

Pfade der Kohlenstoffemissionsreduktion in Deutschland
Klimaschutzgesetz (KSchG) - Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) - Greenpeace & Client Earth (CE) - Fridays For Future (FFF)
und
Transient Climate Response to cumulative Emissions of CO₂ (TCRE)
 Modul Umwelt und Wandel

05.05.2020, 18:00 Uhr
 Vortrag von **Joachim Gruber**
 COVID-19-bedingt als Präsentation im Internet
 ursprünglich geplanter Veranstaltungsort:
 Hörsaal 2, Haus 1, Hochschule Neubrandenburg

Diesem Papier liegt ein vergleichsweise kurzes Literaturstudium (März 2019 bis April 2020) von klimabezogener Fachliteratur mit Schwerpunkt "Kohlenstoffkreislaufmodelle" zugrunde. Im wesentlichen habe ich mich mit den Assessment Reports 5 der Working Groups I und III des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC WGI AR5 und WGIII AR5) beschäftigt. Ich gehe davon aus, dass die Art, wie ich die komplexen Zusammenhänge im Hinblick auf dieses Papier vereinfacht habe, keine Bedenken bei Klimatologen hervorrufen werden. Aber ganz sicher bin ich mir dessen nicht.

Zusammenfassung

Das TCRE-Modell ist ein plausibles Klimamodell, das die in Erdsystemmodellen hoher (ESM) und mittlerer (EMICs) Komplexität berechnete globale Erwärmung als Funktion der menschengemachten CO₂-Emissionen in vereinfachter Form wiedergibt. Mehr nach physikalischen Vorstellungen aufgebaut sind "reduziert komplexe" Modelle wie MAGICC und ISAM. Alle Modelle liefern ähnlich verlässliche Aussagen, weil alle Modelle sich an den ESMs/EMICs messen.

Das TCRE-Modell gehört damit zu den verlässlichsten Orientierungshilfen, die der Weltgemeinschaft zur Verfügung stehen. Wahrscheinlichkeitsaussagen im strengen Sinn kann keines der vorhandenen Klimamodelle machen. Vielmehr interpretiert man nur die Häufigkeit, mit der eine bestimmte globale Erwärmung von Klimamodellen geliefert wird, als ihre Wahrscheinlichkeit.

Die Größe der Deutschland verbleibenden CO₂ Restbudgets ist von umfangreichen Fairness-Überlegungen abhängig, die im IPCC diskutiert werden. Wenn man sie darauf reduziert, dass das globale CO₂-Restbudget immer gleichmäßig auf alle Erdbewohner verteilt wird, gleichgültig zu welchem Zeitpunkt man diesen CO₂-Budget-Kassensturz macht, ergeben sich nach dem TCRE-Modell für Deutschland CO₂-Restbudgets, die vom Jahr des Kassensturzes abhängen.

Beispiel:

Mit einer TCRE-Wahrscheinlichkeit von 84%, bei Klimaziel 1.5 (bzw. 2.0) Grad Celsius und bei gleichbleibender jährlicher CO₂-Emission von 0.9 GtCO₂/a ergibt sich bei

- Kassensturz 1990: deutsches CO₂-Restbudget war im Jahr 1999 (bzw. 2004) verbraucht,
- Kassensturz 2010: deutsches CO₂-Restbudget war im Jahr 2015 (bzw. 2020) verbraucht,
- Kassensturz 2018: deutsches CO₂-Restbudget ist noch bis zum Anfang des Jahres 2022 (bzw. 2027) ausreichend.

Um den Zeitpunkt der CO₂-Insolvenz hinauszuzögern, reduziert Deutschland entsprechend seinem Klimaschutzgesetz seine jährlichen Emissionen im Zeithorizont 2020 - 2030. Ob wir damit beispielsweise das 1.5-Grad-Ziel erreichen, hängt in jedem Fall von dem Modell ab, mit dem wir unsere CO₂-Emissionen in Erwärmung umrechnen. Mit dem TCRE-Modell stelle ich graphisch dar, mit welcher TCRE-Wahrscheinlichkeit eine lineare zeitliche Fortschreibung des vom Klimaschutzgesetz gesteckten Rahmens zum Klimaziel führt.

Klimaexperimente an Erdsystem-Modellen

Computer-basierte Erdsystem-Modelle (ESM) wie sie im CMIP (Climate Model Intercomparison Project, aktuell CMIP5) zusammengeführt werden, unterscheiden sich in der Auswahl der Klimaprozesse,

- die sie entweder im Detail formulieren oder
- die sie überschlägig durch Parameter darstellen ("Parametrisierung").

