mit besonderem Blick auf die Antarktis*, Technische Universität Dresden, Diss., 2007
 27. N. Calder, H. Svensmark: *The Chilling Stars*, Icon Books, 2007, ISBN-10: 1-84046-815-7
 28. F. Vahrenholt, S. Lüning: *Die kalte Sonne*, Hoffmann u. Campe, 2012, ISBN 978-3-455-50250-3

Sonne und Treibhausgase – Ursachen des Klimawandels

FRITZ VAHRENHOLT

1 Einleitung

Bis zur Veröffentlichung meines Buches "Die kalte Sonne" war ich in den Medien und der deutschen Öffentlichkeit als ein Verfechter der regenerativen Energien, der ich heute noch bin, gelobt worden. Jetzt werde ich plötzlich als zweifelhafter Wissenschaftler angesehen, weil ich die Vorgehensweise des IPCC (UN Subcommittee Intergovernmental Panel for Climate Change) hinterfrage. Dabei habe ich bis vor einigen Jahren, als Umweltsenator in Hamburg und als Gründer einer der erfolgreichsten Windfirmen Repower, die Aussagen des IPCC ohne Abstriche akzeptiert. Was hat nun dazu geführt, dass ich meinen Standpunkt überdacht habe?

Diesen Lernprozess zu den Aussagen des IPCC bezüglich Klimawandel möchte ich im nächsten Kapitel darstellen und daraus auch kritische Anmerkungen zur deutschen Energiewende in einem weiteren Kapitel anfügen.

2 Kritische Betrachtung des Klimawandels und der IPCC Darstellung

In 2008 wurde ich zum Vorstandsvorsitzenden von RWE Innogy ernannt, der neu gegründeten RWE Tochtergesellschaft für erneuerbare Energien. In dieser Gesellschaft haben wir jährlich mehr als 1 Milliarde € in erneuerbare Energien investiert, vor allem in Onshore- und Offshore- Windturbinen, in England, in Deutschland und auch

im Rest von Europa. Aber zu unserer Überraschung waren die jährlichen Ernten in den Jahren 2008, 2009 und 2010 in Nordeuropa enttäuschend und lagen um 10-30 % unter unseren Erwartungen.

Wir mussten dieser Sache auf den Grund gehen. War das bereits eine Folge des Klimawandels? Auch ein Blick in die "Bibel des Klimawandels", den IPCC Bericht von 2007 [1], half uns nicht weiter, da darin eine Zunahme der jährlichen Windgeschwindigkeiten in nördlichen Breiten vorhergesagt wurde. Zusammen mit einigen Meteorologen fanden wir die Ursache: Es gibt eine Korrelation zwischen den Sonnenzyklen, den kalten Wintern und den Windbedingungen in Europa. Die Westwinde, die für Europa bestimmend sind, werden gesteuert durch die Druckdifferenz zwischen Grönland und den Azoren, den so genannten nordatlantischen Oszillationen (NAO).

Ein Grund für diese jährlichen Windenergieertragsschwankungen ist die Nordatlantische Oszillation

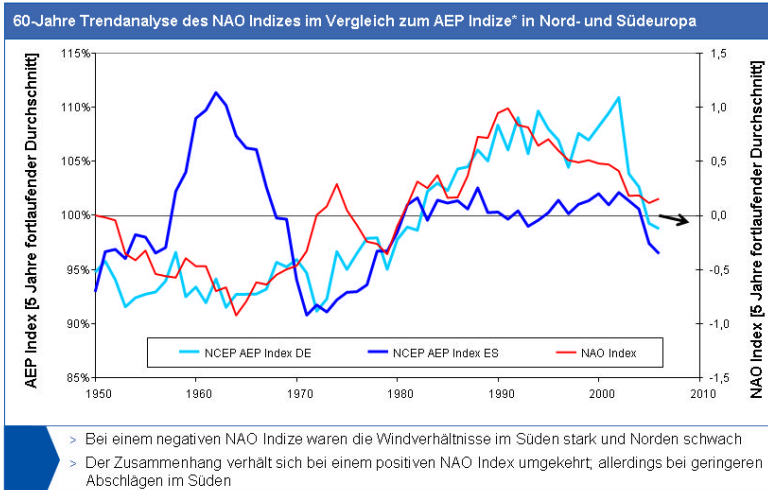


Bild 1: Zeitlicher Verlauf der Nordatlantischen Oszillation(NAO) und der Windstromernte in Deutschland und in Spanien

Bild 1 zeigt einen 60- Jahre- Zyklus dieser Nordatlantischen Oszillation (NAO), der sehr gut mit den Schwankungen der Windenergie in Nordeuropa korreliert. Eine Zunahme der NAO bewirkt eine Zunahme der Westwinde, eine Abnahme der NAO verlagert die Westwinde nach Süden und führt zu sehr kalten Wintern mit wenig Wind in Nordeuropa. Und in der Tat zeigen unsere Aufzeichnungen, dass die Winterernte in Spanien und Südeuropa in diesen Jahren gegenläufig zum Norden verlief. Michael Lockwood[2] hat gezeigt, dass es eine statistisch belastbare Korrelation zwischen den Sonnenaktivitäten, der NAO und den britischen Wintern gibt. In den IPCC Berichten fand ich jedoch keinen Hinweis, dass deren mathematische Modelle die zyklischen Änderungen der NAO wiedergeben könnten. Die IPCC Modelle liefern für die NAO nur konstante Werte. Aber wie sollen Modelle, die die Vergangenheit nicht korrekt wiedergeben, die Zukunft vorhersagen können?

Und dann fand ich eine andere Überraschung: Nach den IPCC Modellen sollte die globale Mitteltemperatur um 0,2 K pro Dekade ansteigen. Aber wenn man die Temperaturmessungen per Satellit verfolgt oder die entsprechenden Angaben des British Hadley Centers, dann findet man, dass die Temperaturen seit 1998 konstant geblieben sind. Zum Klimagipfel in Kopenhagen 2009 kamen viele politische Führungskräfte aus aller Welt, aber kein Wissenschaftler erzählte ihnen, dass die Klimamodelle und die aktuellen Messungen seit 1998 nicht mehr übereinstimmen. Riesige Förderprogramme werden diskutiert, um den vorhergesagten Klimawandel zu bekämpfen, aber niemand äußert Zweifel an der unsicheren Basis. Wir wissen, wie die etablierte Klimawissenschaft argumentiert: Es müssen mindestens Zeiträume von 30 Jahren sein, 15 Jahre geben noch kein belastbares Klimasignal. Aber es muss doch eine Erklärung für das unerwartete Ausbleiben der Klimaerwärmung geben. Wir haben eine: Es ist die fehlende Berücksichtigung der Sonnenaktivitäten und der ozeanischen Oszillationen, was zu den abweichenden Vorhersagen der Klimamodelle führt.

Es besteht kein Zweifel, dass die globale Mitteltemperatur in den letzten 150 Jahren um 0,8 K angestiegen ist. Ich möchte darauf hinweisen, dass diese Entwicklung in 60- Jahres-Zyklen geschieht. Es gibt Phasen der Erwärmung und auch der Abkühlung. Die letzte Abkühlung in den Jahren 1960 und 1970 führte zu Warnungen in den Medien vor einer neuen Eiszeit, woran sich die Älteren unter uns noch erinnern können.

Aber es bleibt ein Fakt, dass sich eine der Komponenten in unserer Atmosphäre, nämlich die CO₂-Konzentration, zeitweilig parallel mit der Temperatur erhöht hat: von 0,028 auf 0,039 % oder, um es gewichtiger auszuweisen, von 280 ppm auf 390 ppm. Allerdings hat sich in dem gleichen Zeitraum ein weiterer Parameter deutlich verändert, nämlich die Sonnenaktivität, siehe Bild 2.

Besteht ein Zusammenhang mit der parallelen Entwicklung der Temperatur, des CO₂ und der Sonnenaktivität?

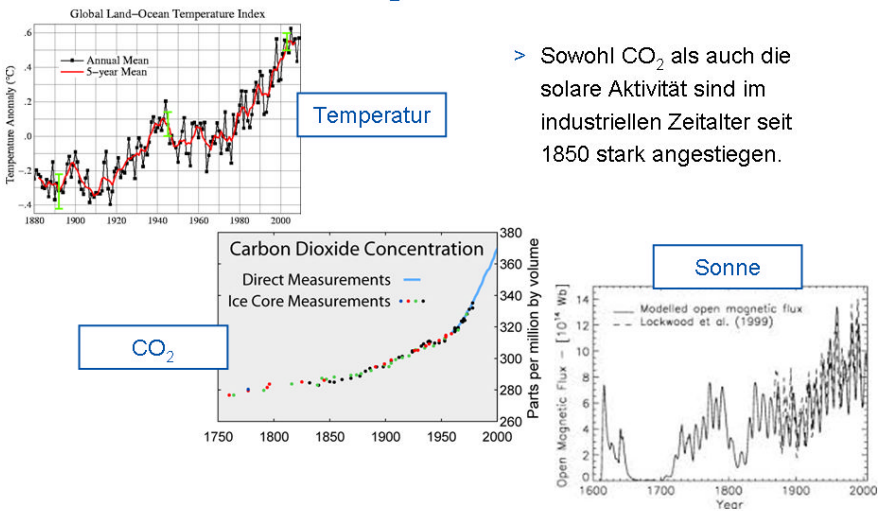


Bild 2: Zeitlicher Verlauf der Globalen Mitteltemperaturen, der CO₂-Konzentration und der Sonnenaktivitäten

In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts ist das Magnetfeld der Sonne – ein Maß für die Sonnenaktivität – auf Werte angestiegen, wie sie in den letzten Jahrhunderten nie beobachtet wurden. Sie erkennen in diesem Bild die geringen Sonnenaktivitäten in der Kleinen Eiszeit zur Zeit des Maunder-Minimums (1650 bis 1750) und zur Zeit des Dalton- Minimums um 1810. Niemand bestreitet, dass CO₂ die Infrarot- Abstrahlung der Erde absorbieren kann. Aber wer wollte bestreiten, dass die Sonne, die 99,98 % des Energiehaushaltes der Erde be- streitet, nicht auch das Klima beeinflusst.

Das führt zur Frage, welchen Anteil der beobachteten Klimaer- wärmung der letzten 150 Jahre auf das CO₂ zurückgeht und welcher Anteil wird durch die Sonne beigesteuert. Für das IPCC ist die Sache klar: In der Zusammenfassung von 2007 weist es den Treibhausgasen 95 % der Erwärmung seit 1970 zu und nur 5 % der Sonne. Wie kommt das IPCC zu einer solchen Aussage? Die Klimasensitivität, d.h. die Klimaerwärmung bei einer Verdoppelung des heutigen CO₂- Gehaltes in der Atmosphäre, wird von den Modellen, die das IPCC verwendet, sehr unterschiedlich eingeschätzt. Allerdings bringt der Einfluss des CO₂ allein nur eine Erwärmung um etwa 1,1 K. Nur wenn man einen Verstärkungsfaktor durch den erhöhten Wasser- dampfgehalt in der Atmosphäre einführt, ergeben sich die beängsti- genden, höheren Temperaturzunahmen. Ob der erhöhte Wasser- dampfgehalt zu einer Erwärmung führt oder durch zusätzliche Wolkenbildung zu einer Abkühlung, können diese Modelle noch nicht detailliert berechnen. Es ist im Wesentlichen die Unsicherheit in diesem Verstärkungsfaktor, der in den von IPCC zitierten Modellen zu stark unterschiedlichen Vorhersagen für die Temperaturen am Ende des 21. Jahrhunderts führt, und der Mittelwert dieser Unsicher- heiten wird dann als der wahrscheinlichste Wert von 3 K genannt.

Im Lichte dieser großen Unsicherheit, wie kommt das IPCC dazu, die Klimaänderung seit 1860 im Wesentlichen auf die Änderung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre zurückzuführen? In Bild 3 erkennt man sehr leicht, dass es nur eine Periode von etwa 20 Jahren

zwischen 1970 und 1990 gab, in der sich die Temperatur parallel zur CO₂-Konzentration in der Atmosphäre entwickelt hat. Wie erklärt man, wenn nur das CO₂ von Einfluss sein sollte, die bekannten historischen Klimaschwankungen wie das mittelalterliche Temperaturoptimum, als Erich der Rote Grönland besiedelte oder die kleine Eiszeit, in der der schwedische König Gustav Adolf mit seinen Truppen über das Eis der Ostsee marschierte, in Perioden, in denen es keine merkbaren Änderungen der CO₂-Konzentration gab ?

