

Methodische Hintergrundinformationen und Datenquellen für den WWF-Weltklimarechner

Vorbemerkung

Der folgende Text bezieht sich auf den dem WWF-Weltklimarechner zugrunde liegenden Modellrechner von Dr. Felix Chr. Matthes und Dr. Hans-Joachim Ziesing. Nicht alle in diesem Dokument enthaltenen Daten und Auswertungen wurden für die Internetversion übernommen, um zu viele Einstellungsmöglichkeiten zu vermeiden und so die Nutzerfreundlichkeit zu erhalten.

1. Struktur des Modellansatzes

1.1 Methodischer Ansatz

Die Ursache-Wirkungs-Beziehungen im globalen Klimasystem sind komplexer Natur. Neben der Emission von Treibhausgasen spielen auch der Eintrag von anderen Luftschadstoffen mit gegenläufiger Wirkung (tendenziell abkühlende Wirkung), die Einbindung von CO₂ in den Ozeanen, in Böden etc., das Rückstrahlungsvermögen der Erdoberfläche (Albedo) sowie eine Vielzahl anderer Effekte eine wichtige Rolle.

Für ein Berechnungswerkzeug, das auf hoch aggregierter Ebene und mit schnellen Reaktionszeiten Zusammenhänge zwischen Emissionsverläufen und der Entwicklung der globalen Mitteltemperatur linear abbilden soll, werden eine Reihe sehr starker Vereinfachungen notwendig. Grundsätzlich erfolgen die Analysen im hier verwendeten Modell in vier aufeinander folgenden Arbeitsschritten:

1. Aus den Ist-Werten für die Treibhausgasemissionen für die Vergangenheit und den durch die *Business as usual*- (BAU-) Entwicklung bzw. sehr weit frei gestaltbaren Emissionsminderungspfade bestimmte Zukunftsentwicklung für den Ausstoß von Treibhausgasemissionen werden über die Zeit kumulierte Emissionswerte bestimmt.
2. Über eine Vielzahl von Modellläufen mit einem vereinfachten Klimamodell sowie eine Auswertung von Ergebnisdaten anderer Modellanalysen wurde eine statistische Beziehung zwischen kumulierten Emissionswerten für den Zeitraum 1990 bis 2100 und der Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre (gemessen als Kohlendioxid-Äquivalente – CO₂e) ermittelt, die eine Umrechnung von kumulierten Treibhausgasemissionen in Treibhausgaskonzentrationen ermöglicht.
3. Auf Grundlage der im Vierten Sachstandsbericht des *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC 2007) präsentierten, aggregierten Ergebniszusammenhänge zwischen Treibhausgaskonzentrationen und Erhöhung der globalen, oberflächennahen Mitteltemperatur wird eine Bandbreite von Temperaturerhöhungen ermittelt, die aus den im zweiten Analyseschritt ermittelten Treibhausgaskonzentrationen errechnet werden können.
4. Aus den Ist-Werten sowie den Projektionen für den Verlauf der Treibhausgasemissionen sowie den entsprechenden demographischen und wirtschaftlichen Rahmenpara-

metern wird eine Reihe von Indikatoren ermittelt, die eine Einordnung der verschiedenen Emissionsverpflichtungen ermöglichen.

Mit diesem analytischen Ansatz wird implizit eine Reihe von Vereinfachungen getroffen. So werden die Klimawirkungen verschiedener Treibhausgase – analog zu den aktuellen Methoden bei der Treibhausgasberichterstattung – über das spezifische Treibhauspotenzial (*Global Warming Potential* – GWP) vergleichbar gemacht und nicht über die spezifischen Beiträge zum Strahlungshaushalt (*Radiative Forcing*) bewertet, bei denen die Beiträge der verschiedenen Treibhausgase zur Klimaerwärmung (realitätsnäher) über die Zeit unterschiedlich eingeordnet werden. Die Wirkungsbeiträge von tendenziell kühlend wirkenden Luftschadstoffen, der Kohlenstoffeinbindung in Ozeanen, Böden etc., die Albedo-Effekte sowie andere Rückkopplungseffekte werden in den verschiedenen Berechnungsvarianten konstant gehalten.

Ebenfalls nicht näher betrachtet werden im Modell schließlich die Interaktionen zwischen den Entwicklungen für die Emissionen einerseits sowie den demographischen und wirtschaftlichen Treibergrößen andererseits. Insbesondere die Wechselwirkungen zwischen Emissionsminderungen und wirtschaftlicher Entwicklung sind zwar hoch interessant, aber eben auch umstritten. Sie entziehen sich daher der orientierenden Modellierung nach dem hier vorgestellten Ansatz.