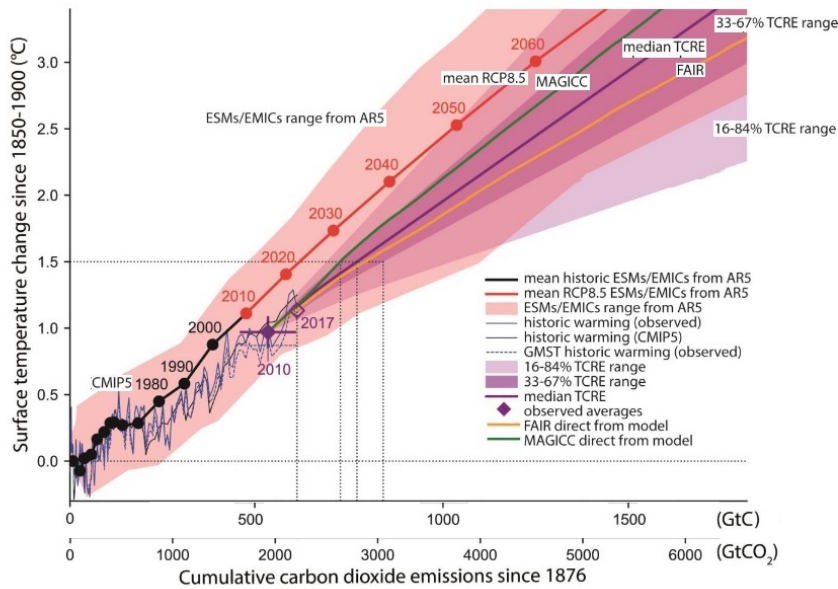
Unter Berücksichtigung ihrer individuellen Stärken (und Schwächen) werden alle Erdsystemmodelle als Klimasimulatoren verwendet. Arbeiten mit ihnen werden folglich als "Klimaexperimente" bezeichnet (analog zu Flugmanöverexperimenten im Flugsimulator).

Videos

University of British Columbia Video by Sara Harris. University of British Columbia [companion book](#) by Sarah Burch and Sara Harris

- [5.2 Choices Climate Modelers Make](#),
- [5.3 Climate Model Output](#)

Globale mittlere Erwärmung (Grad Celsius) als Funktion der Menge an emittierten Treibhausgasen (GtCO₂)



Quelle: Abbildung 2.3 auf Seite 25M-5 dieses IPCC Reports. Diese bezieht sich ihrerseits auf die Abbildung 2.3 auf Seite 105 des Chapter 2 vom Hauptreport IPCC SR15 (Anmerkung: Die in dieser Abbildung verwendeten TCRE-Parameter mu und sigma scheinen mir von denen abzuweichen, die für die Berechnung der Daten in Tabelle 2.2 IPCC SR15, Chapter 2 verwendet wurden.)

Abb.1 Die Klimaexperimente liefern zu jeder kumulativen Treibhausgas-(THG)-Emission eine Reihe von möglichen globalen Erdoberflächen-nahen Lufttemperaturen (Global Mean Surface Temperature, GMST), und wegen der Vielzahl von möglichen Klimaexperimenten ergibt sich fast ein Kontinuum von solchen "experimentellen" Lufttemperaturen. In der Abbildung 1 ist dies eine Temperatursäule über jeder kumulativen THG-Emission (Wert auf der x-Achse). Die Gesamtheit aller dieser Säulen bildet die Wolke "ESMs/EMICs range from AR5", die vom Koordinatenursprung ausgeht. AR5 bezeichnet dabei die 5. Assessment Reports des IPCC (insbesondere die der Arbeitsgruppen 1 und 3, IPCC AR5 WGI und IPCC AR5 WGI3)

Linien in dieser Wolke

- stellen die historische Entwicklung dar oder
- sind Ergebnis-Mittel- oder -Median-Werte von
 - Klimaexperimenten oder
 - Klimamodellen niedriger Komplexität, z.B. Kohlenstoffkreislaufmodelle (mein ergänzendes Dokument "Kohlenstoffkreislaufmodelle")
 - MAGICC (Meinshausen, M., S. C. B. Raper and T. M. L. Wigley (2011)), [Wikimodel description](#), [online model](#)
 - ISAM (A. Jain et al.) [Integrated Science Assessment Model](#), [online model](#),
- Ihr Zweck ist es, in den Klimaexperimenten nach grundlegenden natürlichen Prozessen zu suchen, also ein Verständnis für die Klimavorgänge zu entwickeln. Um die Treibhausgasbedingte globale Erwärmung zu interpretieren, verbindet man ein System von wiederum untereinander verbundenen Kohlenstoffreservoirs (Vegetation, Boden, Ozean) mit dem Kohlenstoffreservoir in der Atmosphäre zum "Kohlenstoffkreislaufmodell". Kohlendioxid, das der Mensch in die Atmosphäre abgibt, verteilt sich teilweise auf die anderen Reservoirs, so dass nur etwa die Hälfte der anthropogenen Emissionen in der Atmosphäre bleibt. Diese einfachen Modelle sollen Einsicht geben in diese lebenswichtigen Prozesse.
- Die Flüsse zwischen den Reservoirs kennt man unabhängig vom Klimageschehen. Man übernimmt sie als Parameter in das Kohlenstoffkreislaufmodell. Je weniger man diese