CO₂ und die Temperatur haben sich lediglich zwischen 1977 und 1998 parallel entwickelt

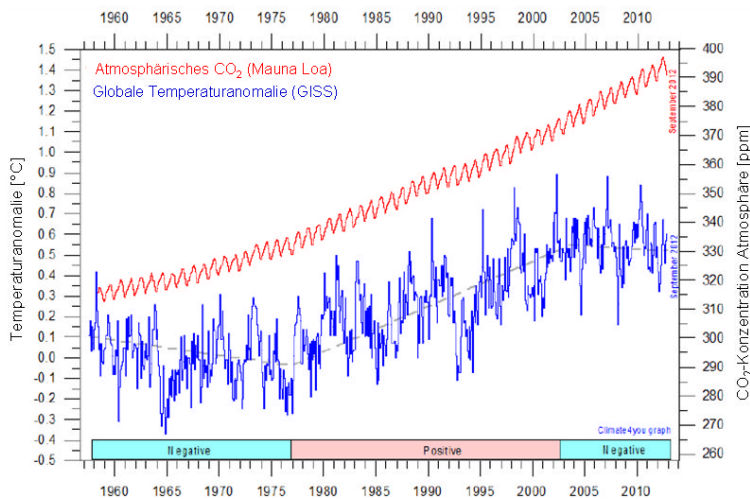


Bild 3: CO₂-Konzentration und Temperatur Ende des 20. Jahrhunderts

Das IPCC stützt sich auf den sogenannten "Hockeystick" von Michael Mann[3], der vor 1860 keine merklichen Temperaturänderungen erkennen will, wobei seine Datenbasis und insbesondere die verwendeten Mittelungsverfahren in Zweifel gezogen werden. Im Widerspruch dazu gibt es zahlreiche Veröffentlichungen, die, aus den ver-

schiedensten Proxydaten, wie Baumringen, Pflanzen und Kleinlebewesen in Bohrkernen, mehrfach Temperaturschwankungen in den letzten 2000 Jahren ausweisen[4], wie wir sie heute erleben. Ich habe eine solche Temperatur-Rekonstruktion nach Ljungquist[4] von 2010 mit einer Rekonstruktion der Sonnenaktivitäten nach Steinhilber[5] von 2009 in Bild 4 zusammengefügt. Jedes Mal, wenn die Sonnenaktivität gering war, gab es kalte Perioden, und wenn die Sonnenaktivität hoch war, wie Ende des 20. Jahrhunderts oder im mittelalterlichen Temperatur- Optimum oder in der römischen Warmzeit, dann folgten warme Perioden. Obendrein scheint es dabei auch eine Periode dieser Schwankungen von etwa 1000 Jahren zu geben, wie sie Gerard Bond [6] nachgewiesen hat.

Über einen Zeitraum von zweitausend Jahren lässt sich eine natürliche Zyklik erkennen

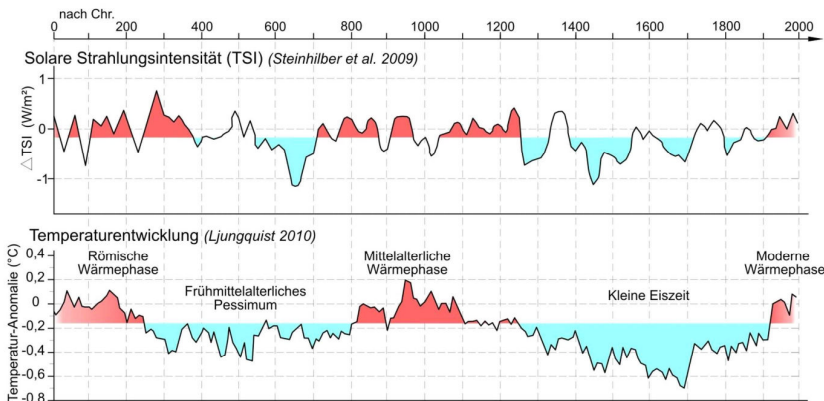


Bild 4: Solare Strahlungsintensität und Globale Mitteltemperatur seit Christi Geburt

Wie reagierte das "Klima-Establishment" auf diese Daten? Stefan Rahmstorf, ein bekannter deutscher Klimaforscher, sprach für viele seiner Kollegen und das IPCC, als er dies als lokale Besonderheiten

abtat und die kleine Eiszeit zu einem rein europäischen Phänomen erklärte. Es gibt aber in der Zwischenzeit Dutzende von Veröffentlichungen, die diese 1000-Jahr-Zyklen für alle Kontinente bestätigen. Wir können die mittelalterliche Warmperiode und die kleine Eiszeit in den Bergen Tibets, in den australischen Mooren, in Stalagmiten im Oman, in Chile und in Deutschland finden. Ich zitiere ein Bild eines chinesischen Wissenschaftlers Liu [7], siehe Bild 5, der Temperatur-Rekonstruktionen aus den Bergen Tibets wiedergibt, in denen man ebenfalls die mittelalterliche Warmperiode und die kleine Eiszeit erkennen kann. Und Liu wagt sogar eine Vorhersage mit leicht abfallenden Temperaturen für das 21. Jahrhundert.

Auch in Tibet gab es in der Vergangenheit starke Schwankungen in der Temperatur

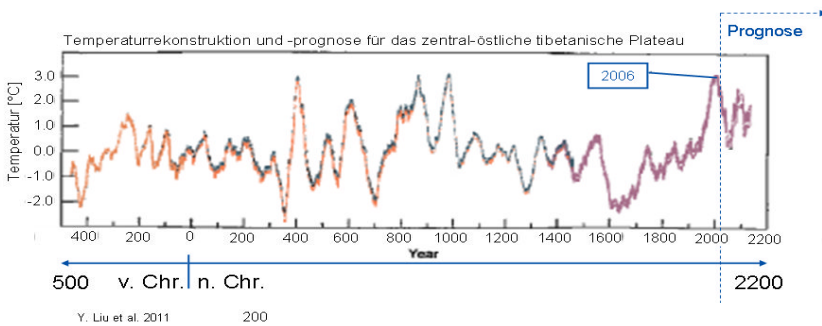


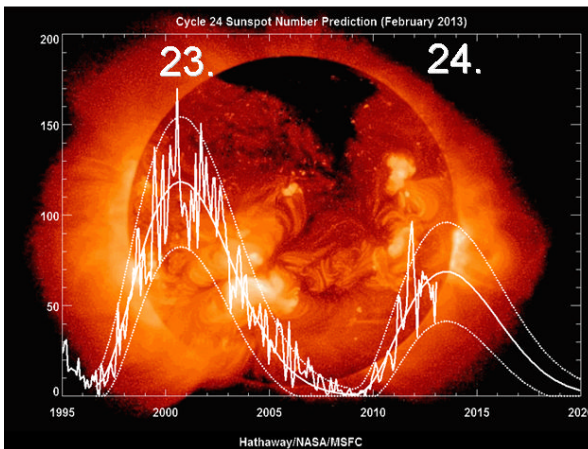
Bild 5: Temperaturverlauf im östlichen Tibet in den letzten 2500 Jahren

Aber wenn sich in diesen früheren Jahrhunderten die CO₂-Konzentration nicht geändert hat, auf welche Weise hat die Sonne zu diesen Klimaschwankungen geführt? Die Aktivität der Sonne schwankt mit einer Periode von etwa 11 Jahren. Wir befinden uns zur Zeit in der 24. Periode der bekannten Aufzeichnungen, siehe Bild 6, einer der schwächsten in den letzten 200 Jahren. Das IPCC argumen-

Sonne und Treibhausgase – Ursachen des Klimawandels

tiert zu Recht, dass die direkte Sonneneinstrahlung in diesen Perioden um nur 0,1 % schwankt, was kaum Einfluss auf die mittlere Temperatur der Erde haben kann.

Der aktuelle 24. Sonnenzyklus ist relativ schwach



- Sonnenzyklus „24“ begann mit starker Verspätung im Januar 2008, war dann längere Zeit inaktiv und erreichte sein Maximum in 2012. Der Zyklus ist einer der schwächsten seit dem Dalton Minimum um 1810.
- Für die kommenden Jahre bleibt die Sonnenaktivität schwach. Der Sonnenwind und die ultravioletten Anteile im Sonnenspektrum werden sehr viel weniger ausgeprägt sein als in der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts.

Bild 6: Verlauf der Sonnenzyklen in den letzten Jahrzehnten

Das stimmt, aber wenn wir genauer hinsehen, siehe Bild 7, gibt es Veränderungen durch die Sonne, die weit stärker schwanken, zum Beispiel schwankt die UV Strahlung der Sonne um bis zu 70 %. Ebenso schwankt das Magnetfeld der Sonne in diesen Perioden signifikant, wodurch die kosmische Höhenstrahlung, die auf die Erde trifft, mehr oder weniger stark abgeschirmt wird. Ein starkes Magnetfeld der Sonne hindert die kosmische Höhenstrahlung, in die Atmosphäre einzudringen, bei einem schwachen Magnetfeld der Sonne trifft eine

viel stärkere kosmische Strahlung auf die Erde. Die resultierende Schwankungsbreite kann bis zu 15 % betragen, siehe Bild 7.

Die solaren Schwankungen unterliegen einem 11-Jahres-Zyklus

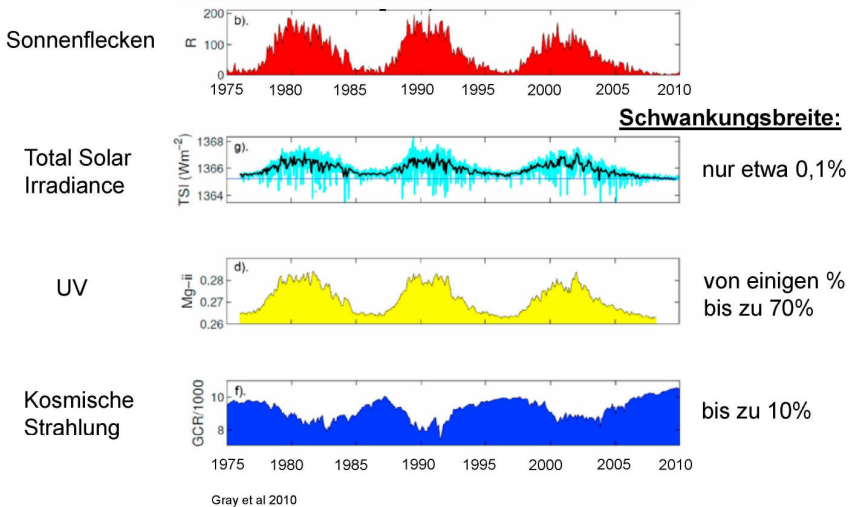


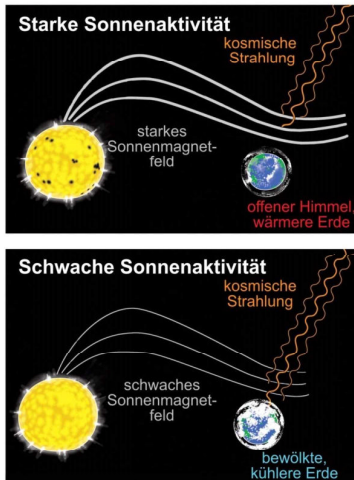
Bild 7: Durch die Sonnenzyklen verursachte Schwankungen bei der Sonneneinstrahlung, der UV-Strahlung und der kosmischen Höhenstrahlung

Wie nun diese schwankende kosmische Strahlung das Wetter auf der Erde verändern kann, dazu hat der dänische Wissenschaftler Svensmark [8] die folgende Überlegungen angestellt. Die kosmische Höhenstrahlung führt in der Atmosphäre zur Bildung von Aerosolen, die die Wolkenbildung verstärken bzw. schwächen, wenn ein starkes Magnetfeld der Sonne die Höhenstrahlung abhält, siehe Bild 8. Das europäische Forschungszentrum CERN führt zu diesen Modellvorstellungen Experimente durch. Dabei hat sich bestätigt, dass die kosmische Höhenstrahlung Aerosole bilden kann, ob daraus eine ver-

Sonne und Treibhausgase – Ursachen des Klimawandels

stärkte Wolkenbildung folgt, wird in der nächsten Stufe dieser Experimente untersucht.

Das Sonnenmagnetfeld beeinflusst die Intensität kosmischer Strahlung, die wiederum für die Wolkenbildung verantwortlich ist



- > Starke Sonnenaktivität geht einher mit einem starken Sonnenmagnetfeld.
- > Je stärker das Magnetfeld der Sonne, desto stärker wird die Erde vom kosmischen Strahlenfluss abgeschirmt.
- > Die kosmischen Strahlen tragen als Kondensationskeime zur Bildung von tiefen Wolken bei (maximale Höhe 3km).
- > Je weniger Kondensationskeime, desto weniger tiefe, das Sonnenlicht abschirmende Wolken, desto wärmer die Temperaturen auf der Erde.

* kosmische Strahlung: Protonen, Elektronen und ionisierte Atome aus explodierenden Sternen

Bild 8: Abschirmung der kosmischen Höhenstrahlung durch das Magnetfeld der Sonne

Der zeitliche Verlauf dieser Höhenstrahlung im letzten Jahrhundert, siehe Bild 9 – weitgehend konstant bis 1900, eine deutliche Abnahme im Laufe des 20. Jahrhunderts und eine kleine Zunahme zur Jahrtausendwende – würde den beobachteten Temperaturverlauf ebenfalls bestätigen.

Etwa seit dem Jahre 1900 hat die kosmische Strahlung tendenziell abgenommen

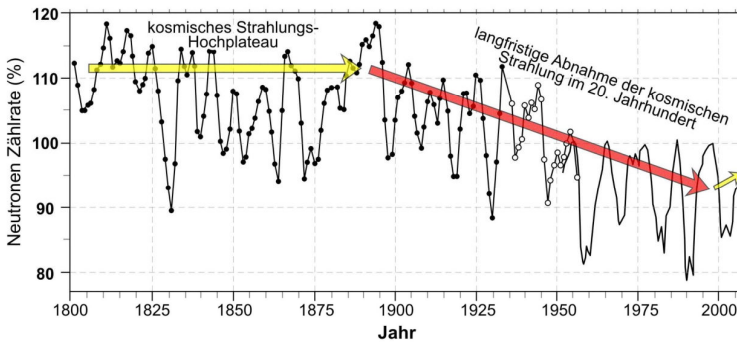


Bild 9: Zeitlicher Verlauf der kosmischen Höhenstrahlung seit 1800

Es gibt noch einen weiteren zyklischen Wettereinfluss, den die IPCC Modelle nicht berücksichtigen können, nämlich die pazifische dekadische Oszillation PDO und die atlantische dekadische Oszillation AMO. Die PDO, wie auch die AMO, weisen einen zyklischen Wechsel von 60 Jahren aus, die durch periodische Schwankungen, die unter dem Namen El Nino bzw. La Nina bekannt sind, überlagert werden. In diesem Zusammenhang scheint bemerkenswert, dass die Phasen eines globalen Temperaturanstiegs immer mit einer starken, positiven PDO zusammenfallen. In Phasen einer schwachen PDO gab es keine oder nur geringe Temperaturanstiege weltweit, siehe Bild 10.