Damit wird für die Modellrechnungen zwar eine ganze Reihe von Vereinfachungen getroffen, mit der Berücksichtigung einer Vielzahl von Ergebnissen aus Berechnungen mit komplexeren Klimamodellen (und der Vielzahl der dort berücksichtigten Wirkungszusammenhänge) können aber auch mit dem gewählten methodischen Ansatz vergleichsweise robuste Ergebnisse ermittelt werden.

Gleichwohl haben die Berechnungsergebnisse des entwickelten Modells für die Wirkungszusammenhänge von Treibhausgasemissionen, -konzentrationen und globaler Temperaturerhöhung natürlich stets nur einen orientierenden Charakter.

1.1 Modell-Abgrenzungen

Im Modell erfolgt eine Reihe von wichtigen Abgrenzungen. Dies betrifft zunächst die berücksichtigten Staaten, Staatengemeinschaften zw. Regionen. Im Modell können Emissionsverläufe und Indikatoren für die folgenden Staaten bzw. Regionen spezifiziert bzw. errechnet werden:

- Europäische Union (27 Mitgliedstaaten);
- Vereinigte Staaten von Amerika;
- Kanada;
- Japan;
- Russland;
- Mexiko;
- China;
- Indien;
- Indonesien;

- Brasilien;
- Südafrika;
- „Rest der Welt“ (alle anderen Staaten der Welt, einschließlich der Emissionen aus dem internationalen Flug- und Schiffsverkehr).

Hinsichtlich der Treibhausgasemissionen wird der durch menschliche Aktivitäten verursachte (anthropogene) Ausstoß der folgenden Spurengase berücksichtigt:

- Kohlendioxid (CO₂);
- Methan (CH₄);
- Lachgas (N₂O);
- Halogenierte Fluorchlor-Kohlenwasserstoffe (HFKW/HFC);
- Perfluorierte Fluorchlor-Kohlenwasserstoffe (FKW/PFC);
- Schwefelhexafluorid (SF₆)

Andere Treibhausgasemissionen (wie die durch das Montrealer Protokoll regulierte Freisetzung von FCKW in die Atmosphäre) werden nicht berücksichtigt; sie spielen jedoch in dem für die hier angestellten Analysen relevanten Zeitraum nur eine untergeordnete Rolle.

Im Modell sind für drei Zeitpunkte Emissionsvorgaben möglich. Diese Stützpunkte für die Emissionsentwicklung sind – in gewissen Grenzen – frei wählbar.

- Der erstmögliche Verpflichtungszeitpunkt für eine Rückführung der Treibhausgasemissionen unter den *Business as usual*- (BAU-) Pfad ist das Jahr 2010 (Mittelpunkt der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls).
- Das mittelfristige Emissionsminderungsziel kann innerhalb des Zeitraums 2010 bis 2050 frei gewählt werden. In der Online-Version wurde die Auswahlmöglichkeit für dieses Ziel auf die Jahre 2015, 2020, 2025, 2030 und 240 beschränkt.
- Als Stützjahr für die Emissionsziele zur Mitte des 21. Jahrhunderts ist das Jahr 2050 fest eingestellt.

Das Modell eröffnet die Möglichkeit, die genannten Stützjahre für jeden der o.g. Staaten bzw. Regionen unabhängig voneinander zu variieren.

Für den Fall, dass für bestimmte Länder bzw. Regionen Emissionsvorgaben definiert werden sollen, müssen diese Emissionsvorgaben als prozentuale Werte, bezogen auf ein Basisjahr, festgelegt werden. Dieses Basisjahr kann für die verschiedenen Länder bzw. Regionen jeweils unabhängig festgelegt werden, bildet aber für das jeweiligen Land bzw. die jeweilige Region dann die Bezugsgröße für die Emissionsziele bei allen für die Verpflichtungen relevanten Szenarienstützpunkten. Sofern für einen bestimmten Szenarienstützpunkt eine verbindliche Verpflichtung definiert wird, wird der Emissionspfad über eine Interpolation der Emissionsentwicklung entsprechend angepasst. Wird für einen bestimmten Szenarienstützpunkt keine verbindliche Verpflichtung definiert, wird für diesen Zeitpunkt das entsprechende Emissionsniveau der *Business as usual*-Entwicklung in Ansatz gebracht.