- Parameter verändern muss, um mit dem Kohlenstoffkreislaufmodell die globale Erwärmung zu erhalten, die man aus Klimaexperimenten berechnet hat, desto mehr Vertrauen schenkt man dem Kohlenstoffkreislaufmodell, d.h. desto mehr glaubt man, die wesentlichen Prozesse gefunden zu haben.
- Aus dem Verständnis leiten sich dann Handlungsempfehlungen ab.
- Ein Kohlenstoffkreislaufmodell liefert -wie die Erdsystemmodelle- zu einer diskreten emittierten Kohlenstoffmenge ein Band von globalen Temperaturerhöhungen. Man verfolgt diese Unsicherheit zurück bis zu den Parametern. Die sind auch nicht als fester Wert bekannt sondern als eine Wahrscheinlichkeitsverteilung, z.B. eine Normalverteilung mit einem Medianwert μ und einer Breite σ . Die Parameter-Wahrscheinlichkeitsverteilungen kombiniert man zu einer Temperatur-Wahrscheinlichkeitsverteilung. Wie die Beschreibung von MAGICC unterstreicht, ist diese Konstruktion einer Wahrscheinlichkeitsverteilung der globalen Temperaturerhöhungen weitgehend willkürlich.
- Shaun Quega, *The role of the global carbon cycle in the Earth system*, ESA's Earth observation summer school, 2018, the part about carbon cycle starts at time 18:10
- H. Dryden: *Save the oceans and we save the planet*, 2019
- C. le Quere: *Queens Lecture 2019*, TU-Berlin

IPCC AR5: Wahrscheinlichkeitsaussagen aus den Klimaexperimenten sind relativ willkürlich: Sie spiegeln vielmehr die Häufigkeit der Ergebnisse von Klimaexperimenten wider.

- In den AR5 wird an mehreren Stellen betont, dass die Häufigkeit, mit der ESMs zu einer kumulativen CO₂-Emission eine bestimmte Temperaturerhöhung liefern, keine Wahrscheinlichkeiten seien:
- "Based on the assessment of TCRE (assuming a normal distribution with a ± 1 standard deviation range of 0.8 to 2.5°C per 1000 PgC)", IPCC AR5 WG1 Seiten 102 - 104 (Auszug)
 - IPCC AR5 WG3, Absatz 6.2.3 "Uncertainty and the interpretation of large scenario ensembles", Seite 423
 - probability distribution of input parameters as basis for probability of model results
 - IPCC AR5 WG3, 6.3.2.6 The link between concentrations, radiative forcing, and temperature, pages 438ff

Wesentlicher Gesichtspunkt: die Auswahl der Klimaexperimente wird nicht frei von Voreingenommenheit (Bias) getroffen (mehr dazu).

TCRE: Transient Climate Response to cumulative Emission of CO₂

Einfache Modelle wie MAGICC oder ISAM legen den Ansatz nahe, dass sich das Klima in der Abbildung 1 entlang von Geraden bewegt. Jeder Geraden wird eine feste Wahrscheinlichkeit zugeordnet, mit der sich das Klima auf ihr bewegt. (Seite 2SM-5 in *2 SM Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development – Supplementary Material*, Seiten 102 - 104 in IPCC AR5 WG1). Die Wahrscheinlichkeiten stützen sich auf die der ESMs/EMICs, sind also wie diese keine Wahrscheinlichkeiten im strikten Sinn.

Klimaexperimente legen nahe, dass

- sowohl die Steigung TCRE der Geraden
- als auch die der Gerade zugeordnete Wahrscheinlichkeit

unabhängig vom Geraden-Anfangspunkt ist, solange sich dieser innerhalb von 2000 GtC (= 7340 GtCO₂) bewegt. Zum Vergleich: Seit 1876 hat die Zivilisation etwa 2000 GtCO₂ emittiert.

$$\text{Steigung TCRE} = \frac{\text{Delta GMST (Grad Celsius)}}{\text{Delta C (GtCO}_2\text{)}}$$

mit

Delta GMST = Anstieg der globalen mittleren Lufttemperatur an der Erdoberfläche (Grad Celsius),
Delta C = während des Anstiegs kumulativ emittierte CO₂-Menge (GtCO₂).

Das TCRE-Modell enthält also folgende Parameter / Parametrisierung:

1. Steigung TCRE
2. Wahrscheinlichkeitsverteilung der Steigung TCRE
 - Typ der Verteilung, meist wird eine Normalverteilung angenommen
 - Parameter der Verteilung (μ , σ)

In diesem Papier werden die TCRE-Parameter von Tabelle 1 verwendet. Sie stammen aus (den gefitteten Daten der) Tabelle 2.2, IPCC SR15, Chapter 2.

Tab. 1: TCRE-Parameter (Quelle: Fit der Daten in Tabelle 2.2, IPCC SR15, Chapter 2)

Wahrscheinlichkeitsverteilung	Normalverteilung
μ	0.65 Celsius/TtCO ₂
σ	0.45 Celsius/TtCO ₂
TCRE-Bereich	
$(\mu - \sigma \dots \mu + \sigma)$	(0.16 ... 1.14) Celsius/TtCO ₂ = (0.58 ... 4.18) Celsius/TtC

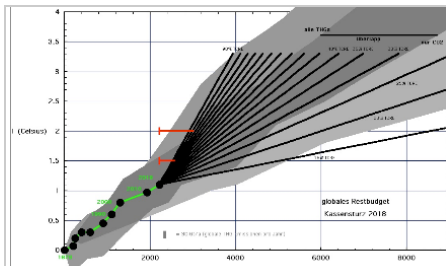
Anmerkung: Die TCRE-Parameter, die in Tabelle 2.2, IPCC SR15, Chapter 2 und in diesem Dokument (Tabelle 1) verwendet werden, sind andere als die in IPCC AR5 WG1 angegebenen. Sie führen zu einer stärkeren globalen Erwärmung als in IPCC AR5 WG1.

