

## 3.2 Emissionstrends – vergangene und zukünftige Emissionen

Die Schweiz stösst heute pro Kopf und Jahr rund sechs Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente direkt im Inland aus; Hauptverursacher der Emissionen sind der Strassenverkehr mit einem Drittel und die Beheizung von Gebäuden mit einem Viertel Anteil an den Gesamtemissionen. Der jährliche Pro-Kopf-Ausstoss steigt auf etwa 14 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente an, wenn man auch die grauen Emissionen berücksichtigt, das heisst diejenigen Emissionen im Ausland, die durch in die Schweiz importierte Güter verursacht werden. Damit liegen die Pro-Kopf-Emissionen der Schweiz über dem globalen Durchschnitt. Die globalen Treibhausgasemissionen haben sich seit 1950 verdrei- bis vervierfacht. Das derzeitige Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum sorgt jährlich für noch höhere Emissionen – dies vermag auch die höhere Energieeffizienz nicht zu kompensieren. Wollen wir das politisch beschlossene 2-Grad-Ziel einhalten, steht uns jedoch nur eine begrenzte Menge an CO<sub>2</sub>-Emissionen zur Verfügung. Je länger wir damit warten, unseren Treibhausgasausstoss zu mindern, desto rascher müssen die Emissionen später abnehmen, damit wir das Ziel noch einhalten können. Wer wie viel zur Erreichung des Ziels beitragen kann und soll, ist ein Problem der Lastenverteilung.

### Globale Trends beim Treibhausgasausstoss

Seit 1950 haben sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen weltweit etwa vervierfacht. Gründe sind das derzeitige Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum (Wertschöpfung pro Kopf), die jedes Jahr für noch höhere Emissionen sorgen. Die Verbesserung der Energieeffizienz (weniger Energieverbrauch pro Franken an Wertschöpfung) wirkt dem entgegen, vermag aber die Auswirkungen des Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstums nicht zu kompensieren. Die CO<sub>2</sub>-Intensität (CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kilowattstunde verbrauchte Energie) hat nach jahrzehntelanger Abnahme wieder zugenommen, als Folge der grossen Verfügbarkeit von günstiger Kohle und Gas.

*Reto Knutti (ETH Zürich), Joeri Rogelj (IIASA Laxenburg)*

#### CO<sub>2</sub>-Emissionen nehmen zu

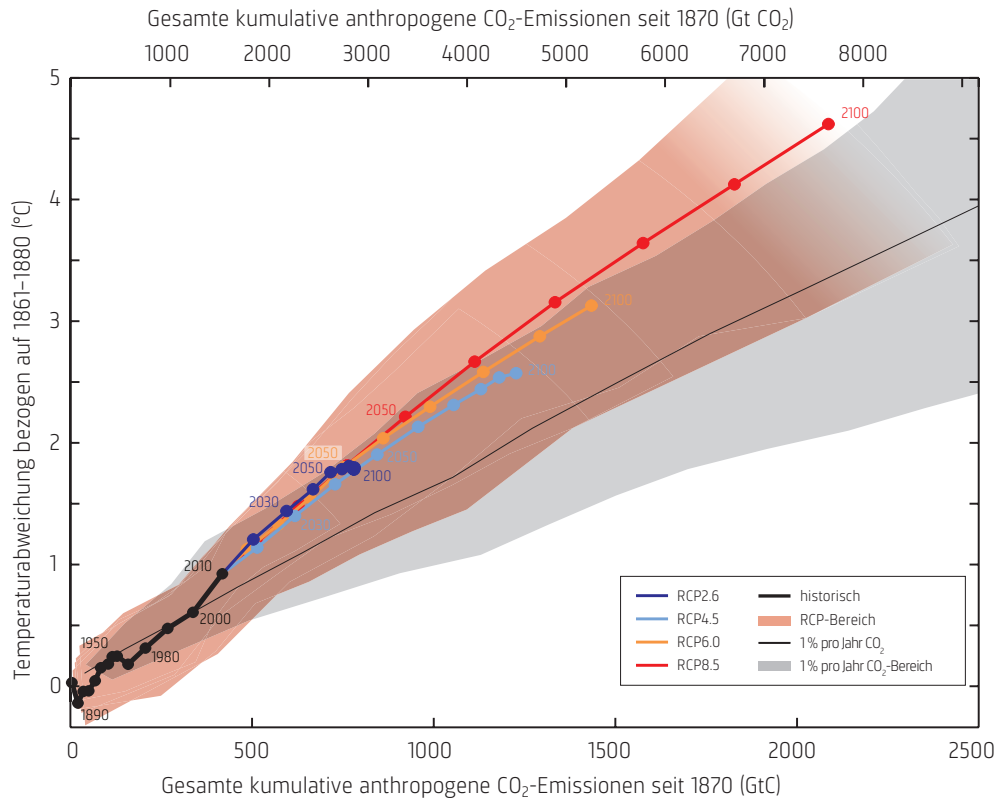
Trotz internationaler Verhandlungen und dem Kyoto-Protokoll hat sich die Zunahme der Emissionen seit etwa 2000 sogar verstärkt, von 1,1 Prozent pro Jahr in den 1990er-Jahren auf 3 Prozent pro Jahr (Mittelwert der Jahre 2000–2013). Zwei Gründe sind dafür verantwortlich: ein deutlich stärkeres Wirtschaftswachstum seit etwa dem Jahr 2000 sowie eine Trendwende zur Zunahme der CO<sub>2</sub>-Intensität. Beide Gründe sind grösstenteils auf das unerwartet hohe Wirtschaftswachstum in Schwellenländern, insbesondere China, zurückzuführen. In Schwellenländern hat Kohle als günstige und zuverlässige Quelle für die Stromproduktion eine hohe Bedeutung. China hat als Land die USA als grössten CO<sub>2</sub>-Emittent abgelöst. Pro Kopf liegt China zwar noch deutlich hinter den USA, aber schon auf ähnlichem Niveau wie die Schweiz und andere europäische Staaten.