Die Emissionsverläufe zwischen dem Emissions- bzw. Zielniveau für das Jahr 2050 und dem zum Ende des 21. Jahrhunderts werden als Trendfortschreibung der Emissionsverläufe im Zeitraum 2030-2050 geschätzt.

2 Daten

2.1 Emissionsdaten

Hinsichtlich der Emissionsdaten sind drei verschiedene Etappen bzw. Zeiträume zu unterscheiden:

- Für alle hier näher betrachteten Staaten und Staatengruppen, die vom Anhang I der Klimarahmenkonvention (*Annex I*) erfasst werden, liegen für den Zeitraum 1990 bis 2006 konsistente Treibhausgas-Inventare vor. Für die hier näher betrachteten Nicht-Annex I-Staaten liegen für diesen Zeitraum zumindest für ein Jahr (1994) umfassende Angaben zum Stand der Treibhausgasemissionen vor. Für die globalen Gesamtemissionen kann auf Angaben des IPCC für die Jahre 1970, 1980, 1990, 2000 und 2004 zurück gegriffen werden.
- Die historischen CO₂-Emissionen aus dem Einsatz fossiler Brennstoffe sowie aus der Zementherstellung für den Zeitraum vor 1990 konnte auf die Datenbestände des *Carbon Dioxide Information Analysis Center* des *U.S. Department of Energy* (CDIAC) zurückgegriffen werden (Marland et al. 2008). Diese Datenbestände enthalten Angaben auf Länderebene für den Zeitraum von 1751 bis 2005. Für die anderen Treibhausgasemissionen (CO₂ aus Industrieprozessen, Entwaldungen etc., CH₄, N₂O) wurde auf die Datenkompilation EDGAR-HYDE 1.4 der *Netherlands Environmental Assessment Agency* (PBL) zurück gegriffen, die Daten von 1890 bis 1995 enthält (EDGAR-HYDE 1.4; Van Aardenne et al. (2001) adjusted to Olivier and Berdowski (2001)). Für den Zeitraum von 1980 bis 2005 wurden zusätzlich die Daten der *Energy Information Agency* zur Entwicklung der CO₂-Emissionen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe (EIA 2007) berücksichtigt. Die Emissionsverläufe für HFC, PFC und SF₆ wurden auf der Grundlage der Angaben des IPCC (2007) und anderer (nationaler) Angaben abgeschätzt.
- Für die Treibhausgas-Emissionsprojektionen im *Business as usual*-Fall wurde vor allem auf die CO₂-Projektionen des *World Energy Outlook* der *International Energy Agency* (IEA 2007) abgestellt. Für die Europäische Union beruhen die Projektionen für die energiebedingten CO₂-Emissionen auf dem Baseline-Szenario des PRIMES-Modells (NTUA 2008), die nach 2030 und für die anderen Treibhausgase entsprechend fortgeschrieben wurden. Diese Projektionen bis zum Jahr 2030 wurden für den Zeitraum 2030 bis 2050 sowie für die anderen Treibhausgasemissionen durch eigene Schätzungen ergänzt wurden, die wiederum auf eine ganze Reihe von Literaturangaben sowie die Dynamik der demographischen und wirtschaftlichen Entwicklung berücksichtigen.

Mit diesen Datenbeständen können einerseits die kumulierten Treibhausgasemissionen für beliebige Emissionspfade ermittelt werden sowie andererseits entsprechende Indikatoren ermittelt werden. Für den Fall, dass für die verschiedenen Staaten oder Regionen Emissionsminderungsziele vorgegeben werden, wird eine Konsistenzprüfung durchgeführt, die eine Indikation für die Robustheit des Emissionsminderungspfades erlaubt (siehe Abschnitt 3).

Hinsichtlich der Bewertungsindikatoren werden neben dem Jahresausstoß für die gesamten Treibhausgase auch die kumulierten Emissionen seit dem Jahr 1800 ausgewiesen. Die Berechnung der Treibhausgaskonzentrationen und die nachfolgende Berechnung der Erhöhung

der globalen Mitteltemperatur basieren auf den kumulierten Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2000 bis 2100.