Synchronität zwischen Temperatur und Pazifisch Dekadischer Oszillation

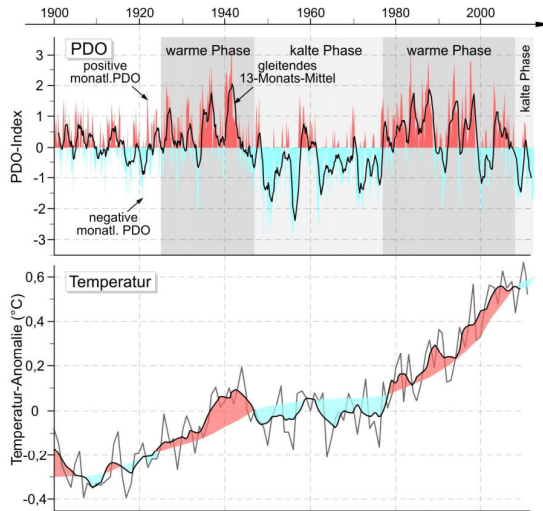


Bild 10: Pazifisch Dekadische Oszillation und globaler Temperaturverlauf seit 1900

Auch das Argument des IPCC, dass die globale Mitteltemperatur noch nie so schnell angestiegen sei wie am Ende des 20. Jahrhunderts, siehe Bild 11, trifft nicht zu. Der mittlere Temperaturanstieg über das letzte Jahrhundert war 0,05 K pro Dekade (grüne Linie) und sei gegen Ende des Jahrhunderts auf einen nie beobachteten Wert von 0,18 K pro Dekade angestiegen (gelbe Linie). Herr Lüning, mein Co-Autor beim Buch „Die kalte Sonne“ und ich haben in diese IPCC Grafik zwei rote gestrichelte Linien eingefügt, für die Perioden von 1860-1880 bzw. von 1910-1940, die nahezu die gleiche Steigung von 0,15 bzw. 0,16 K pro Dekade zeigen. Diese Perioden eines schnellen Temperaturanstieges fallen immer mit Perioden einer starken PDO zusammen.

Die Erwärmungsrate der vergangenen 25 Jahre war historisch keineswegs außergewöhnlich

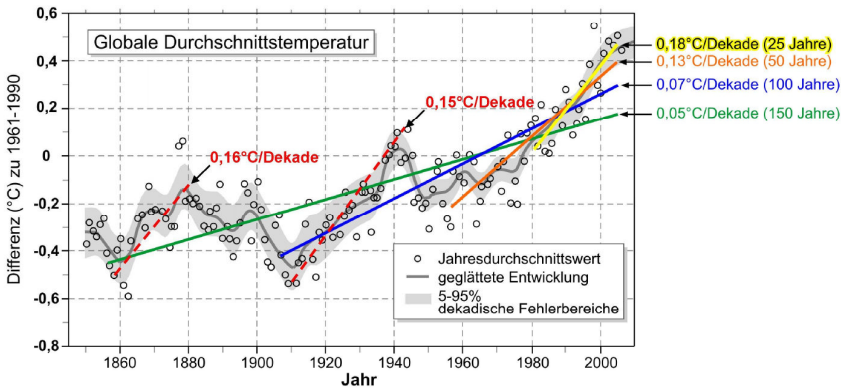


Bild 11: Die Gradienten der globalen Temperatur in den letzten 150 Jahren im Vergleich

Hier liegt der entscheidende Fehler der IPCC Betrachtung, siehe Bild 12. Die Temperaturentwicklung in den letzten zwei Jahrhunderten schwankt über einem leicht ansteigenden Trend zusätzlich um ca. $0,5^{\circ}\text{C}$ pro Jahrhundert. Dieser leicht ansteigende Trend der Temperatur resultiert zum einen aus einer Erholung der Temperaturen vom Tiefpunkt der kleinen Eiszeit im Übergang zur modernen Warmzeit und aus dem Beitrag der ansteigenden CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre. Das IPCC extrapoliert den starken Temperaturanstieg zwischen 1977 und 1998 in die Zukunft, woraus die katastrophalen Vorhersagen für das Ende des 21. Jahrhunderts resultieren, mit Temperaturanstiegen zwischen 2 und $4,5^{\circ}\text{C}$. Aber wenn wir den langfristigen Trend und seine zyklischen Schwankungen in unsere Vorhersagen einbeziehen, dann kommen wir nur zu einem Temperaturanstieg von etwa 1°C bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Unsere Schlussfolgerung lautet daher: die Klimakatastrophe wird nicht stattfinden. Wir werden sogar eine leichte Abkühlung in den nächsten Jahrzehnten

sehen, da die dekadischen Oszillationen in eine kältere Phase eingetreten sind und die Sonne sich in einem schwachen Zyklus befindet.

IPCC-Prognose unterschätzt den Einfluss natürlicher Faktoren und überzeichnet dadurch den Temperaturanstieg

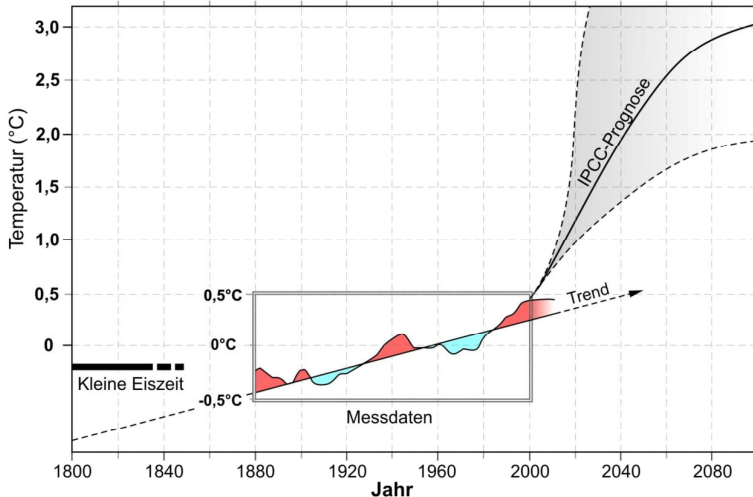


Bild 12: Der Verlauf der globalen Temperatur seit 1800 und die IPCC Prognosen

3 Die Deutsche Energiewende

Solche Schlussfolgerungen zur Entwicklung des Klimas im 21. Jahrhundert haben Auswirkungen auf die Energiepolitik, besonders auf jene Maßnahmen, die mit einer Bekämpfung des Klimawandels begründet werden. Der oben dargelegte Einfluss der Sonne gibt uns die Zeit, die Energieversorgung mit Sachkunde und nüchterner Bewertung umzubauen. Wir müssen keiner riskanten Strategie folgen, den fossilen Anteil binnen weniger Jahrzehnte zu eliminieren.

Trotzdem bleibt es richtig, mit Energie sparsam umzugehen und damit weniger CO₂ zu erzeugen. Es bleibt richtig, die erneuerbaren Energien weiterzuentwickeln, um sie wettbewerbsfähig zu machen und ihren Anteil auszubauen. Es ist notwendig, die Exportabhängigkeit abzubauen, und es ist unbedingt notwendig, die Entwicklung neuer Energietechnologien voranzutreiben, vom Schiefergas bis zur Kernfusion.

Kaum ein Land in der Welt wird dem deutschen Vorbild folgen, nahezu gleichzeitig aus der Kernenergie und aus Kohle auszusteigen, um den Anstieg der weltweiten CO₂-Emission zu verringern. Nur die EU, Australien und Neuseeland sind bereit, ein verbindliches Abkommen bezüglich CO₂-Minderung zu unterzeichnen; diese Länder stehen aber nur für 14,6 % der weltweiten Emissionen. China, Russland, USA, Indien, Japan, Canada und der Rest der Welt werden dem Beispiel der EU nicht folgen. China ist verantwortlich für etwa 25 % der weltweiten CO₂-Emissionen und liegt auch mit seinen Pro-Kopf-Emissionen von 6,8 t jährlich vor Frankreich, etwa wie England, und wird bald die USA überholen, deren spezifische Emissionen durch die Nutzung von Schiefergas deutlich zurückgehen werden. Wenn wir in Deutschland mit größten finanziellen Anstrengungen bis 2030 etwa 30 % unserer CO₂-Emissionen einsparen, dann entspricht dies gerade dem Mehrverbrauch Chinas von drei Monaten.

Die politische und gesellschaftliche Argumentationskette für die Energiewende in Deutschland basiert jedoch fälschlicherweise weiterhin auf diesem klimapolitischen Paradigma. So wird postuliert: Der Ausstoß von Kohlendioxid führt uns in die Klimakatastrophe, der Ausstieg aus der Kernenergie und auch aus der Kohle ist ohne Wohlstandsverluste machbar, der Ausbau der Erneuerbaren ist nicht mit steigenden Preisen und Stromimporten verbunden, wir werden den anderen Völkern zeigen, wie Energiewende funktioniert und sie werden uns eines nach dem anderen folgen.

Ich sehe große Chancen für die Erneuerbaren. Aber meine große Sorge ist: Die Art und Weise, wie wir die Erneuerbaren Energien im Zuge der Energiewende überfordern, kann dazu führen, dass die Akzeptanz in wenigen Jahren sinkt, wenn die Strompreise massiv steigen, die unzureichende Netzstabilität zu Stromausfällen führt, die stromintensive Industrie in Schwierigkeiten gerät und wenn es zu allem Überfluss gar nicht wärmer wird. Die Energiewende wird zu hastig und mit den falschen Argumenten angepackt.

„Energiewende“ enthält nach meiner Auffassung auch die industriepolitische Kardinalaufgabe, Erneuerbare Energien mit den hochmodernen und konventionellen Kraftwerkstechnologien so zu kombinieren, dass die Wettbewerbsfähigkeit der industriellen Arbeitsplätze in Deutschland und die weltweite Spitzenstellung bei der Verfügbarkeit von Strom erhalten bleiben und gleichwohl die Klimaziele erreicht werden.

Das wird ein schwieriger Übergang, denn noch sind Erneuerbare Energien deutlich teurer (Wind 6-9, Solar 16-19, Biomasse 10-12, Kohle/Gas 5-7 €/ct/kWh). Aber selbst wenn wir dies gelöst hätten, werden wir einen Paradigmenwechsel der Energieversorgung zu bewältigen haben. Bislang folgte die Erzeugung von Strom der Nachfrage in jeder Minute und Sekunde. In Zukunft wird die Erzeugung weitgehend von den Naturkräften bestimmt. Bei durchschnittlich 2.500 h Wind und 800 h Sonne müssen wir das gewaltige Problem lösen, wie wir durch Speicherung, Regelkraftwerke und Leitungsbau auch in den restlichen 70% des Jahres, in denen kein Wind weht, und den 90%, in denen die Sonne nicht ausreichend scheint, die Energie bereitstellen, die unseren Wohlstand Tag für Tag bestimmt.

Dabei sollte die Integration der Erneuerbaren Energien nicht nur Umwelt- und Klimazielen genügen, sondern auch der Versorgungssicherheit und der Wirtschaftlichkeit Rechnung tragen. Letztlich dürfen wir die Wettbewerbsfähigkeit unserer starken deutschen Industrie, die unseren Wohlstand maßgeblich mit trägt, nicht um jeden

Preis aufs Spiel setzen. Lassen Sie uns nicht den Fehler Großbritanniens machen und eine Verdrängung der Industrie durch den Dienstleistungssektor bereitwillig in Kauf nehmen.

Aber kommen wir zurück zu den Vorstellungen der deutschen Bundesregierung: Was sagt das Energiekonzept der Bundesregierung im Einzelnen?

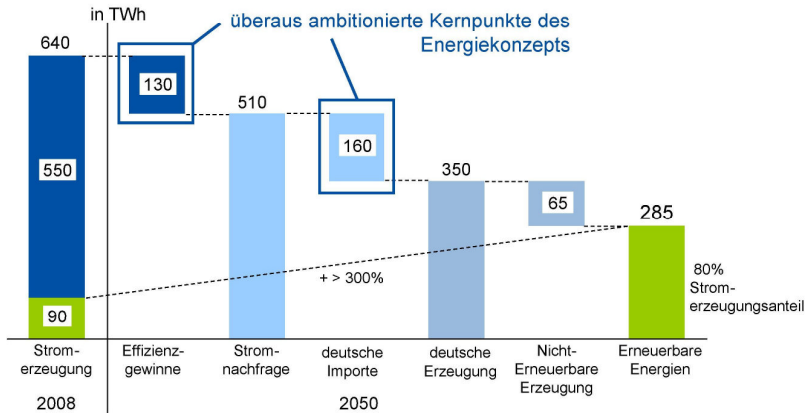
Bis 2050 soll 60 % des Energieverbrauchs und 80 % des Stroms aus Erneuerbaren Energien stammen.

Lassen Sie uns den Stromsektor untersuchen: Ob es eine gute Idee ist, aus Weizen Biosprit zu machen und aus Mais Biogas, daran haben mittlerweile viele Zweifel. Was wirklich vor der Tür steht, ist ein weltweiter Nahrungsmittelengpass. Wir werden in 20 Jahren nicht mehr in der Lage sein, die Weltbevölkerung zu ernähren, wenn wir die Produktivität in der Landwirtschaft nicht mit Hilfe innovativer Technologien massiv steigern und andere Nationen wie China und Indien unserem Beispiel, Ackerflächen zu Energiezwecken zu nutzen, folgen.