#### Fossile Brenn- und Treibstoffe tragen am meisten zum CO<sub>2</sub>-Ausstoss bei

Der CO<sub>2</sub>-Ausstoss aus fossilen Brenn- und Treibstoffen (und zu einem kleinen Teil aus der Zementproduktion) dominiert den menschgemachten Treibhauseffekt mit weltweit rund 65 Prozent (gemessen als CO<sub>2</sub>-Äquivalent), gefolgt von 11 Prozent CO<sub>2</sub> aus Abholzung und Landnutzungsänderung. Neben CO<sub>2</sub> tragen Methan (CH<sub>4</sub>) 16 Prozent, Lachgas (N<sub>2</sub>O) 6 Prozent und F-Gase (halogenierten Fluorkohlenwasserstoffe, die perfluorierten Kohlenwasserstoffe und Schwefelhexafluorid) 2 Prozent bei. Die Wirkung dieser Gase ist pro Molekül zwar deutlich grösser als bei CO<sub>2</sub>, aber ihre Mengen in der Atmosphäre sind viel kleiner.

#### Beiträge aus Sektoren

Weltweit tragen die folgenden Sektoren am meisten zu den Treibhausgasemissionen bei: Elektrizität und Wärmeproduktion (25 Prozent), Landwirtschaft, Abholzung



**Abbildung 3.2:** Globaler mittlerer Temperaturanstieg als Funktion der total ausgestossenen Menge CO<sub>2</sub>. Resultate sind gezeigt für gekoppelte Modelle des Klima- und Kohlenstoffkreislaufes für die vier RCP-Szenarien bis 2100. Mittelwerte über zehn Jahre sind als Punkte markiert (z. B. ist 2050 das Mittel über 2040 – 2049). Modellresultate über die Vergangenheit sind schwarz markiert. Die rote Fläche illustriert die Unsicherheit der Modelle. Resultate für Szenarien nur mit CO<sub>2</sub>-Emissionen sind mit der schwarzen dünnen Linie und der grauen Fläche gezeigt. Für eine bestimmte Menge CO<sub>2</sub> zeigen diese eine kleinere Erwärmung als die RCP-Szenarien, die zusätzlich alle anderen Antriebe wie Methan, N<sub>2</sub>O und Aerosole berücksichtigen. (Quelle: IPCC 2013/WGI/SPM/FIG.10)

und Landnutzungsänderung (24 Prozent), Industrie (21 Prozent), Transport (14 Prozent) und Gebäude (6 Prozent).