Anwendung des TCRE-Modells: Das deutsche CO₂-Restbudget am 1.1.2018

Die Problematik einer fairen internationalen Aufteilung des THG-Restbudgets wird im 5. Assessment Report der IPCC WG3 (AR5 WG3) diskutiert (Tabelle 4.1 auf Seite 323 verweist auf die entsprechenden Stellen im Report). Die in den folgenden Abbildungen verwendete gleichmäßige Verteilung des Restbudgets auf die 8 Milliarden Menschen soll als Orientierung gelten darüber, welche internationale Klima-Verantwortung eine reiche Industrienation wie Deutschland haben könnte. Beispielsweise zwei global gleichmäßige Pro-Kopf-Verteilungen wurden im Jahr 2009 vom Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung "Globale Umweltveränderungen" (WBGU) als Rechengrundlage verwendet.

- "Historische Verantwortung" (Kassensturz 1990)
- "Zukunftsverantwortung" (Kassensturz 2010)

Ausgangspunkt für die Berechnung des deutschen CO₂-Restbudgets ab dem 1.1.2018 ist also das globale CO₂-Restbudget zum selben Zeitpunkt (*Pariser Klimaziele erreichen mit dem CO₂-Budget*, Kap. 2 in *Umweltgutachten 2020*, SRU, 14.5.2020).



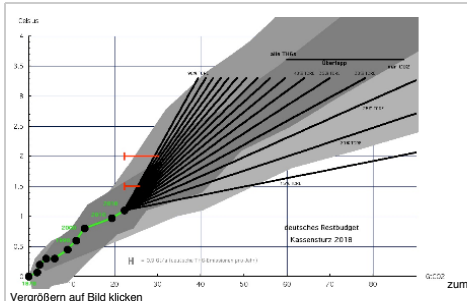
Zum Vergrößern auf Bild klicken

Abb. 3a: Globales Restbudget am 1.1.2018 nach TCRE-Modell. Das Klima bewegt sich entlang der durchgezogenen grünen Linie mit den Jahreszahl-Angaben. Für die Zeit danach prognostiziert das TCRE-Modell die Entwicklung des Klimas nun mit einem Wahrscheinlichkeitsfächer. Die TCRE-Wahrscheinlichkeiten sind von 15% bis 90% in Schritten von 5% gestaffelt. Rote Distanzen: globale CO₂-Restbudgets, die mit 84% TCRE-Wahrscheinlichkeit das 1.5- und 2.0-Grad-Ziel erreichen.

Anmerkung:

Die Wolke "ESMs/EMICs range from AR5" in Abbildung 1 enthält die Ergebnisse der ESMs/EMICs für den Mix aller Treibhausgase (Figure SPM.10, Seite 28 in IPCC AR5 WG1). In die Abbildung links wurde eine zweite Wolke aufgenommen. In ihr liegen die Ergebnisse der ESMs/EMICs, wenn sie nur die Wirkung von CO₂ berücksichtigt (Figure SPM.10, Seite 28 in IPCC AR5 WG1). Die "nur CO₂"-Wolke und die "alle THG"-Wolke überlappen in dem dunklen Bereich. Die "nur CO₂"-Wolke wurde aufgenommen, weil das TCRE-Modell von allen Treibhausgasen nur das CO₂ berücksichtigt.

Deutschland beheimatet etwa 1% der globalen Bevölkerung. Eine Pro-Kopf-Gleichverteilung des Restbudgets bedeutet damit, dass man die Weltbevölkerung zahlenmäßig 100 identischen deutschen Bevölkerungen ("Teilbevölkerungen") gleichsetzt und jeder dieser 100 Teilbevölkerungen 1% des gesamten globalen Restbudgets zubilligt. Abbildung 3b formuliert das TCRE-Modell auf diese Weise für eine solche Teilbevölkerung um. Auf der x-Achse kann man die kumulativen deutschen CO₂-Emissionen ablesen, die Deutschland im Rahmen des Pariser Klimaabkommens ab dem 1.1.2018 noch zustehen: Die roten Distanzen stellen die deutschen CO₂-Restbudgets zu Anfang des Jahres 2018 dar, die mit 84% TCRE-Wahrscheinlichkeit das 1.5- und das 2-Grad-Ziel einhalten. (3.5 und 7.9 GtCO₂).



Vergrößern auf Bild klicken

Abb. 3b: TCRE-Modell auf Deutschland im Jahr 2018 angewendet. Der internationale Verteilungsmodus ist die Gleichverteilung des globalen CO₂-Restbudgets auf alle 8 Milliarden Menschen. Danach bekommt Deutschland 1% des CO₂-Restbudgets zugeteilt.

Die x-Achse stellt nun die kumulativen deutschen CO₂-Emissionen dar (entsprechend der Zuteilung ist das ein Hundertstel der Werte auf der x-Achse der Abbildung 3a).