Nehmen wir also die deutsche Stromversorgung, siehe Bild 13. Wir haben heute in Deutschland einen Stromverbrauch von 640 TWh (640 Milliarden KWh), 20 % davon stammen z. Zt aus Erneuerbaren Energien. In 2050 sollen nach dem Energiekonzept der Bundesregierung 80 % aus Erneuerbaren Energien stammen. Um das zu erreichen, bedient sich das Konzept der Bundesregierung zweier Tricks.

Sonne und Treibhausgase – Ursachen des Klimawandels

Vor diesem Hintergrund sollten wir uns mit dem Umbau der deutschen Energieversorgung nicht überfordern



Quelle: Energiekonzept EWI, GWS, Prognos; Bundesregierung

Bild 13: Konzept der Bundesregierung für die deutsche Stromversorgung 2050

Zum ersten will man 20 % des Stromverbrauchs durch Effizienzgewinne wegsparen. Aber Strom ist eine Modernisierungsenergie; um Energie zu sparen, brauchen wir häufig mehr Strom, z.B. Wärmepumpen für die Heizung und Elektroautos für die Mobilität. Dazu kommt noch ein steigender Verbrauch für unsere elektronische Kommunikation. Ich bin da skeptisch. Ich befürchte sogar, dass eine alternde Gesellschaft mehr Strom benötigt, um ihre Sicherheits- und Mobilitätsbedürfnisse zu erfüllen (Bsp. Garagentor, Elektrofahrrad).

Der zweite Trick ist: 30 % soll importiert werden. Nun importieren wir schon 95 % des Öls, 85 % des Erdgases, nun auch noch Strom. Ist das klug? Was ist das für Strom?

Zurzeit bauen die Russen in Kaliningrad zwei Kernkraftwerke. Kommissar Oettinger hat zu Recht darauf hingewiesen: Glaubt im Ernst jemand, wir könnten die Russen daran hindern, ihren Strom in westeuropäische Leitungen einzuspeisen, nach dem Motto: Euer Erdgas nehmen wir, aber nicht Euren Strom? Die Bedingungen und Preise werden wir weniger beeinflussen können als heute.

Damit ich nicht missverstanden werde: Das Energiekonzept der Bundesregierung verkörpert mehr als nur die Summe der energiepolitischen Vorstellungen einer gerade regierenden Koalition. Es spiegelt eine politische und gesellschaftlich sehr viel breiter geteilte Vision wider – die Vision von einer nahezu vollständig erneuerbaren und kohlenstofffreien Energieerzeugung. Sie wird von allen Parteien im Bundestag geteilt.

So wichtig solche energiewirtschaftlichen Langfristszenarien und -orientierungen sind, sie bergen natürlich auch eine politische Gefahr. Ein Zuviel an Zukunftsvisionen macht es nämlich schwierig, die konkreten Zukunftsaufgaben sachgerecht zu erfüllen. Vor allem, wenn der Eindruck erweckt wird, eine klimafreundliche und regenerative Energiezukunft sei unmittelbar bevorstehende, konkrete Wirklichkeit.

Wenn nur noch die dezentrale und erneuerbare Energiezukunft – sozusagen aus der Sicht des Einfamilienhauses – suggeriert wird, ist der Widerstand gegen jedes neue Kohlekraftwerk und jede neue Höchstspannungsleitung nicht verwunderlich. Wir dürfen nicht vergessen, dass mehr als 70 % unseres Strombedarfs von Industrie und Gewerbe, von der Bahn und öffentlichen Einrichtungen verbraucht wird und nur weniger als 30 % von den privaten Haushalten. Die Milchmädchenrechnung des Energiekonzepts für 2050 ergibt aber nur noch einen Stromverbrauch von 50 % des heutigen Niveaus. Da bleibt nicht mehr viel Platz für Stahl, Kupfer, Chlor, Silizium, Zement, für Maschinenbau, Chemie- und Elektroindustrie.

Nun, wie bekommen wir diese visionäre Energiepolitik wieder auf den Boden der Tatsachen?

Ich komme zu meiner 1. These: Der politische Spagat in Deutschland zwischen einem Anstieg der Kosten der Energiewende und dem politischen Druck, die EEG-Umlage zu begrenzen, wird nicht gelingen, siehe Bild 14.

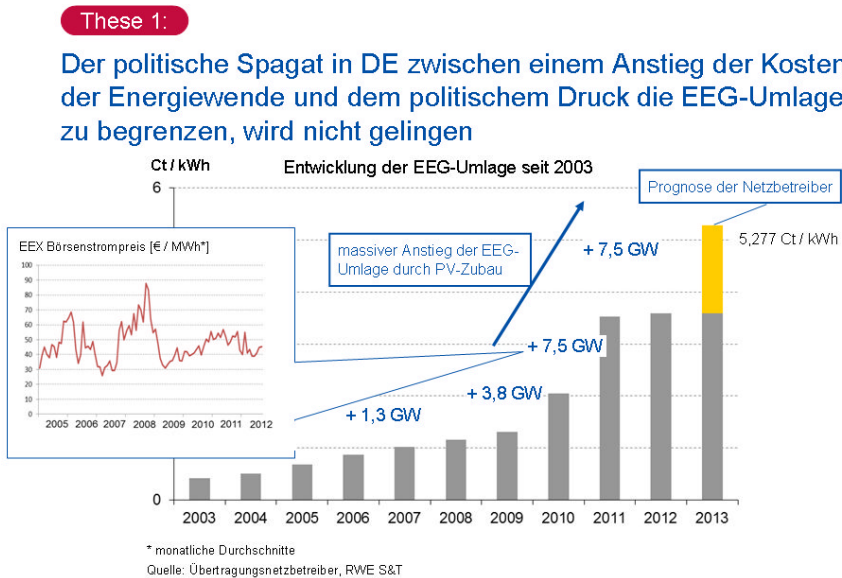


Bild 14: Entwicklung der spezifischen Umlage für Erneuerbare Energien in Deutschland

Photovoltaik ist in Deutschland heute noch viermal so teuer wie konventionell erzeugter Strom, Windenergie doppelt so teuer. Aber dezentrale und erneuerbare Energien unterliegen nun einmal nicht den Spielregeln von Markt und Wettbewerb. Sie genießen das Privileg des gesetzlichen Einspeisevorrangs und werden mit staatlich garantierten Tarifen gefördert. Das war auch nötig, um den Einstieg in diese Technologien abzusichern.

Trotzdem darf man schon einmal die Frage stellen, ob und wie lange die deutsche Gesellschaft das schultern soll? Wir haben mittlerweile 30 000 MW Wind- und 32 000 MW Photovoltaikkapazität. Ein gewisser Grad an Dezentralisierung ist sicherlich sinnvoll. Aber warum in aller Welt müssen wir in einem Land, das eine Sonneneinstrahlung vergleichbar mit der von Alaska aufweist, rund 50% der weltweiten PV-Kapazität verwirklichen?

Etwa 120 Mrd. € werden im Verlauf von 20 Jahren im „Sonnenland“ Deutschland ausgegeben, um zwischen 4 und 5% der Stromnachfrage zu generieren. Die PV-Anlagen speisen aber in das schwächste Netz ein, den Kupferdraht in der Straße. Die ersten Gemeinden ziehen die Notbremse, weil an guten Sonnentagen die Niederspannungsnetze die Einspeisung nicht bewältigen können.

Viel schlimmer aber ist der Sozialtransfer. Die Geringverdiener und Mieter finanzieren die Eigenheimbesitzer und Gutverdiener. 6 Mrd. € pro Jahr wird von unten nach oben umverteilt. Was könnten wir mit 6 Mrd. € pro Jahr anstatt dessen machen? Bei einem CO₂-Preis von zurzeit 8,50 € pro Tonne in 2012¹ könnten damit rund 700 Mio. Tonnen CO₂ weltweit vermieden werden. Damit hätten wir fast den gesamten deutschen CO₂-Ausstoß reduziert. Wir wären heute weiter, als wir in 2050 sein wollen. Wie viel CO₂ vermeiden wir mit PV: Nicht 700 Mio. Tonnen, sondern etwa 20 Mio. Tonnen. Das ist eine volkswirtschaftliche Fehlallokation ohne Beispiel.

Damit ich nicht missverstanden werde: Ich habe selbst die Photovoltaik als Vorstand der Shell vorangetrieben. Aber unsere Solarfabrik in Gelsenkirchen sollte Zellen für die ländlichen Räume der südlichen Hemisphäre liefern, um – bei doppelt so hoher Sonnenstundenzahl – die zwei Milliarden Menschen, die keinen Netzzugang haben, an die Zivilisation heranzuführen.

1 4€/t CO₂ im Juni 2013

Durch den Vorrang Erneuerbaren Stroms kommt es zu extremen Marktverzerrungen und Belastungen des Netzes.

Es gibt zwei unerwünschte Situationen:

Zuviel Wind oder Sonne, wenn kein Bedarf da ist, etwa am Wochenende, wenn wir nicht mehr als 35 000 MW Strom benötigen. Wir bekommen immer häufiger die Situation, dass selbst wenn die meisten Kohlekraftwerke und Gaskraftwerke abgeschaltet sind, wir immer noch „zu viel“ Strom im System haben. Was tun wir dann?

Zunächst verschenken wir ihn an unsere Nachbarn. Die nehmen ihn gerne, insbesondere wenn die Strompreise negativ sind. Beispiele sind Holland, Tschechien, Polen sowie Belgien. Kommissar Oettinger bemerkte zuletzt, dass er Verständnis für die Polen habe, denn Deutschland überschwemme ihren Markt mit subventioniertem Strom. D. h., wir entwerten nicht nur unser eigenes volkswirtschaftliches Kapital – investiert in konventionellen Kraftwerken – sondern mittelbar auch das unserer Nachbarn. Wenn das alles nicht hilft, stellen wir die Windkraftwerke ab und bezahlen den theoretisch erzeugten Strom trotzdem.

Die zweite unerwünschte Situation lautet:

Wir haben einen hohen Bedarf, etwa im Winter, die Sonne ist ohnehin nicht da, aber der Wind auch nicht. Was machen wir dann, wenn der Wind nicht weht?

Das kommt an 70% der Tage des Jahres vor. Wir importieren den Strom aus dem Ausland. Wenn der Strom in Deutschland knapp ist, ist er europaweit teuer. Und wir importieren aus tschechischen und französischen Kernkraftwerken oder alten eingemotteten Kohlekraftwerken aus Österreich.

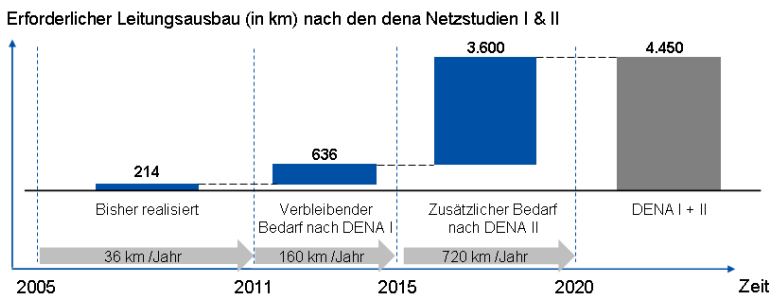
Ist das klug? Ist es klug, die eigenen Quellen, sei es die heimische, westdeutsche Braunkohle oder die deutschen Schiefergasvorkommen, außen vor zu lassen?

Damit komme ich zum 2. Problemkreis: Die volatile Welt der Erneuerbaren erfordert einen massiven Leitungsausbau, siehe Bild 15. Bisher sind seit der Wiedervereinigung erst zwei Leitungen zwischen Ost und West entstanden. Die neue Leitung Schwerin-Krümmel wurde nach vielen Jahren erst in diesen Tagen eingeweiht und die Thüringer Strombrücke ist immer noch nicht fertiggestellt.

These 2:

Die fehlende gesellschaftliche Akzeptanz wird den Ausbau der Erneuerbaren und deren Integration in den Strommarkt maßgeblich verzögern

Beispiel Netzausbau:



Quelle: ENetZA, Monitoringbericht 2011

Bild 15: Erforderlicher Leitungsausbau nach DENA I/II und bislang realisierter Zubau

Versuchen Sie heute einmal, eine neue Netzverbindung zu bauen. Erdkabel sollen es dann aber schon sein, auch wenn sie den Stromtransport um ein Vielfaches teurer machen. Und die „Erdkabelfrakti-

on“ ist die harmloseste Gruppe der Störenfriede. Die weiteren Grade von Widerstand reichen von den Nimbies „Not in my backyard“ – egal, ob über oder unter der Erde – bis hin zu den „Bananas“: Build absolutely nothing anywhere, near anyone.

Ein gutes Beispiel für diese Protestbewegungen ist der Widerstand gegen die eben erwähnte Thüringer Strombrücke. Dieser Neubau einer 380-kV Freileitung von Halle nach Schweinfurt soll die Engpässe beim Abtransport des in Norddeutschland erzeugten Windstroms in die Verbrauchszentren in Süddeutschland beseitigen. Erst war man gegen die Freileitung, nun ist ein riesiger Protest gegen das Erdkabel entstanden, weil dafür ebenfalls Schneisen durch den Wald geschlagen werden müssen. Eine 8-mal so teure Lösung, die 30 Meter breite Schneisen durch den Wald erfordert!