2.2 Demographische und ökonomische Rahmendaten

Hinsichtlich der demographischen und ökonomischen Rahmendaten werden für die Ist-Daten der Vergangenheit Angaben der OECD (2008) sowie die *World Development Indicators* (WDI) der Weltbank (World Bank 2008) zu Grunde gelegt. Neben der Bevölkerungsentwicklung wird das Niveau der wirtschaftlichen Entwicklung auf Basis von Kaufkraftparitäten ausgewiesen, um die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit zwischen den verschiedenen Ländern und Regionen angemessen vergleichen zu können (ein Vergleich auf Basis von Kaufkraftparitäten berücksichtigt die nicht international gehandelten Güter und Dienstleistungen angemessener als ein Vergleich auf Basis von Wechselkursen zwischen den verschiedenen Währungen). Dieser Vergleich ist nur im Modellrechner möglich, jedoch nicht in der Internetversion.

Die demographische Entwicklung für die Zukunft basiert auf Angaben der OECD (2008) sowie der IEA (2007). Die Projektion für die wirtschaftliche Entwicklung geht von den Annahmen aus, die im *International Energy Outlook 2008* der EIA bis 2030 zu Grunde gelegt wurden und die dann durch eigene Schätzungen fortgeschrieben wurden.

2.3 Klima-Modelldaten

Für die Ermittlung der Treibhausgaskonzentrationen (gemessen in CO₂-Äquivalenten) im Jahr 2100 wurden Modellrechnungen mit dem Modell *SiMcaP* (*Simple Model for Climate Policy Assessment*) *EQW* (*Equal Quantile Walk*) *Pathfinder* (Meinshausen 2005) durchgeführt. Mit der Simulation einer Vielzahl von Emissionsverläufen wurde eine Datenbasis aufgebaut, die dann mit statistischen Methoden ausgewertet wurde. Als Ergebnis dieser statistischen Auswertung und nach einem Abgleich mit anderen Modelldaten (Clarke et al. 2007) konnte eine Gleichung für eine lineare Beziehung ermittelt werden, die in sehr guter Näherung die Umrechnung von kumulierten Emissionsmengen für den Zeitraum von 2000 bis 2100 in Treibhausgaskonzentrationen für das Jahr 2100 ermöglicht.

Die Umrechnung von Konzentrationsniveaus für Treibhausgase (in CO₂-Äquivalent) in Veränderungen der globalen (oberflächennahen) Mitteltemperatur erfolgt auf Basis des Vierten Sachstandsberichtes des IPCC (2007, Fig. 5.1). Die Erhöhung der globalen Mitteltemperatur im Vergleich zum vorindustriellen Niveau folgt danach den Treibhausgaskonzentrationen nach einer logarithmischen Funktion.

Die Ermittlung der Veränderungen für die globale Mitteltemperatur erfolgt dabei in drei Varianten. In der Variante „Beste Schätzungen“ (*Best Estimate*) wird eine Klimasensitivität von 3 °C (bei Verdoppelung der Treibhausgaskonzentrationen) unterstellt. Für die Variante „Obere Bandbreite“ (*Upper Bound*) beträgt die Klimasensitivität 4,5 °C, für die Variante „Untere Bandbreite“ (*Lower Bound*) etwa 2 °C. Bei einem Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen auf 1.000 *parts per million* (ppm) CO₂e steigt danach die globale Mitteltemperatur im Vergleich zu den vorindustriellen Werte in der Variante „Beste Schätzung“ auf fast 6 °C, für den Fall der „Unteren Bandbreite“ auf fast 4 °C und für den Fall der „Oberen Bandbreite“ auf über 8 °C. Für den Fall eines völlig ungebremsten Emissionszuwachses (durchgängige Emissionsentwicklung des *Buisness as usual*-Falls) ergäbe sich eine Treibhausgaskonzentration von knapp 800 ppm CO₂e; daraus ergibt sich eine „Beste Schätzung“ des Temperaturanstie-

ges von ca. 4,6 °C, mit einer Bandbreite von etwa 3,1 bis 6,9 °C, jeweils im Vergleich zu den vorindustriellen Werten.