Die roten Distanzen sind dementsprechend ein Hundertstel der roten Distanzen in Abbildung 3a.

Deutschland läuft gegenwärtig in jährlichen 0.9 GtCO₂-Schritten entlang der TCRE-Fächergeraden auf die Zielgeraden 1.5 Grad und 2 Grad zu. Das ist um den Faktor 3 schneller als es die Weltgemeinschaft tut (3 = 0.9 GtCO₂ * 100 / 30 GtCO₂).

Table 3. Vorhersagen des TCRE-Modells im Rahmen des Pariser Klimaabkommens. Ab 1.1.2018 hat die Welt mit 84% TCRE-Wahrscheinlichkeit nur noch 352 GtCO₂ zur Verfügung, um das 1.5-Grad-Ziel einzuhalten. Deutschland würde demzufolge im Jahr 2022 CO₂-insolvent.

Die Anzahl der Jahre bis zur CO₂-Insolvenz ist hier der Quotient aus Restbudget und jährlichen Emissionen (global 30 GtCO₂/a, in Deutschland 0.9 GtCO₂/a), geht also von ungebremster CO₂-Emission aus.

In den Abbildungen 6ff werden die Emissionen dagegen von Jahr zu Jahr um denselben Betrag reduziert, sodass das Restbudget nicht abrupt sondern allmählich aufgebraucht wird.

globale Erwärmung seit 1878	Kassensturz 2018 (Abb. 3)	Welt Emissionen: 30 GtCO ₂ / Jahr			Deutschland Emissionen: 0,9 GtCO ₂ / Jahr		
		% TCRE			% TCRE		
		16%	50%	84%	16%	50%	84%
1,5 Grad Celsius	Restbudget (GtCO ₂)	2458	615	352	24,6	6,2	3,5
	Jahre bis zur CO ₂ -Insolvenz	82	21	12	27	7	4
	Jahr der CO ₂ -Insolvenz	2100	2039	2030	2045	2025	2022
2,0 Grad Celsius	Restbudget (GtCO ₂)	5530	1385	791	55,3	13,9	7,9
	Jahre bis zur CO ₂ -Insolvenz	184	46	26	61	15	9
	Jahr der CO ₂ -Insolvenz	2202	2064	2044	2079	2033	2027

Um auf die Fairness-Problematik hinzuweisen, wird in Abbildung 4 der Kassensturz nicht erst im Jahr 2018 gemacht, sondern rückwirkend schon im Jahr 1990, wie es der WBGU ([Kassensturz für den Weltklimavertrag - Der Budgetansatz, Sondergutachten 2009](#)) vorgeführt hatte. Deutschland bekommt danach sein CO₂-Restbudget im Jahr 1990 zugewiesen:

- 7,9 GtCO₂ für das 1,5-Grad-Ziel. Damit wurde Deutschland Anfang 1999 CO₂-insolvent.

- 12,3 GtCO₂ für das 2-Grad-Ziel. Damit wurde Deutschland Anfang 2004 CO₂-insolvent.

Je später der Kassensturz gemacht wird, desto länger kann sich Deutschland mit seinen im globalen Vergleich hohen Budgetverbrauch (0,9 GtCO₂/a) übermäßig am "Allmende-Topf" bedienen.

Es stellt sich nun die ethische Frage: Wie sollte Deutschland dafür aufkommen?

- Deutschland -wie die reichen Industrienationen insgesamt - hat andere Optionen der Energieerzeugung als über die Verbrennung von fossilem Kohlenstoff. Die deutsche Windenergie- und Photovoltaikindustrie haben das mit **ihrem exponentiellen Wachstum** bewiesen, bis sie mit der EEG-Novelle im August 2014 durch die deutsche Regierung ausgebremst wurde und Hunderttausende von Arbeitsplätzen abbauen musste. Arme Länder haben diese Optionen bisher nicht. Wir können ihnen mit unserer Wind- und PV-Industrie dabei helfen, diese Optionen zu entwickeln.
- Orientiert man sich an einem CO₂-Preis von 100 Euro pro tCO₂, so sprechen wir hier von deutschen Klima-Verpflichtungen in Höhe von 90 Milliarden Euro pro Jahr (0,9 GtCO₂ * 100 Euro).
- Diese Problematik trat in der Option "historische Verantwortung" mit 84% TCRE-Wahrscheinlichkeit schon ab dem Jahr 1999 bzw. 2004 auf ([Tabelle 3a](#)).

Zum Vergleich:

- Die Yasuni-ITT-Initiative Ecuadors (2010) hätte 1,2 Gt CO₂ Emissionen eingespart für 3,6 Milliarden \$ verteilt über 13 Jahre (280 Mio \$/Jahr). Deutschland hat sich nicht beteiligt. Das Projekt ist 2013 gescheitert.
- Nicholas Stern sagte 2008: "[The] [Human Development Report \(UNDP, 2007\)](#) argued that in 2015 (we are talking about 0,8 or 1 Celsius temperature increase [die wir 2010 erreicht haben]) the extra costs facing the developing countries because of climate change might be 85 billion dollars a year." [85 Milliarden \$ pro Jahr]. Quelle: [The Economics of Climate Change: Risk, Ethics and a Global Deal](#), Princeton University Public Lecture Series, Jan. 7, 2008

Welche Aussagen macht das TCRE-Modell für die deutschen CO₂-Reduktionspfade?