Die Schlussfolgerung ist, dass es in Deutschland unglaublich schwierig ist, neue Leitungen zu realisieren. Das führen auch folgende Zahlen des tatsächlichen Netzausbaus vor Augen. In den letzten 6 Jahren sind im Durchschnitt lediglich 36 km neue Leitungen erbaut worden, d.h. insgesamt 214 km von 2005 bis 2011. Sowohl die Deutsche Energieagentur als auch die Übertragungsnetzbetreiber in ihrem Netzentwicklungsplan gehen von rund 4000 Kilometern neuer Leitungen bis 2020 aus. Somit müssten wir die Rate des jährlichen Netzausbaus verzehnfachen, um dieses Ziel zu erreichen. Glaubt daran einer?

Nun zum 3. Problemkreis: Wir brauchen Speicherkapazitäten. Wenn man einen Anteil von 80 Prozent Erneuerbarer Energie (EE) im System hat, muss man auch eine zehntägige Flaute, die etwa 2 bis 3-mal im Jahr vorkommt, überstehen. Dann bräuchten wir etwa die 230-fache Menge an Pumpspeicherkapazität (die heutigen 7000 MW können etwa 6 h Vollast fahren und produzieren demnach 0,042 TWh Strom) Man kann sich dies auch gut bildlich anhand des Bodensees vorstellen. Bereits um eine viertägige Windflaute auszugleichen, müsste man den Bodensee (500 qkm, 100 m tief) aufs Niveau der

Zugspitze (2900 m) pumpen, haben Experten von der Fachhochschule Lübeck errechnet.

Zwar gibt es Länder wie Norwegen, die Schweiz oder Österreich, die weitaus größere Speicherkapazitäten aufweisen, jedoch wird es Jahre dauern, bis beispielsweise ausreichend leistungsstarke Kuppelleitungen nach Norwegen gebaut sein werden. Auch dürfte das Interesse der Norweger gering sein, sich an die höheren kontinentaleuropäischen Strompreise anzukoppeln.

Wir brauchen auch neue Speichertechnologien, um diese Herausforderung überhaupt und preiswerter zu schaffen; (Elektrolyse 30 €/kWh, Methanisierung 70 €/kWh, Druckluftspeicher 20 €/kWh, Pumpspeicherwerke 7 €/kWh). Das kommt aber alles on top.

Ich komme zum 4. Problemkreis: Die Photovoltaik (PV) macht in der Mittagsspitze die Pumpspeicherwerke (PSW) und die Gaskraftwerke unwirtschaftlich. Gaskraftwerke und PSW sind für die Spitzen vorgesehen, wenn der Strompreis hoch ist. Da die PV aber quasi umsonst durchs Netz geleitet wird -natürlich am Markt vorbei teuer bezahlt- geht der Strompreis mittags nicht mehr hoch und Pumpspeicherwerke und Gaskraftwerke rechnen sich nicht mehr, sie werden kaum mehr eingesetzt.

Ich war letzte Woche in der Schweiz. Die Wasserkraftbesitzer dort überlegen sich sogar, die Speicherkraftwerke abzustellen, weil sie damit kein Geld mehr verdienen. Dazu muss man wissen, dass mittlerweile Deutschland, Österreich, Schweiz, Tschechien, Holland, Frankreich über eine Börse verbunden sind. Wir beeinflussen mit unserem Alleingang die Märkte unserer Nachbarn. An Neubauten von Pumpspeicherwerken ist unter diesen Randbedingungen nicht zu denken, an Neubauten von Gaskraftwerken auch nicht mehr. EON will schon bestehende Gaskraftwerke außer Betrieb nehmen; ob RWE Atdorf baut, steht in den Sternen; auch Vattenfall überlegt, Pumpspeicherwerke vom Netz zu nehmen.

Als einzige Lösung wird diskutiert: Ein Kapazitätsmarkt – eine Subvention der Subvention, damit das System nicht zusammenbricht.

Damit ist klar, dass wir mehr Zeit für die Energiewende brauchen. Aber warum machen wir eine überhastete Energiepolitik? Sie ist getrieben von der Angst, dass wir mit CO₂ unser Klima kaputtmachen. Nur durch eine Angst getriebene Energiepolitik ist Biosprit, Import von Weizen, „Vermaisung“ der Landschaft für Biogas sowie die Zerstörung des Waldes zum Bau von Windkraftanlagen zu erklären.

4 Schlussfolgerungen

Die Temperatur hat in den letzten 150 Jahren um 0,8 Grad Celsius zugenommen. Parallel dazu hat sich der CO₂-Gehalt in der Luft von 0,028 auf 0,039 % erhöht. In der gleichen Zeit hat aber ein anderer Faktor sein Maximum erreicht, die Aktivität des Sonnenmagnetfelds. Nach unseren Recherchen wird die Klimaentwicklung etwa zur Hälfte vom Anstieg des CO₂ geprägt und zur anderen Hälfte von der solaren Aktivität.

Ja, CO₂ ist ein „Klimagas“, es macht etwa eine Erwärmung von 1,1 K pro Verdoppelung seiner Konzentration aus. Und mehr als eine Erwärmung um diesen einen Grad werden wir auch in diesem Jahrhundert nicht sehen. Was wir in Deutschland brauchen, ist eine kritische, unabhängige Erforschung der natürlichen Ursachen der Klimaentwicklung.

Die Sonne gibt uns die Zeit, das Energiesystem in Deutschland in vernünftiger Weise umzubauen, die sowohl dem Ziel der Versorgungssicherheit, der Umweltschonung, aber auch der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft Rechnung trägt. Deshalb brauchen wir keine überhastete, von Angst getriebene Energiepolitik, wie Methanol aus Weizen, Biogas aus Mais, den Wald opfern für Wind oder die Photovoltaik.

Leitlinien sollten daher sein:

- Erneuerbare Energien werden der wichtigste Pfeiler der Stromversorgung (50 % in 2050); ein Ziel von 80-100 % führt zu nicht-nachhaltigen Ergebnissen;
- Hoch effiziente und flexible konventionelle Kraftwerke müssen auch in den nächsten Jahrzehnten noch einen unverzichtbaren Beitrag zur Stromversorgung leisten;
- Ein zügiger und vernünftiger Ausbau von Netzen und Speichern;
- Einbeziehen der Europäischen Partner in die deutsche Energiepolitik;

Es wäre nicht auszudenken, wenn wir bis 2020 einen Wendekurs hinlegen, der den deutschen Stromkunden viel abverlangt und am Ende stellt sich heraus, dass wir die Erwärmung bei weitem überschätzt haben. Dann wird es zu einem riesigen Akzeptanzproblem kommen, nicht nur für die Erneuerbaren, sondern für die Politik insgesamt.

Es wäre gut, wenn die Politik auf diese Unsicherheit rechtzeitig aufmerksam machen und uns vor einem überhasteten Umbau unsrer Energieversorgung schützen würde, einem Experiment, bei dem uns kaum ein Land folgen wird.

Literatur

- [1] IPCC, 4th Assessment Report 2007
- [2] M. Lockwood et al., The solar influence on the probability of relatively cold UK winters in the future. *Environmental Research Letters* 6, 1-11
- [3] M. Mann et al., Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. *PNAS* 105(36)
- [4] F.C. Ljungquist, A new reconstruction of temperature variability in the extra-tropical northern hemisphere during the last two millennia, *Geografiska Annaler: Series A* 92 (3) 339-351
- [5] F. Steinhilber et al., Total solar irradiance during the Holocene. *Geophysical Research Letters* 36 (L19704).
- [6] G. Bond et al., Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene and glacial climate, *Science* 278, 1257-1266
- [7] Y. Liu (Zhu) et al., August temperature variability in the southeastern Tibetan Plateau since AD 1385 inferred from tree rings. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 305, 84-92
- [8] H. Svensmark: Influence of Cosmic Rays on Earth's Climate, *Physical Review Letters*, vol: 81, issue: 22, pages: 5027-5030, 1998

Die Kohlenwasserstoff-Kreislaufwirtschaft – sichere Energie- und Ressourcenversorgung mittels erneuerbarer Energien

DOMINIK ROHRMUS

Zusammenfassung

Der Klimawandel erfordert weitergehende Antworten als die bloße Optimierung des Ressourcen- und Energieeinsatzes in der Produktion. Die hier vorgestellte grüne Vision versteht den primären Klimawandeltreiber CO₂ als Rohstoff für neue Materialien und synthetische Brennstoffe. Dies eröffnet neue Geschäftsmodelle für neue Produkte und Märkte, die mit dem Element Kohlenstoff eine Antwort auf den weltweiten Ressourcen hunger geben können. Wir definieren „grün“ als CO₂-Senke. CO₂ ist damit ein Rohstoff für die Herstellung von synthetischen Brennstoffen und Materialien, die in einer CO₂-basierten Kreislaufwirtschaft eingesetzt werden können. Grüne Fabriken sind somit diejenigen, welche die Konzepte der grünen Kreisläufe in der industriellen Produktion umsetzen. Die Entwicklung zu grünen Fabriken folgt einem evolutionären Weg, bei dem sukzessive die Ebenen der grünen Kreislaufwirtschaft umgesetzt werden.

Schlagworte

Grüne Kreislaufwirtschaft; Kohlenstoffbasierte Produktionsvision

1 Einleitung

Die grüne Kreislaufwirtschaft und die damit verbundene Vision grüner Fabriken basiert auf Kohlenstoff (C) als Rohmaterial für neue Materialien, Produkte und synthetische Rohstoffe. CO₂ als einer der Haupttreiber des Klimawandels [1] ist eine mögliche Quelle für Kohlenstoff. Die Vision eröffnet neue Geschäftsmodelle und neue Märkte, die mit Kohlenstoff als einem zentralen Element eine alternative Antwort auf den weltweiten Materialhunger geben kann [2]. Wir definieren den Begriff „grün“ als CO₂-Senke, also das Verbrauchen von CO₂ für grüne Brennstoffe und grüne Materialien, die in einem CO₂-basierten Wirtschaftskreislauf eingesetzt werden können. Die Voraussetzungen dafür sind CO₂-neutrale Energieformen sowie chemische und petrochemische Technologien. Die heute verfügbaren Technologien werden bereits an geeigneten Standorten wie auf Island kosteneffektiv für die Herstellung von erneuerbaren Brennstoffen, beispielsweise grünem Methanol verwendet. Eine Motivation für den grünen Wirtschaftskreislauf und die Vision der (grünen) Fabrik ist, dass der fortschreitende Klimawandel weitergehende Antworten als die im Rahmen der deutschen Energiewende laufenden Optimierungsaktivitäten unseres Energie- und Ressourcenbedarfs erfordert.

Das Unternehmensziel der Siemens AG ist es, ein substanzielles Gleichgewicht zwischen der Erde und den Menschen zu schaffen. Dieses Gleichgewicht ist unternehmerisch gewinnorientiert zu erreichen (siehe Abbildung 1). Dazu definiert und steuert das Siemens Sustainability Board die Aktivitäten der Firma [3].

Die Kohlenwasserstoff-Kreislaufwirtschaft –
sichere Energie- und Ressourcenversorgung mittels erneuerbaren Energien



Abb. 1: Die Siemens AG Nachhaltigkeitsdefinition.

2 Gründe „Grün zu werden“

Es besteht ein weltweites Energiedilemma (siehe Abbildung 2):

- Der weltweite Gesamtenergiebedarf wird sich bis 2050 verdoppeln; der Bedarf an elektrischer Energie verdoppelt sich jedoch bereits bis 2030 [4].
- Ziel im Sinne eines Stopps des weltweiten Klimawandels ist es, die CO₂-Emissionen im gleichen Zeitraum um mindestens die Hälfte zu reduzieren [5].

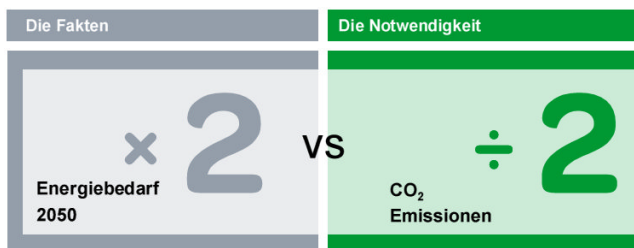


Abb. 2: Das Energiedilemma. Quelle: [4],[5] (verglichen zu 1990)

Wir adressieren das Energiedilemma in zwei Dimensionen: die Beachtung der ökonomischen Notwendigkeiten von Industrie und Produktion sowie die Perspektiven des Klimawandels.

Der aktuelle globale Energiemix, der primär auf fossilen Brennstoffen beruht, kann die Herausforderung der angestrebten CO₂-Emissionsreduktion in der selben Zeit nicht erfüllen [5],[6].

Die weltweite Zunahme des Wohlstandes, insbesondere in den aufstrebenden Industrienationen wie China und Indien, wird zu einer stetigen Erhöhung der CO₂-Emissionen führen [7],[8], weil der damit verbundene Bedarf an Energie und Rohstoffen für Produkte und der Ausbau der Produktionskapazitäten (der sogenannte Rebound-Effekt [9]) weiter ansteigen wird.

Die Herausforderung der Realisierung der Energiebereitstellungssicherheit – ein zentraler Wirtschaftsfaktor für Industrienationen – in Kombination mit der Rohstoffbereitstellungssicherheit [10], [11], bei gleichzeitiger Treibhausgasreduzierung ist aktuell nur sehr vereinzelt umgesetzt, beispielsweise auf Island [12]. Hierfür müssen sowohl dezentrale als auch großtechnische industrielle Lösungen berücksichtigt werden.

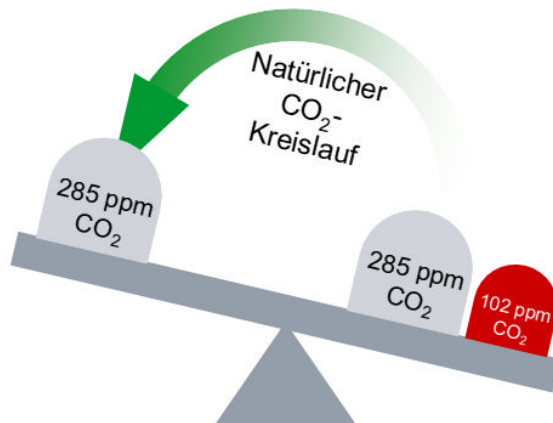


Abb. 3: Der CO₂ Kreislauf und die globale Klimaänderung.