3 Bewertungsindikatoren

3.1 Bewertungsindikatoren

Mit der Definition von Basisjahren sowie der Vorgabe von Emissionszielen für bestimmte Verpflichtungszeitpunkte können nacheinander und in guter Näherung Emissionsverläufe, kumulierte Emissionen, Treibhausgas-Konzentrationsniveaus und schließlich Bandbreiten für die Erhöhung der globalen (oberflächennahen) Mitteltemperatur abgeschätzt werden. Damit ergibt sich das Ergebnis bestimmter Verpflichtungsmuster für das globale Klima. Die Verteilungs- und Gerechtigkeitseffekte bestimmter Verpflichtungsstrukturen können mit einem Satz von Indikatoren beschrieben werden:

- Für alle definierten Zeitpunkte werden die Pro-Kopf-Emissionen für die verschiedenen Staaten und Regionen ermittelt. Der Vergleich und die Entwicklung der Pro-Kopf-Emissionen bilden dabei einen Indikator für Gerechtigkeit im egalitären Sinne.
- Für alle definierten Zeitpunkte werden neben den Pro-Kopf-Emissionen für die Emissionsniveaus des jeweiligen Jahres auch die bis zu diesem Jahr aufsummierten kumulierten Emissionen je Einwohner des jeweiligen Landes bzw. der jeweiligen Region errechnet. Die kumulierten Pro-Kopf-Emissionen bilden dabei einen Indikator für die Verantwortungsgerechtigkeit, also einen Maßstab dafür, inwieweit die jeweiligen Staaten bzw. Regionen das Problem der sich vollziehenden Klimaerwärmung zu verantworten haben.
- Schließlich kann mit der Ermittlung der spezifischen Treibhausgasemissionen (für ein bestimmtes Jahr), bezogen auf das Bruttoinlandsprodukt der verschiedenen Länder und Regionen (gemessen in Kaufkraftparitäten) ein Indikator für die Leistungsgerechtigkeit ermittelt werden, der eine Aussage darüber erlaubt, wie effizient Wirtschaftskraft und Wohlstand mit Blick auf die korrespondierenden Emissionsniveaus erwirtschaftet werden. Dieser Indikator ist nur im Modellrechner aufgeführt, jedoch nicht in der Internetversion.

Mit diesem Satz von Orientierungs-Indikatoren kann so die Aufteilung der Emissionsverpflichtungen aus mehreren Perspektiven und damit umfassend eingeordnet und bewertet werden.

4 Literatur

Clarke, L.E., J.A. Edmonds, H.D. Jacoby, H.M. Pitcher, J. M. Reilly, and R. G. Richels (2007): Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations. U.S. Climate Change Science Program Synthesis and Assessment, Product 2.1a, Washington, DC, July 2007.

Energy Information Administration (EIA) (2007): International Energy Outlook 2008. Washington, DC, June 2008.

Energy Information Administration (EIA) (2007): World Carbon Dioxide Emissions from the Consumption and Flaring of Fossil Fuels, 1980-2005. Washington, DC, September 18, 2007.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report.

International Energy Agency (IEA) (2008): International Energy Outlook 2008. Paris.

Marland, G., T.A. Boden, and R.J. Andres (2008): Global, Regional, and National Fossil Fuel CO₂ Emissions. In Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.

Meinshausen, M. (2005): SiMCAp: Simple Model for Climate Policy Assessment. <http://www.simcap.org/>.

National Technical University of Athens (NTUA) (2008): European Energy and Transport. Trends to 2030 – Update 2007. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

Olivier, J.G.J. and J.J.M. Berdowski (2001) Global emissions sources and sinks. In: Berdowski, J., Guicherit, R. and B.J. Heij (eds.) "The Climate System", pp. 33-78. A.A. Balkema Publishers/Swets & Zeitlinger Publishers, Lisse, The Netherlands. ISBN 90 5809 255 0.

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2008): OECD Factbook 2008. Economic, Environmental and Social Statistics. Paris.

Van Aardenne, J.A., Dentener, F.J., Olivier, J.G.J., Klein Goldewijk, C.G.M. and J. Lelieveld (2001) A 1 x 1 degree resolution dataset of historical anthropogenic trace gas emissions for the period 1890-1990. Global Biogeochemical Cycles, 15(4), 909-928.

World Bank (2008): World Development Indicators 2008. Washington, DC.

Nationalberichte im Rahmen der Klimarahmenkonvention für Brasilien, Mexiko, China, Indien, Indonesien, Südafrika,

Treibhausgasinventare im Rahmen der Klimarahmenkonvention für Österreich, Belgien, Bulgarien, Zypern, Tschechische Republik, Deutschland, Dänemark, Estland, Spanien, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Griechenland, Ungarn, Irland, Italien, Litauen, Luxemburg, Lettland, Malta, Niederlande, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Slowenien, Slowakei, Australien, Belarus, Kanada, Kroatien, Island, Japan, Liechtenstein, Monaco, Norwegen, Neuseeland, Russland, Ukraine, Vereinigte Staaten von Amerika