Um die CO₂-Insolvenz zu vermeiden, wird Deutschland seine jährlichen CO₂-Emissionen verringern. Zur graphischen Darstellung der Reduktionspfade wird der TCRE-Fächer nicht mehr im Koordinatensystem der Abbildungen 1 - 4 dargestellt, sondern in einem anschaulicheren: die x-Achse ist die Zeitachse von 1990 bis 2100, die y-Achse stellt die deutschen jährlichen Treibhausgas-Emissionen dar.

Anmerkung

Das TCRE-Modell gilt nur für CO₂-Emissionen. Sie machten im Jahr 2017 88% der deutschen Treibhausgas-Emissionen aus. Deswegen wird im Folgenden nicht zwischen den Einheiten GtCO₂eq und GtCO₂ unterschieden.

CO₂-Reduktionspfade für Deutschland: Zeitrahmen für deutsche CO₂-Emissionsreduktionen

TCRE-Fächer in einem Koordinatensystem mit Jahresangaben als x-Achse und CO₂-Emissionsraten als y-Achse

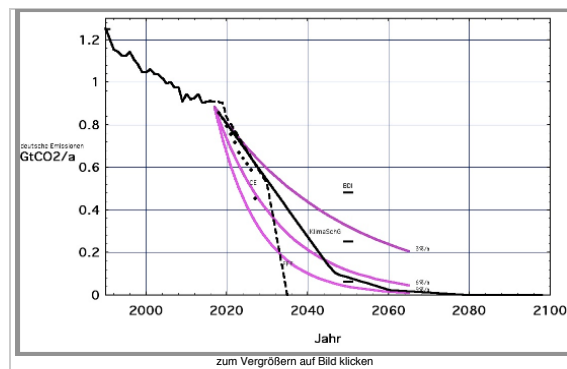


Abb. 6. Abnahme der deutschen jährlichen Treibhausgas (THG)-Emissionen zwischen 1990 und 2100.

y-Achse: deutsche jährliche THG-Emissionen (GtCO₂e/a)

- Gezackte Linie: THG-Emissionen (GtCO₂e) 1990 - 2017 nach [Umweltbundesamt](#)
- durchgezogene aus Geraden zusammengesetzte Linie: THG-Reduktionspfad nach Klimaschutzgesetz (KlimaSchG). Das KlimaSchG erstreckt sich nur bis zum Jahr 2030. In dieser Abbildung 6 sind die (im Gesetz linearen) KlimaSchG-Emissionsreduktionen linear über das Jahr 2030 hinaus verlängert worden.
- gestrichelte Linie: Reduktionspfad nach FridaysForFuture
- gepunktete abgeknickte Linie: Reduktionspfad nach Greenpeace/Client Earth
- Niveaus (horizontale Linien) über dem Jahr 2050: [Klimapfade für Deutschland](#) nach Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI)

Zum Vergleich:

Die lila Exponentialkurven repräsentieren Reduktionen der 2017er THG-Emissionen um 3% pro Jahr, 6% pro Jahr und 9% pro Jahr.

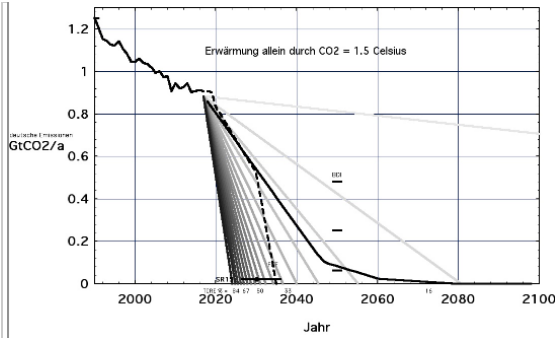
WBGU (2009) zu seiner Abbildung 3.2-1, Seite 16:

- Die Welt müsste [bei einer Reduktionsrate von 5%] in jedem einzelnen Jahr die Reduktionsleistung erbringen, die im Kioto-Protokoll über zwei Jahrzehnte vorgesehen ist."
- "globale Minderungsraten von 9% pro Jahr erfordern ... eine technische und gesellschaftliche Anstrengungen, die etwa mit der Mobilisierung der Alliierten während des zweiten Weltkriegs vergleichbar sind."

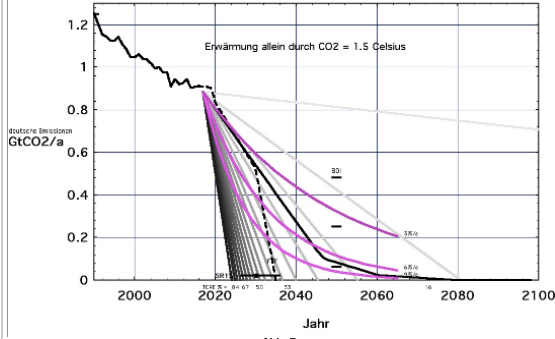
Im Folgenden wird der TCRE-Fächer im Koordinatensystem der Abbildung 6 dargestellt. (Während in den Abbildungen 1 - 5 eine kumulative CO₂-Emission die x-Koordinate eines Punktes darstellt, ist sie in den Abbildungen 6 bis 8 die Fläche unter dem Reduktionspfad.)