Die Kohlenwasserstoff-Kreislaufwirtschaft –
sichere Energie- und Ressourcenversorgung mittels erneuerbaren Energien

Die momentane Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre beträgt etwa 392 ppm (parts per million) [13], und steigt jährlich um etwa 2 ppm an [14] (siehe Abbildung 3). Das von der Weltgemeinschaft gegenwärtig festgelegte 2°C Temperaturerhöhungsziel kann mit einer 75% Wahrscheinlichkeit erreicht werden, wenn die CO₂-Konzentration 400 ppm nicht übersteigt (einige Quellen gehen von bis zu 450 ppm aus) [5],[15]. Die Zunahme von 2°C ist gewählt worden, weil diese Temperatur die Systemgrenze der Klimamodelle darstellt, unter denen Klimawandel handhabbar zu sein scheint und größere global-klimatische Prozesse kalkulierbar seien [5],[15]. Allerdings führt die momentane Zunahme der Konzentration (die größte in der Menschheitsgeschichte) dazu, dass der Grenzwert 2°C bereits vor dem Jahr 2020 überschritten sein wird [5],[6].

CO₂ bleibt im Gegensatz zu Methan bis zu 200 Jahre in der Atmosphäre erhalten [5],[16] (siehe Abbildung 4).

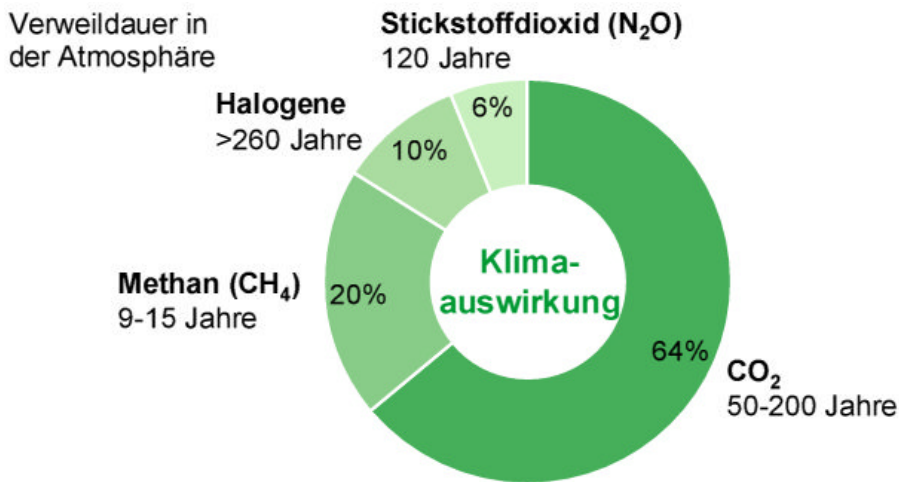


Abb. 4: Verweildauer einiger Klimagase in der Atmosphäre.
Quelle: IPCC 2007 [5],[16]

Um das 2° C Ziel gemäß Referenz [5] zu erreichen, sollte das Maximum des weltweiten CO₂-Ausstoßes nicht später als 2020 erreicht sein. Eine 60% Reduktion der energieabhängigen CO₂-Emission sollte im Jahr 2050 erreicht sein. Die Summe der CO₂-Emission sollte um 50% bis 85% verglichen mit dem Jahr 2000 sinken. Bis zum Jahr 2070 sollten alle CO₂-Emission auf null reduziert werden. Darüber hinaus muss nach diesem Zeitpunkt ein negativer CO₂-Fußabdruck erreicht werden, um die steigende CO₂-Konzentration der dann kommenden Jahrzehnte aus der Atmosphäre „zu entfernen“.

2.1 Unser Verständnis von Grün

Eine Antwort auf die Klimaherausforderungen und die ökonomischen Notwendigkeiten von Industrie und Produktion sind die neu eingeführten sogenannten „Grünen Kreisläufe“: Sie wenden neue Technologien, die einen negativen Kohlenstoff-Fußabdruck haben, an. Gleichzeitig bieten sie positive Eigenschaften für die Erhöhung der ökonomischen Leistungskraft einer Volkswirtschaft. Grüne Kreisläufe verbrauchen im Bezug auf die Bewertung des gesamten Lebenszyklus von Produkten aktiv CO₂, das an bestimmten Orten und bei bestimmten Industrien günstig für die direkte Wiederverwertung verfügbar ist. Nicht jeder Teil der Wirtschaft wird jedoch in der Lage sein, diese Zielsetzung wirtschaftlich umzusetzen. Deshalb sollte die Industrieproduktion, an der die Siemens AG teilnimmt, eine wesentliche Überkompensation liefern, um eine positive Wirkung zu erzielen. Für die Siemens AG ist dies Teil unseres Nachhaltigkeitsverständnisses [3] (siehe Abbildung 1).

„Grüne“ Technologien werden nach heutigem Verständnis meistens im Sinne von Umwelttechnologien interpretiert. Diese zielen primär auf eine minimale Umwelteinwirkung ab. Sie liefern normalerweise Lösungen, die in dieser Hinsicht Verbesserungen gegenüber konventionellen Technologien bieten und die Steigerung der Energieeffizienz auf Basis angemessener Kosten realisieren. Allerdings

Die Kohlenwasserstoff-Kreislaufwirtschaft – sichere Energie- und Ressourcenversorgung mittels erneuerbaren Energien können die CO₂-Emissionen nur im Idealfall auf Null reduziert werden (siehe Abbildung 5).

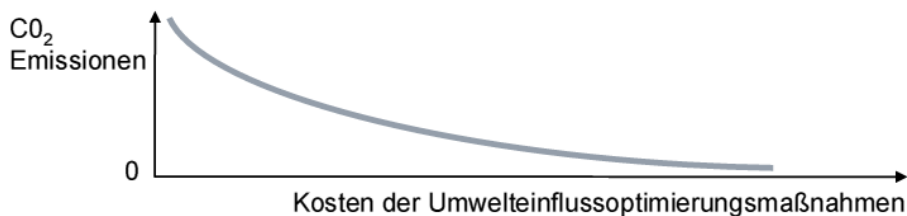


Abb. 5: Kostenperspektive der Umwelttechnologien.

Hierbei ist die Messung nach einheitlichen Kriterien entscheidend. Dies wird aber nicht (immer) gewährleistet.

„Grün“ ist aktuell in der Literatur nicht eindeutig definiert. Die etymologische Ableitung des indo-europäischen Ausdrucks „gher“ ergibt einen Definitionsausgangspunkt für „grün“ bezogen auf die Bedeutungen „herausragen“ bzw. „wachsen“ (gemeint ist von Blättern) [17] (siehe Abbildung 6).

Die Natur als Vorbild	Grüne Technologien
<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Grün</i> ist vom Indo-Europäischen Wort <i>gher</i> abgeleitet und bedeutet <i>herausstechen, wachsen</i>. ▪ Grün ist mit dem Wachsen von Bäumen und Pflanzen assoziiert. ▪ Der Treiber ist die Photosynthese, die u.a. folgende Produkte erzeugt: <div style="text-align: center;"> $\begin{array}{ccc} \text{CO}_2 & & \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \text{ (Glukose)} \\ \text{H}_2\text{O} & & \text{O}_2 \\ \text{Energie} & & \dots \end{array}$ </div>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CO₂ wird als Rohstoff verstanden und in <i>synthetische und erneuerbare Ressourcen, Materialien, und Produkte</i> umgewandelt. ▪ Wichtige Voraussetzung ist <i>erneuerbare Energie</i> mit niedrigem CO₂-Fußabdruck. ▪ Die Kombination der zwei Aspekte führt zu einer <i>CO₂-Senke</i>, d.h. einem <i>negativen CO₂-Fußabdruck</i>.

Abb. 6: Die zwei Aspekte von „grün“.

Wir definieren „grün“ im Sinne des „Grünen Kreislaufs“ in Analogie zum Photosyntheseprozess von Pflanzen und Bäumen (siehe Abbildung 6). Jede Technologie, deren Kohlenstoff-Fußabdruck über den gesamten Lebenszyklus negativ ist, wird als grüne Technologie definiert.

Grüne Technologien im Sinne des grünen Kreislaufes beinhalten:

- Die Verwendung von Mechanismen, um CO₂ zu nutzen und zu verbrauchen.
- Die Anwendung neuer Methoden, um neue Rohstoffe und fertige Materialien basierend auf Kohlenstoff (C) und CO₂ zu produzieren.

Unser grünes Verständnis kann in einem breiteren Kontext wie in Abbildung 7 dargestellt zusammengefasst werden.

Die beiden ersten Elemente der sogenannten „grünen Evolution“ sind die Energieeffizienzoptimierung sowie die Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energien. Beide sind die Kernelemente der Energiewende der Bundesrepublik Deutschland. Außerdem bilden sie die Grundlage des aktuellen Siemens AG Umweltportfolios.

Grüne Kreisläufe sind mit den aktuellen Umwelttechnologien in vielen Fällen betriebswirtschaftlich noch nicht sinnvoll realisierbar. Die heutigen Produkte, die zunehmend aus hoch spezialisierten Materialien und Komponenten gefertigt werden, sind im Sinne der Materialseparation und Materialrückführung nach der Entsorgung des Produktes weitgehend ungeeignet und das Recycling oftmals teuer. Grüne Kreisläufe hingegen bieten durch die Kombination von Umwelttechnologien und grünen Technologien (im Sinne von CO₂-Senken) die Möglichkeit, betriebswirtschaftlich sinnvolle Lösungen zu realisieren, da die Materialien für die Produkte und die Produktion auf Kohlenwasserstoffverbindungen mit geeigneten Produktionsverfahren beruhen.

elektrolyse. Das grüne Kreislaufkonzept kann jede Form und Menge erneuerbarer Energien verbrauchen, z.B. Solar, Wind, Hydro und geo-thermisch gewonnene elektrische Energie.

Es ist zunehmend notwendig, wirtschaftliche Wege zu finden, um erneuerbare Energie zu speichern, zu transportieren und zu nutzen. Die elektrische Energieerzeugung zeigt deutlich, dass bereits in wenigen Jahren eine Preis- und Netzparität der erneuerbaren Energiequellen (primär Solar) im Vergleich zu konventionellen Energieträgern wie Kohle, Öl und Nuklearenergie in Deutschland erreicht sein wird. [19].

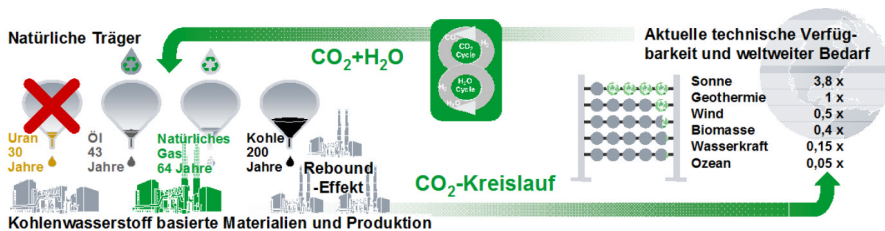


Abb. 8: Grüne Kreislaufwirtschaft.

Die grüne Kreislaufwirtschaft ist in Abbildung 8 abgebildet und zeigt für das Beispiel CO₂ den Kreislauf von der Quelle bis zum fertig synthetisierten Brennstoff, der in der aktuell bestehenden Infrastruktur genutzt werden kann. Zum Betreiben des Kreislaufes ist ein erheblicher Energieeinsatz notwendig. Die in einem grünen Kreislauf gebundene Menge CO₂ kann anhand eines Beispiels für den flüssigen Brennstoff Methanol demonstriert werden: Es bedarf ungefähr 8 MWh elektrischer Energie für eine Wasserelektrolyse kombiniert mit einer Methanolsynthese um eine Tonne CO₂ in ca. $\frac{3}{4}$ Tonne synthetischen Brennstoff (Methanol) zu binden. Dies entspricht dem jährlichen Stromverbrauch von ca. 2000 Dreipersonenhaushalten oder der Stundenproduktion einer 4 MW-Windturbine. Dieser Kreislauf generiert alle erforderlichen Aspekte, um sich zu einer 100% erneuerbaren

Die Kohlenwasserstoff-Kreislaufwirtschaft – sichere Energie- und Ressourcenversorgung mittels erneuerbaren Energien
 Energiesystem zu verändern. Wir nennen ihn den grünen Energiekreislauf (siehe linker Teil in Abbildung 9).

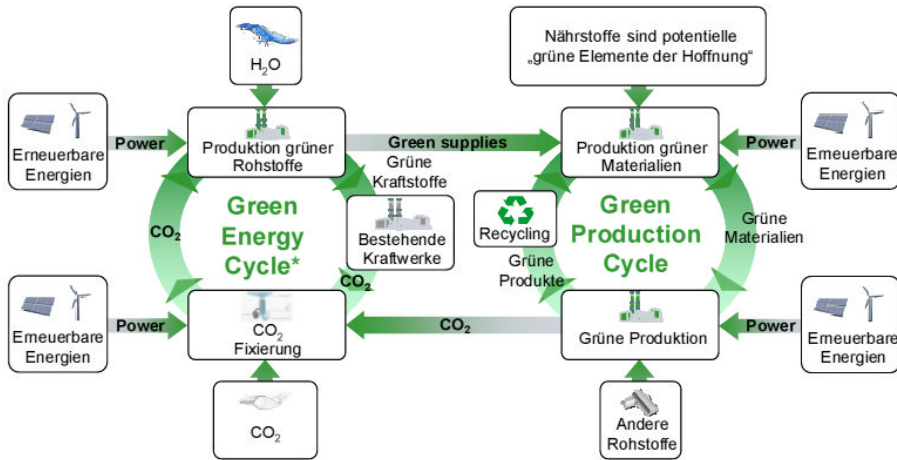


Abb. 9: Grüne Kreisläufe.