### Das globale CO<sub>2</sub>-Budget

Trotz vieler komplexer Rückkopplungen sowohl im Klimasystem als auch im Kohlenstoffkreislauf gibt es einen erstaunlich einfachen Zusammenhang zwischen der globalen Temperatur und menschengemachten CO<sub>2</sub>-Emissionen: Die globale Temperaturänderung ist ungefähr proportional zu den totalen CO<sub>2</sub>-Emissionen seit vorindustrieller Zeit (Abb. 3.2). Dieser lineare Zusammenhang ist robust über viele Modelle unterschiedlicher Komplexität, aber die exakte Grösse der Erwärmung pro ausgestossene Tonne CO<sub>2</sub> ist modellabhängig. Der Wert liegt *wahrscheinlich* (Wahrscheinlichkeit ist höher als 66 Prozent) im Bereich 0,8 bis 2,5 Grad Celsius pro 1000 Gigatonnen<sup>1</sup> Kohlenstoff. Das bedeutet, dass jedes Temperaturziel einer maximalen Menge

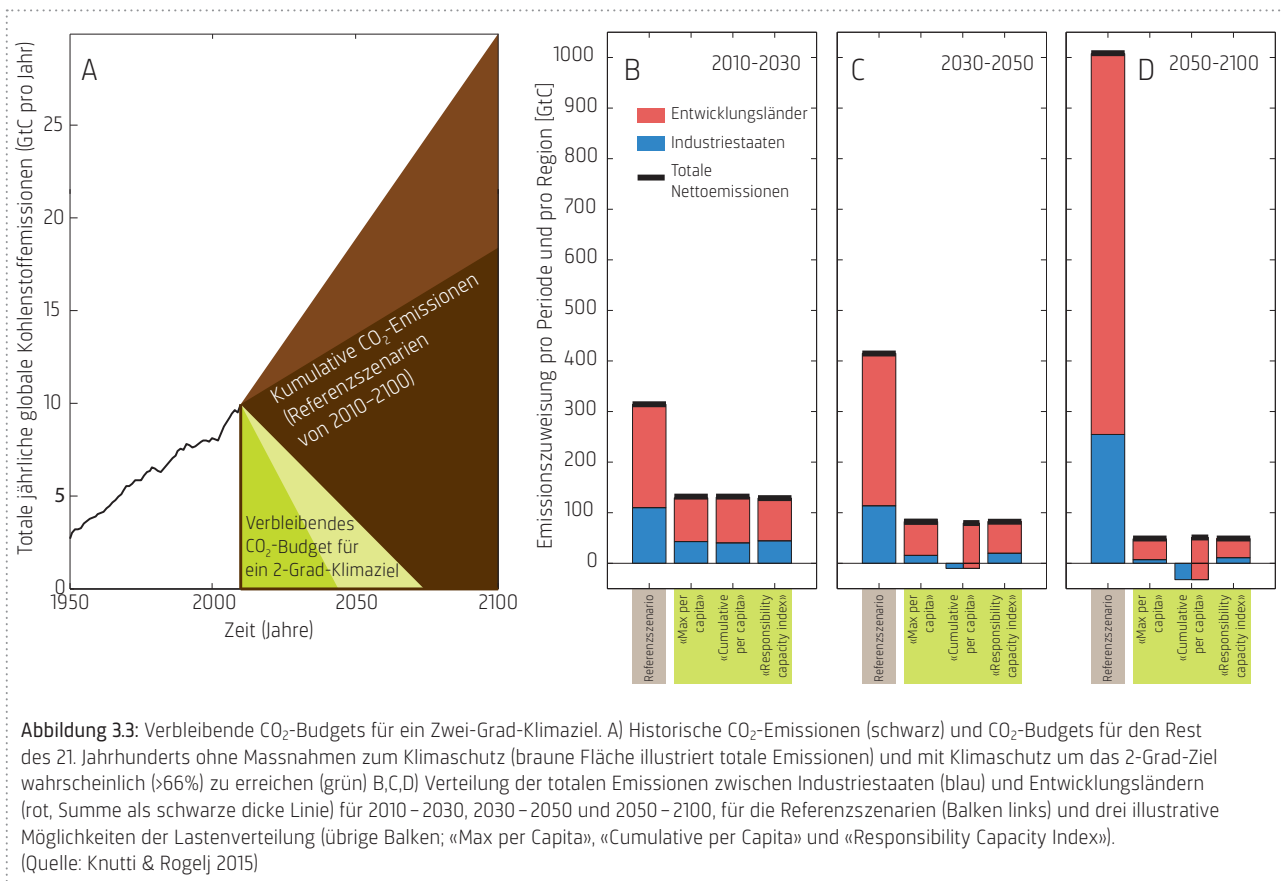
CO<sub>2</sub> entspricht, die wir ausstossen können. Egal ob 2 Grad, 1,5 Grad oder 3 Grad Celsius, die Gesamtmenge an CO<sub>2</sub>, die wir dafür ausstossen können, ist beschränkt.