Jede der folgenden Abbildungen enthält neben dem TCRE-Fächer

- die jährlichen deutschen Emissionen im Zeitraum 1990 bis 2017 nach Angaben des Umweltbundesamts (gezackte Kurve).
- die im [Klimaschutzgesetz](#) (KSchG) festgelegten Treibhausgasemissionsreduktionen, linear über den Geltungsbereich des Gesetzes (2030) hinaus bis in Jahr 2100 verlängert.
- die vom Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) veröffentlichten [Klimapfade für Deutschland](#). Der BDI gibt die Reduktionen nur für das Jahr 2050 an (in den Abbildungen als Niveaus zum Jahr 2050 wiedergegeben). Von oben nach unten bedeuten die Niveaus: bereits beschlossene Reduktionen, Reduktionen um 80% gegenüber 1990, Reduktionen um 95% gegenüber 1990.
- die Reduktionspfade, welche Greenpeace & Client Earth (CE) und Fridays For Future (FFF) fordern, jeweils durch Punkte (CE) und eine nach unten abliegende Linie (FFF) angegeben.



zum Vergrößern auf Bild klicken



zum Vergrößern auf Bild klicken

Abb. 7a

Abb. 7a. Reduktionspfade für die jährlichen Treibhausgasemissionen in Deutschland ab 1.1. 2018. y-Achse: jährliche deutsche Treibhausgasemissionen in GtCO2e/a (hier wird der Einfachheit halber nicht unterschieden zwischen GtCO2 und GtCO2e).

Der TCRE-Fächer enthält die in Schritten von 5% gestaffelten CO2-Reduktionspfade zwischen den TCRE-Wahrscheinlichkeiten 10% und 90%. Zur Orientierung sind TCRE-Wahrscheinlichkeitsmarken (16%, 33%, 50%, 67% und 84%) dicht unterhalb der x-Achse angebracht.

Die Linie SR15 stellt die Daten der 4. Reihe in [Tabelle 2.2](#) in [IPCC SR15, Chapter 2](#) dar.

Zur Erinnerung:

- Die hier verwendeten TCRE-Parameter finden sich in der [Tabelle 1](#).
- Das TCRE-Modell gehört zu den besten Orientierungshilfen, die der Weltgemeinschaft zur Zeit zur Verfügung stehen.
 - Allerdings gilt es zu beachten, dass die TCRE-Wahrscheinlichkeiten keine Wahrscheinlichkeiten im strengen Sinne sind.
 - Die TCRE-Wahrscheinlichkeiten spiegeln vielmehr grob den *Prozentsatz der Klimaexperimente* wider, die das Klimaziel erreichen (*Beurteilung des Bias* der Klimaexperimente). Konkret: der Reduktionspfad mit der TCRE-Wahrscheinlichkeit 84% verbraucht ein CO2-Budget, dem 84% der ESM/EMIC-Modellergenerale bescheinigen, dass es das 1.5-Grad-Celsius einhält.

Ergebnis der Abbildung

- Die Fläche unter der gebrochenen Geraden "KlimaSchG" ist gleich der Fläche unter einer TCRE-Geraden zwischen der TCRE 10% und der TCRE 16%. Das TCRE-Modell bescheinigt dem Klimaschutzgesetz also nur eine unter 16% liegende Wahrscheinlichkeit, mit der es das 1.5-Grad-Celsius-Ziel erreichen wird.
- Die schwächsten der drei BDI-Klimapfade erreichen dieses Ziel mit noch geringerer Wahrscheinlichkeit (unter TCRE 10% und unter 15%). Der 95%-Reduktionspfad des BDI (tiefste Absenkung der CO2-Emissionsrate) ist praktisch identisch mit dem im linear extrapolierten Klimaschutzgesetz angegeben.
- Der Fridays For Future Reduktionspfad erreicht das 1.5-Grad-Celsius-Ziel mit etwa 33% TCRE-Wahrscheinlichkeit.

Zum Vergleich:

Abb. 7b. Die stärkste Reduktion in Abbildung 7b angewandt auf Deutschland liegt bei etwa TCRE 50% der Abbildung 7a

Quelle: Figure 4 aus ["A government roadmap for addressing the climate and post COVID-19 economic crises"](#), Climate Action Tracker (27. April 2020)

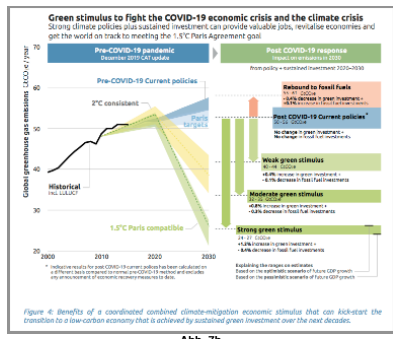


Abb. 7b

Figure 4. Benefits of a coordinated combined climate-mitigation economic stimulus that can kickstart the transition to a low-carbon economy that is achieved by sustained green investment over the next decade.