Zusätzlich zum grünen Energiekreislauf existiert ein grüner Produktionskreislauf (siehe rechten Teil in Abbildung 9). Der grüne Produktionskreislauf setzt Kohlenwasserstoffe, Sauerstoff und Wasserstoff sowie so genannte „grüne Elemente der Hoffnung“ für die Produktion grüner Materialien und Produkte, z.B. Kunststoffe ein. Dieser grüne Produktionskreislauf erfordert neue Wege des Produktdesigns und neue Produktionstechnologien, die sich auf der molekularen Ebene der Kohlenstoffmaterialien bewegen.

Das Wachstum der Weltbevölkerung und der damit verbundene Verbrauch von Bodenschätzen bedingt eine zunehmende Verknappung wichtiger Materialien [10],[20]. Dies ist ein globales Problem, vergleichbar mit der Energieknappheit [10]. Die Peak-Oil-Situation stellt eine vergleichbare Analogie dar [21]. Ein möglicher Ansatz ist das Ersetzen von knappen Metallen durch weniger knappe Elemente wie kohlenstoffbasierte Verbindungen [10]. Dies erfordert fortschritt-

liche Chemie- und Ingenieurwissenschaften und Disziplinen wie Landwirtschaft und Biowissenschaften.

Die grünen Elemente der Hoffnung sind umweltfreundlich und nachhaltig. Wir schlagen vor, dass kohlenstoffbasierte Materialien eine interessante komplementäre Quelle für alternative Materialien und alternative Fertigungsverfahren sind.

2.4 Grüne Fabriken

Eine grüne Fabrik ist eine Anlage, welche keine negativen Auswirkungen auf die globale oder lokale Umwelt hat, d.h. ein Produktionsstandort oder ein Netzwerk von Produktionsanlagen der versucht, den drei Dimensionen der Nachhaltigkeitsdefinition der Siemens AG zu entsprechen [3].

Grüne Fabriken konzentrieren sich auf ökologische und ökonomische Ziele. Im Allgemeinen wird ein Geschäft als grün bezeichnet, wenn die folgenden vier Kriterien erfüllt werden:

1. Das Ziel grüner Fabriken ist es, umweltfreundliche Produkte oder Dienstleistungen anzubieten, die den Bedarf an nicht grünen Produkten und/oder Dienstleistungen ersetzen.
2. Grüne Fabriken verwenden bei allen Geschäftsabläufen Effizienzlösungen.
3. Grüne Fabriken verwenden hauptsächlich erneuerbare Energie.
4. Grüne Fabriken heben die Durchführung der Wiederverwertung von Hitze, Wasser und Energie in der Fabrik als Ziel.
5. Grüne Fabriken verwenden Abgase wie CO₂ als Ressource.

Die grüne Fabrik unterstützt den Anspruch, den gegenwärtigen Ressourcenbedarf der Welt zu befriedigen, ohne den Bedarf künftiger Generationen zu gefährden [3], [22]. Sie betont die Notwendigkeit der Veränderung des Designs von Produkten und Fertigungsverfahren,

Die Kohlenwasserstoff-Kreislaufwirtschaft – sichere Energie- und Ressourcenversorgung mittels erneuerbaren Energien um die Vorteile von Kohlenstoff und weiteren Elementen auszunutzen. Die wichtigsten Elemente einer grünen Fabrik sind in Abbildung 10 beschrieben. Dies sind erneuerbare, CO₂-neutrale elektrische Energiequellen, geeignete Fertigungsverfahren, Einrichtungen und zusätzliche Chemieprozesse, welche die Wiederverwertung von Abprodukten ermöglichen.

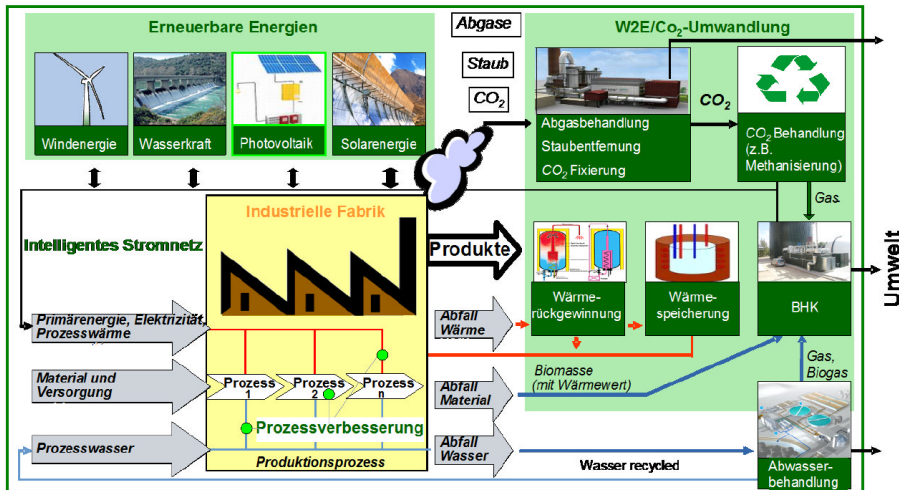


Abb. 10: Elemente grüner Fabriken.

2.5 Die Entwicklung grüner Fabriken

Das Konzept der „grünen Fabriken“ soll auf einem evolutionären Pfad, wie in Abbildung 7 gezeigt, erreicht werden. Drei hauptsächliche Stufen der Entwicklung können beschrieben werden. Jede Stufe ist für die nächste Stufe notwendig.

Die erste Stufe ist die Energieeffizienzoptimierung. Dies beinhaltet die gegenwärtigen Effizienzoptimierungaktivitäten beispielweise in der Produktion, Logistik und bei Gebäuden. Das Hauptziel der Energieeffizienzoptimierung ist es, die beschränkten Energieressour-

cen wirksamer zu verwenden. Da Effizienzoptimierungsprozesse im Allgemeinen ein Haupttreiber für Wirtschaftswachstum und verbesserte Wettbewerbsfähigkeit sind, schaffen die vorhandenen Methoden eine Basis für eine evolutionäre Erweiterung dieser Prozesse, Methoden und Lösungen für neue und zusätzliche Aspekt der Energie.

Die vorhandenen Methoden und Lösungen zielen darauf ab, weniger CO₂ als vergleichbare Vorgängerlösungen zu emittieren und dabei ähnliche Produkt- und Funktionsleistungen zu garantieren. Das Ziel von Null-CO₂-Emissionen zu angemessene Kosten kann mit diesen Ansätzen jedoch nicht vollständig erreicht werden (siehe Abbildungen 5 und 11).



Abb. 11: Energieeffizienzoptimierung.

Die zweite Stufe umfasst die Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energien. Diese Umstellung bedeutet, dass fossile, thermische Kraftwerke eine Funktion erhalten. Diese ist es, die Flexibilität in zentralen Energienetzen zur Verfügung zu stellen, die bei einem

Die Kohlenwasserstoff-Kreislaufwirtschaft – sichere Energie- und Ressourcenversorgung mittels erneuerbaren Energien verstärkten Anteil erneuerbarer Energieerzeugung notwendig ist, um einen Lastausgleich zu ermöglichen.

Das langfristige Ziel ist der vollständige Einsatz von erneuerbaren Energiequellen und die damit verbundenen dezentralen Netztechnologien (siehe Abbildung 11). Dies umfasst auch die stabile Versorgung von Industrieanlagen neben der Verteilung, der Speicherung und Fragen der Energiequalität [23].



Abb 12: Energieversorgungsänderung.

Die dritte Stufe ist der sogenannte „Saubere Kreislauf“ (Vollständige Ressourcennutzung in Recyclingprozessen). Das Ziel ist es, wenige oder keine Abfallprodukte außerhalb einer Fertigung zu generieren (siehe Abbildung 12). Im Bezug auf die Beschränkungen der Umwelttechnologien, können Produktionen und Produkte die sauberen Kreisläufe nicht vollständig wirtschaftlich realisieren. Es existieren jedoch Industriebereiche wie der Abwasserbehandlung, wo dies möglich ist.

Die vierte Stufe ist die grüne Kreislauffabrik. Sie basiert auf der synthetischen Abbildung der natürlichen Prozesse der Biosphäre. Sie kombiniert Technologien, die einen negativen CO₂-Footprint über den gesamten Lebenszyklus haben.

Sowohl die Rohstoffe als auch die Energieträger werden aus Kohlenstoffquellen (C), beispielsweise CO₂ mit Hilfe erneuerbarer Elektrizität und der geeigneten Technologie synthetisiert.



Abb 13: „Sauberer Kreislauf“.

Synthetisierte Energieträger, beispielsweise flüssige Brennstoffe (Methanol) werden für das Speichern und den Transport von Energie verwendet. Sobald wirtschaftliche Fertigungsverfahren zur Verfügung stehen, werden kohlenstoffbasierte Rohstoffe in weitere Produkte verarbeitet.

Die Realisierung eines grünen Kreislaufs entsprechend Abbildung 8 beinhaltet folgende Aspekte:

Die Kohlenwasserstoff-Kreislaufwirtschaft –
sichere Energie- und Ressourcenversorgung mittels erneuerbaren Energien

- Die elektrische Energie zur Aufrechterhaltung der Kreisläufe kommt ausschließlich aus erneuerbaren Energiequellen, die CO₂ neutral sind.
- Das Wasser der Atmosphäre (Reinheit vorausgesetzt) wird in Wasserstoff und reinen Sauerstoff gespalten.
- Der gewonnene Wasserstoff wird mit dem CO₂ aus industriellen Abfallprodukten, Prozessen oder am besten direkt aus der Atmosphäre angereichert [24]. Damit werden die Kohlenwasserstoffverbindungen erzeugt.
- Die Kohlenstoffwasserstoffverbindungen sind u.a. für die petrochemische Industrie, neue Kohlenstoffindustrien, z.B. für das Erzeugen von Materialien wie Kohlenfaserverbundwerkstoffe und die Erzeugung grüner Brennstoffe wie Methan oder Methanol nutzbar.

Das Unternehmen Carbon Recycling International auf Island zeigt bereits heute, dass grüne Kreislauffabriken wirtschaftlich realisierbar sind [12]. Ein anderes Beispiel ist das „CO₂rrect“ Projekt (CO₂ Reaktion, das regenerative Energien und katalytische Technologien verwendet) der Firmen Bayer AG, Bayer MaterialScience AG, Siemens AG und weiterer Partner. Ein anderes Beispiel ist eine Bayer AG Pilotanlage, die CO₂ für ein chemisches Vorprodukt in der Polyurethanproduktion (ein Zwischenprodukt für die Kunststoffproduktion) verwendet.

Es entstehen daneben neue Möglichkeiten für das Produzieren von sauberem Wasser, einem wichtigen Rohstoff für grüne Kreisläufe.

In der ersten Phase werden grüne Kreislauffabriken in der Lage sein, Einnahmen aus Kohlenstoffzertifikaten und erneuerbaren Treibstoffmärkten zu erzielen. Beispielsweise hat grünes Methanol bis zweifach höhere Preise als fossil hergestelltes Methanol [12].

3 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein systemischer Ansatz für grüne Kreisläufe und grüne Technologien definiert. Ein evolutionärer Weg beginnend mit Umwelttechnologien und dem Einsatz erneuerbarer Energien als Voraussetzung für grüne Kreislauffabriken wurde aufgezeigt.

Die entwickelte grüne Vision eröffnet wirtschaftlich attraktive neue Bereiche und Marktpotentiale. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für grüne Produkte und grüne Produktion unter Berücksichtigung von erneuerbaren Energien als die zukünftig wichtigste Energieversorgungsquelle.

Die vorhandenen Anlagen und sogar fossile Energiegewinnungsanlagen können im Sinne eines evolutionären Weges gut in das neuartige Konzept integriert werden, so dass die vorhandene Infrastruktur weiterhin genutzt werden kann. Das Ziel der Null-Emissionen ist zukünftig auf ökonomische Weise zu erreichen. Dies erfordert einen Paradigmenwechsel von fossilen und/oder metallbasierten Produkten hin zu kohlenstoffbasierten Produkten. Daraus ergibt sich auch die Notwendigkeit neuer Fertigungsverfahren. Die vorhandenen Produkt- und Produktionstechnologien und -lösungen spielen dabei eine wichtige Rolle während des Übergangsprozesses, so dass nur die jeweils wirtschaftlichsten Technologien in jedem Entwicklungsstadium berücksichtigt werden.

Grüne Brennstoffe sind die ersten Produkte, die sich wirtschaftlich realisieren lassen. CO₂-Fixierung aus der Atmosphäre ist ein langfristiges Ziel, das wirtschaftlich nicht zu Beginn des Übergangs zu grünen Kreisläufen realisierbar ist. Die ersten Kohlenstofflieferanten werden Kohlenstoffquellen vorhandener Anlagen und Fabriken sein. Die steigende Geschwindigkeit der erneuerbaren Energietechnologien unterstützt den Übergangsprozess und definiert auch die Wechselgeschwindigkeit.