Aus dieser Idee des beschränkten Gesamt-CO<sub>2</sub>-Budgets über die Zeit bis zum angestrebten Temperaturstabilisierungsziel ergeben sich einfache Konsequenzen. Je mehr wir heute ausstossen, desto weniger dürfen wir später. Je mehr ein Land ausstösst, desto mehr muss ein anderes einsparen. Ist das gesetzte Temperaturziel erreicht, müssen die Emissionen global praktisch null sein, damit die Temperatur stabil bleibt.

### CO<sub>2</sub>-Budget für das 2-Grad-Ziel

Um das 2-Grad-Ziel mit mindestens 66 Prozent Wahrscheinlichkeit zu erreichen, steht uns ein Budget von rund 1000 Milliarden Tonnen Kohlenstoff zur Verfügung. Dieses Budget bezieht sich jedoch nur auf Kohlenstoff aus CO<sub>2</sub> und vernachlässigt zusätzliche strahlungswirk-

<sup>1</sup> GtC = 1 Gigatonne C = 10<sup>15</sup> g C = 3,6 Gt CO<sub>2</sub>



same Substanzen wie Methan (CH<sub>4</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O), die unter anderem aus der Landwirtschaft kommen sowie die kühlende Wirkung von Aerosolen. Werden diese mitberücksichtigt, wird das CO<sub>2</sub>-Budget für das 2-Grad-Ziel kleiner und beträgt rund 800 Milliarden Tonnen Kohlenstoff. Davon haben wir rund 515 Milliarden Tonnen Kohlenstoff seit vorindustrieller Zeit (1870) schon ausgestossen. Somit verbleibt nur mehr rund ein Drittel des Gesamtbudgets.

Wollen wir das 2-Grad-Ziel mit einer höheren Wahrscheinlichkeit als 66 Prozent erreichen oder gelingt es uns nicht, die Emissionen von Methan und Lachgas aus der Landwirtschaft genügend stark zu mindern, dann ist das verbleibende CO<sub>2</sub>-Budget entsprechend kleiner.

## Das Problem der Lastenverteilung

Die internationale Politik hat sich für das 2-Grad-Ziel entschieden und entsprechend verbleibt uns noch weniger als ein Drittel des Kohlenstoff-Gesamtbudgets (siehe oben). Das Übereinkommen von Paris erwähnt ebenfalls ein zusätzliches Ziel von 1,5 Grad Celsius Erwärmung. Dafür gelten die gleichen Argumente, ausser dass das Ge-

samtbudget noch kleiner ist. Wie dieses Gesamtbudget an Emissionen unter den Ländern und über die Zeit verteilt werden soll, ist eine ethische und wirtschaftliche Frage, die mit naturwissenschaftlichen Fakten nicht beantwortet werden kann. Für die Verteilung über die Länder gilt in der politischen Diskussion grundsätzlich das Prinzip der «gemeinsamen aber differenzierten Verantwortung». Das bedeutet, dass das CO<sub>2</sub>-Budget eine globale Ressource ist und nur eingehalten werden kann, wenn alle sich an der Lösung beteiligen. Was nicht heisst, dass alle gleichviel dazu beitragen müssen, denn nicht alle tragen gleichviel Verantwortung für das Problem. Dies wird mit der sogenannten Lastenverteilung<sup>2</sup> berücksichtigt.

## Lösungsansätze

Die meisten in den Klimaverhandlungen diskutierten Lösungsansätze zur Lastenverteilung berücksichtigen einerseits die historische Verantwortung eines Landes

<sup>2</sup> Der Begriff des «Burden sharing» (Lastenverteilung) bezeichnet, welche Anstrengung jedes Land unter bestimmten Kriterien von Fairness beitragen muss, um seine Emissionen zu reduzieren. Die gleichwertige Frage, die hier diskutiert wird, ist die CO<sub>2</sub>-Budgetverteilung, das heisst, welcher Anteil der gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen einem Land noch zusteht (Knutti & Rogelj 2015).