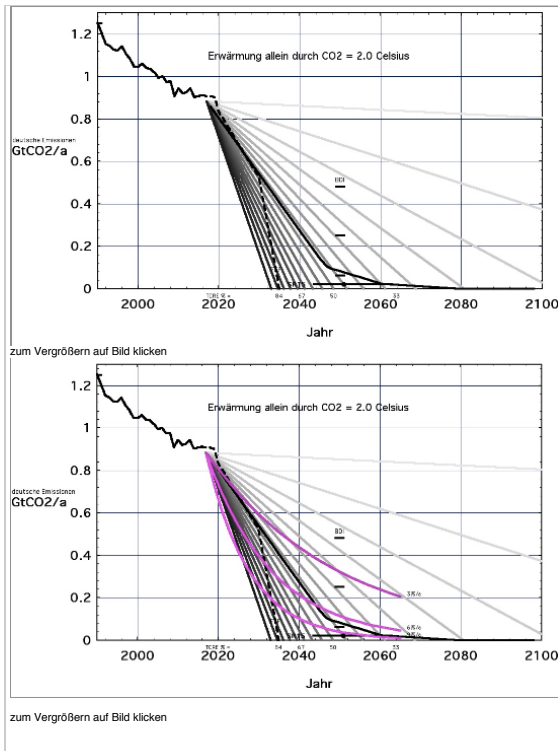
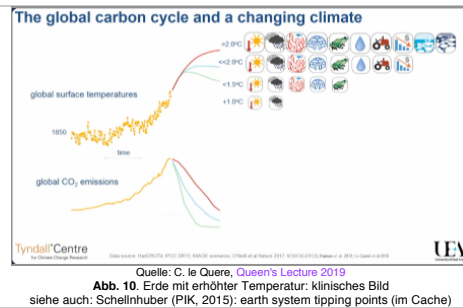
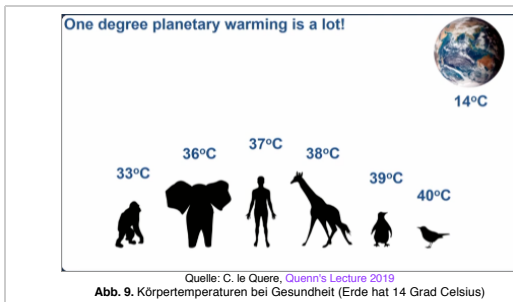


Abb. 8. Wie Abbildung 7a, aber für das 2-Grad-Ziel. Das Klimaschutzgesetz und der stärkste BDI-Reduktionspfad erreichen das 2.0-Grad-Ziel mit weniger als 67% Wahrscheinlichkeit.

Schlussfolgerung



Ist das 1.5-Grad-Ziel noch zu erreichen: ja oder nein?

Diese Fragestellung wird den wissenschaftlichen Gegebenheiten -oder anders ausgedrückt: der Komplexität der Erdsystemmodelle (ESMs)- nicht gerecht. Die Umrechnung von Emissionen auf Klimaerwärmung ist modellabhängig. Alle Modelle liefern ähnlich unscharfe Umrechnungen: Wir wissen nicht, wo im Unsicherheitsbereich (im TCRE-Fächer oder der CO₂-Wolke der Abbildungen 1 - 3) die Erderwärmung liegen wird. Dass die Häufigkeit, mit der Klimamodelle bestimmte Ergebnisse liefern, keine Wahrscheinlichkeitsaussage gestattet, liegt an der Fokussierung der Klimaforschung auf bestimmte Fragestellungen und dem daraus resultierenden Bias.

Die Klimatologie kann also zur Zeit nur wissenschaftlich gestützte Hinweise geben. Der ist aber schon alarmierend genug, und die beobachtbare Klimaveränderung bestätigt dies.

Zur Veranschaulichung möchte ich (ähnlich wie Corinne le Quere 2019 in Berlin argumentierte) unsere Klimaproblematik vergleichen mit dem Problem in der Medizin, bei dem eine Labordiagnose (das Analogon zum Erdsystemmodell) bei einem Patienten (dem Analogon zur Erde) nur unscharf eine Krankheit feststellen kann, das klinische Bild (Analogon zu den Folgen der bisherigen Erderwärmung, rechts oben in Abbildung 10) des Patienten, z.B. seine Körpertemperatur, aber die Krankheit klar erkennen lässt. In solchen Fällen behandelt der Arzt den Patienten als Kranken. Er wird deshalb aber künftig nicht davon absehen, eine Labordiagnose einzuholen.

Als intelligente Gesellschaft brauchen wir eine differenzierte, auf Wissenschaft basierte Hilfe bei unseren Diskussionen. Die Klimatologen liefern uns diese Hilfe - und wir können uns nicht aussuchen, wie sie auszusehen hat.

ANHANG

Auf folgende vertiefende Informationen weist diese Seite hin:

- Globale Erwärmung als Funktion der kumulativen CO₂-Emissionen
- Zeitliche Entwicklung der TCRE-Parameter
- Kassensturz 1990
- Kassensturz 2010
- TCRE-SR15: Fit der TCRE-Parameter an Tabelle 2.2 im Chapter 2 vom Hauptreport IPCC SR15