4 Literatur

- [1] Sekretariat der Klimakonventionen (Ed.) (1997): Das Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen, <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpger.pdf>, accessed 11.12.2011.
- [2] Müller, E.; Engelmann, J.; Löffler, T.; et. al. (2009): Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben, Berlin Heidelberg: Springer.
- [3] <http://www.siemens.com/about/en/index/strategy.htm>, accessed 11.11.2012
- [4] International Energy Agency (2010): World Energy Outlook 2010, IEA Publications, 2010.
- [5] IPCC (Ed.) (2007): Climate Change 2007: Synthesis Report, http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_spm.pdf, accessed 22.11.2012.
- [6] European Commission (2007): World Energy Technology Outlook - 2050, Office for Official Publications of the European Communities.
- [7] <http://www.berlin-institut.org/online-handbuchdemografie/bevoelkerungsdynamik/auswirkungen/bevoelkerungsprojektionen.html>, accessed 21.10.2011.
- [8] GLOBAL 2000/SERI (Ed.) (2009): Ohne Mass und Ziel? Über unseren Umgang mit den natürlichen Ressourcen unserer Erde, in: http://old.seri.at/documentupload/SERI%20PR/ohne_mass_und_ziel--2009.pdf, accessed 16.10.2011.
- [9] Binswanger, M. (2001): Technological progress and sustainable development: what about the rebound effect?, Ecological Economics, Vol. 36, p.119-132.

- [10] Diederer, A. M. (2009): Metal mineral scarcity: A call for managed austerity and the elements of hope, in: http://www.tno.nl/downloads/Metal_minerals_scarcity.pdf, accessed 22.11.2012.
- [11] McKinsey & Company Inc. (2007): Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland. Study by McKinsey & Company for BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz, Berlin.
- [12] <http://www.carbonrecycling.is>, accessed 24.11.2012
- [13] http://scrippsco2.ucsd.edu/data/atmospheric_co2.html, accessed 21.10.2011.
- [14] Tans, P. (2010): Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends, accessed 18.01.2010.
- [15] Held, T. M.; Kriegler, E.; et al. (2008): Tipping elements in the Earth's climate system, Proceedings of National Academy of Science of the United States of America, Vol. 105, No. 6,
- [16] http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/?src=/climate/ipcc_tar/wg1/016.htm, accessed 18.12.2011.
- [17] Pfeifer, W.; et al. (2004): Etymologisches Wörterbuch, dtv, Munich.
- [18] Olah, G.; Goeppert, A.; Surya Prakash, G. K. (2009): Beyond Oil and Gas - The Methanol Economy, 2. Edition, Weinheim:Wiley-VCH.
- [19] Nitsch, J.; Pregger, T.; Scholz, Y.; et al. (2010): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung und Europa und global - „Leitstudie 2010“; http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2010_bf.pdf, accessed 07.03.2012.

Die Kohlenwasserstoff-Kreislaufwirtschaft –
sichere Energie- und Ressourcenversorgung mittels erneuerbaren Energien

- [20] http://www.berlin-institut.org/online-handbuchdemografie/bevoelkerungsdynamik/auswirkungen/b_evoelkerungsprojektionen.html, accessed 21.10.2011.
- [21] BP (2011): Energy Outlook 2030, in: http://www.deutschebp.de/liveassets/bp_internet/germany/ST_AGING/home_assets/assets/deutsche_bp/broschueren/broschuere_bp_energy_outlook_2030_dt.pdf, accessed 19.12.2011.
- [22] Anderson, D. R. (2006): The critical importance of sustainability risk management, Risk Management. Vol. 53, no. 4.
- [23] Fischer, J.; Rohrmus, D.; Weinert, N. (2012): Investigation on adapting production strategies for a Smart Grid environment, Proceedings of the 10th Global Conference for Sustainable Manufacturing, Oct. 31st – Nov. 2nd, 2012, Istanbul, Turkey, p. 611-616.
- [24] Lackner, K. L. (2009): Capture of carbon dioxide from ambient air, The European Physical Journal Special Topics, Vol. 176, p. 93 – 106

Schlusswort

KLAUS RIEDLE

Das von der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg gemeinsam mit den nordbayerischen Ingenieurverbänden VDE und VDI am 8. November 2012 veranstaltete Symposium

„Energie und Klima - Ein Blick in die Zukunft“

fand mit über 300 Teilnehmern einen erfreulichen Zuspruch.

In Deutschland werden die von der Politik gestellten Fragen zur langfristigen Energieversorgung und zum Klimawandel mit großem Eifer in der Öffentlichkeit diskutiert, zu denen, entgegen der verbreiteten Meinung, **kein wissenschaftlicher Konsens besteht**. Folgerichtig durfte sich das Symposium auch nicht anmaßen, festzustellen, was richtig und was falsch sei. Stattdessen wurden namhafte Fachleute gebeten, die wichtigsten, immer wieder vorgebrachten Argumente und politischen Vorgaben auf ihre Verträglichkeit mit den Erkenntnissen der Wissenschaft und dem Stand der Technik zu prüfen.

Es war die erklärte Absicht des Beirats, in den Vorträgen und Diskussionen beider Themenblöcke unterschiedliche, **auch einander widersprechende Ansichten zu Wort kommen zu lassen**. Bedauert wird, dass dies beim Thema „Klima“ nicht gelang: Keines der Deutschen Klimainstitute war zur Mitwirkung am Symposium bereit, wenn auch skeptische Meinungen zum Klimawandel vorgetragen würden. Als der wissenschaftliche Beirat die Universität um Zustimmung zu einem Symposium mit diesen kontroversen Themen bat, willigte der Kanzler sogleich mit der Feststellung ein, wo denn sonst, wenn nicht an einer Universität, solche kritischen Fragen diskutiert werden sollten.

Mitherausgeber Gerhard Hosemann erinnert in diesem Zusammenhang an den Hinweis des bekannten Philosophen Karl Raimund Popper, der den griechischen Naturphilosophen Xenophanes von Kolophon (etwa 500 v.Chr.) zitiert:

„Nicht von Beginn an enthüllten die Götter den Sterblichen alles. Aber im Laufe der Zeit finden wir SUCHEND das Bess're.“

Die Ergebnisse des Symposiums lassen erkennen: Für die Umsetzung der Energiewende in Deutschland sind klare Zielvorstellungen aufzuzeigen, die schrittweise zu einer sicheren und kostengünstigen Stromversorgung führen und die in Europa abgestimmt sind. Um Investoren langfristige Sicherheit zu geben, sind dafür stabile Rahmenbedingungen notwendig.

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz EEG sollte von einem Fördergesetz zu einem Marktordnungsgesetz so umgebaut werden, dass der weitere Zubau von regenerativen Energien zu diesem Ziel führt und auch den Zubau und Betrieb von fossilen Kraftwerken wirtschaftlich ermöglicht. Dazu zählen insbesondere die schnell einsetzbaren und zur Regelung von Frequenz und Spannung geeigneten Gaskraftwerke. Darüber hinaus sollte es sicherstellen, dass ein weiteres Aufblähen der Förderung durch finanzielle Partikularinteressen von Marktteilnehmern unterbleibt.

Die Umsetzung der Energiewende in Deutschland ist eine große Herausforderung mit technisch unvermeidbaren Zwängen. Die bevorzugte Nutzung von Wind und Sonne, deren Leistungsangebot naturgemäß sehr stark schwankt, erfordert es, große Energiemengen wirtschaftlich zu speichern. Dies ist mit heutiger Technik nicht möglich. Forschung und Entwicklung bedürfen deshalb der Förderung. Dies gilt ebenso für die Sicherung der Netzstabilität und Leistungsreserven. Ein großräumiger und lang anhaltender Ausfall der Stromversorgung käme nach einem Ausschussbericht des Deutschen Bundestags einer „nationalen Katastrophe zumindest nahe“.

Schlußwort

Die Umsetzungsgeschwindigkeit für dieses Gesamtkonzept in Deutschland sollte nicht durch Befürchtungen vor einem „von Menschen gemachten Klimawandel“ bestimmt werden, solange entscheidende Fragen noch offen sind. Der sparsame Umgang mit den fossilen Brennstoffen ist in allen Fällen notwendig, sei es wegen deren begrenzten Reichweite oder eines beargwöhnten Klimawandels.

Das Thema Energieeffizienz ist in diesem Zusammenhang zwar sehr wichtig, war aber kein Thema des Symposiums.

Die volkswirtschaftliche Optimierung der resultierenden Strompreise dieses Konzepts steht noch aus. Sie ist notwendig, um die Zustimmung der Bevölkerung nicht aufs Spiel zu setzen und die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft nicht zu schwächen und Arbeitsplätze im Inland zu erhalten.

Die vielzitierte Vorbildfunktion der deutschen Energiewende für andere Länder tritt nur dann ein, wenn neben der ökologischen Nachhaltigkeit auch die ökonomische (z.B. Arbeitsplätze in der heimischen Industrie) und die soziale Nachhaltigkeit (z.B. für alle bezahlbare Strompreise) erreicht werden.

Die Diskussion um den Klimawandel sollte offen geführt werden, damit wir Ursachen und Auswirkungen besser verstehen und die kostenträchtigen Entscheidungen auf belastbarer wissenschaftlicher Basis fällen können.

Wenn es einem Land gelingt, diese Energiewende umzusetzen, dann mag dies Deutschland sein, das in Energietechnologien immer führend war, mit einer Bevölkerung, die die Energiewende grundsätzlich unterstützt. Es ist nicht entscheidend, ob nur 60% statt 80% Strom aus regenerativen Quellen stammen und ob dieses Ziel 2050 oder später erreicht sein wird.

Insgesamt haben die Beiträge bestätigt, dass die zukünftigen Entwicklungen von Energie und Klima komplexer sind als gedacht und befriedigende Lösungen schwieriger zu erreichen sind als vorgeplant.

Klaus Riedle

Im Vorwort dieser Veröffentlichung von fünf Vorträgen des Symposiums schreibt Dekanin Marion Merklein hierzu:

„Probleme dieser Art lassen sich nicht mit politischem Wunschdenken, sondern nur mit solider Technik unter Beachtung der Physik, Wirtschaftlichkeit und Umweltschonung lösen.“

Danksagung

Die vorstehenden fünf Vorträge stammen aus dem Symposium
Energie und Klima – Ein Blick in die Zukunft,
das am 8. November 2012 in Erlangen stattfand.

Veranstalter waren die
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) und der
VDI/VDE-Arbeitskreis Gesellschaft und Technik in Nordbayern
unter Leitung von Dipl.-Ing. B. Kuhn, VDI.

Schirmherr:

Dr. S. Balleis, Oberbürgermeister der Stadt Erlangen.

Wissenschaftlicher Beirat:

Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. H. Brand; Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Herold;
Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h.c. G. Hosemann; Dr.-Ing. F. Kappius;
Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Luther, Prof. Dr.-Ing. D.Sc.h.c. K. Riedle.

Moderatoren der Podiumsdiskussionen:

Dr. R. Kötter, Institut für angewandte Ethik und Wissenschaftskommunikation der FAU, für *Energie* und
Dipl.-Ing. B. Kuhn, VDI, für *Klima*.

Auf dem Podium diskutierten die Referenten und W. Geus, Vorstandsvorsitzender der Erlanger Stadtwerke AG, sowie Prof. Riedle als Sprecher des wissenschaftlichen Beirats.

Die Veranstaltung wurde sehr unterstützt von Direktor H. Stix (FAU). Dipl.-Ing. M. Heer (VDI-Bezirksgruppe Erlangen) sprach das Grußwort für die regionalen Ingenieurverbände VDE und VDI. Die Geschäftsstellen des VDE Nordbayern und des VDI Bayern Nordost sowie ebenso die Studentengruppe *ETG Kurzschluss im VDE* an der FAU halfen tatkräftig.

Das Symposium und die Herausgabe dieses Bandes B30 der ERLANGER FORSCHUNGEN wurden durch die großzügigen Spenden der Unternehmen AREVA NP GmbH, SIEMENS AG und Erlanger Stadtwerke AG sowie mit Hilfe der Universitätsbibliothek Erlangen-Nürnberg und des ehemaligen Arbeitskreises „*Technik-Umwelt-Gesellschaft*“ an der FAU ermöglicht.

Im Namen des wissenschaftlichen Beirats wird allen hier genannten Personen und Institutionen, den Referenten und den vielen weiteren Helfern, die zum Gelingen des Symposiums und der Herausgabe dieses Bandes der ERLANGER FORSCHUNGEN beigetragen haben, Dank und Anerkennung ausgesprochen.

Erlangen, im SS 2013

Prof. Dr.-Ing. D.Sc.h.c. Klaus Riedle

Sprecher des wissenschaftlichen Beirats und Mitherausgeber

Herausgeber- und Autorenverzeichnis

Herausgeber:

HANS BRAND, Univ.-Prof. em. Dr.-Ing.

E-Mail: hans@lhft.e-technik.uni-erlangen.de

GERHARD HOSEMANN, Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. Dr.h.c.

E-Mail: GD.Hosemann@t-online.de

KLAUS RIEDLE, Prof. Dr.-Ing. D.Sc.h.c.

E-Mail: klaus.riedle@t-online.de

Autoren:

DIETHARD MAGER, Prof. Dr.rer.nat.

E-Mail: Diethard.Mager@bmwi.bund.de

GERHARD HEROLD, Univ.-Prof. Dr.-Ing.

E-Mail: gerhard.herold@fau.de

HERMANN Harde, Univ.-Prof. Dr.rer.nat.

E-Mail: harde@hsu-hh.de

FRITZ VAHRENHOLT, Prof. Dr.rer.nat.

E-Mail: Fritz.Vahrenholt@rwe.com

DOMINIK ROHRMUS, Dr.-Ing.

E-Mail: dominik.rohrmus@siemens.com

VDE-Bezirksverein Nordbayern e.V.

GESCHÄFTSSTELLE

E-Mail: VDE@th-nuernberg.de