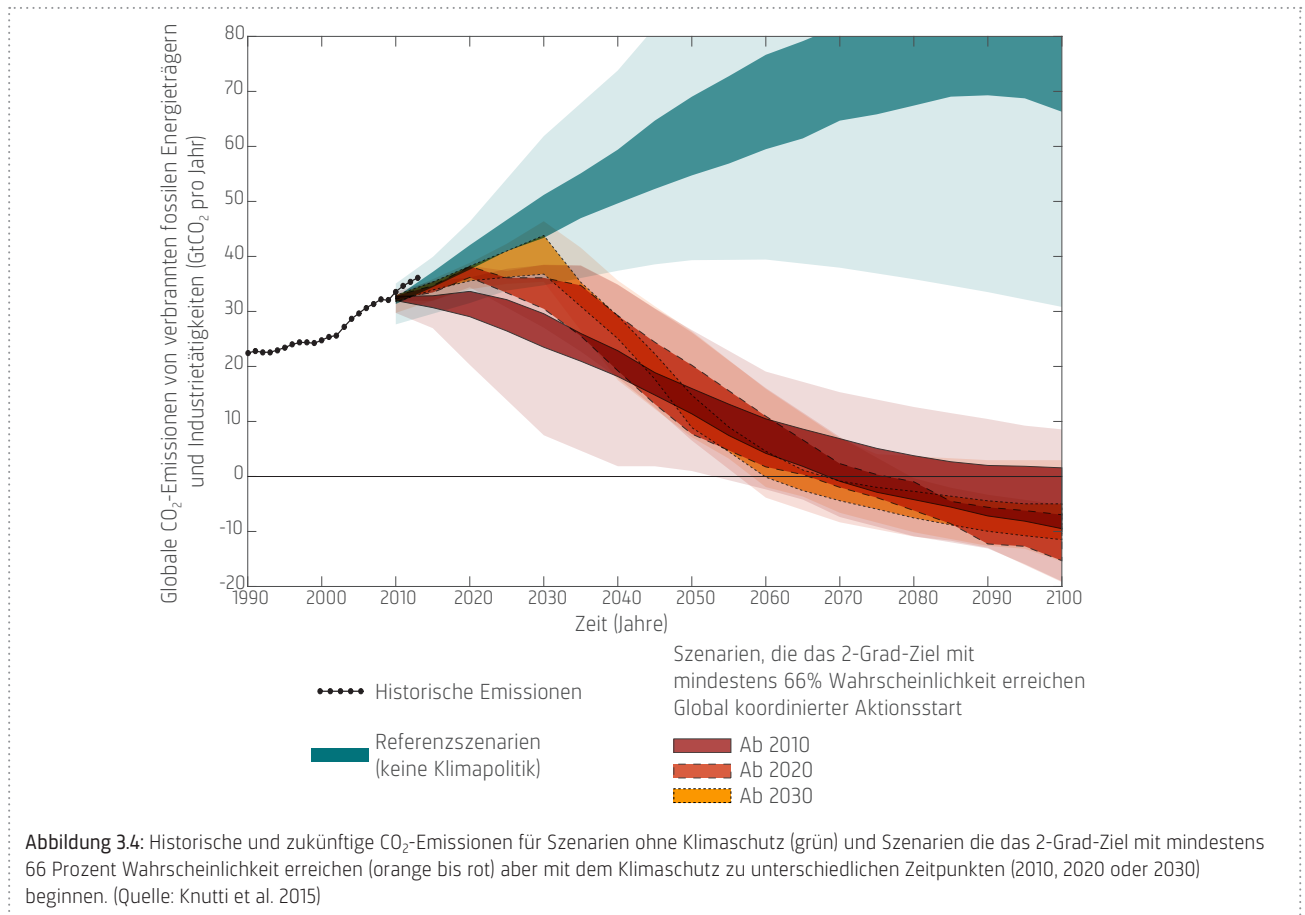


Abbildung 3.4: Historische und zukünftige CO<sub>2</sub>-Emissionen für Szenarien ohne Klimaschutz (grün) und Szenarien die das 2-Grad-Ziel mit mindestens 66 Prozent Wahrscheinlichkeit erreichen (orange bis rot) aber mit dem Klimaschutz zu unterschiedlichen Zeitpunkten (2010, 2020 oder 2030) beginnen. (Quelle: Knutti et al. 2015)

(historische und heutige Emissionen) anhand des Verursacherprinzips, das besagt, dass der Verursacher einer Verschmutzung bezahlt. Andererseits wird oft bewertet, ob ein Land die Möglichkeit hat, die Emissionen zu reduzieren. Dies kann zum Beispiel durch das Bruttosozialprodukt pro Kopf abgeschätzt werden. Ähnlich wie bei Steuern gilt hier also das Prinzip, dass jeder etwas bezahlt, aber wer mehr besitzt oder verdient, der kann und muss einen grösseren Beitrag leisten. Abbildung 3.3 zeigt die Lastenverteilung am Beispiel des 2-Grad-Ziels sowie anhand der folgenden drei prominent diskutierten Lösungsansätze, wobei auch viele andere Ansätze möglich sind:

- **«Max per Capita»:** Die Pro-Kopf-Emissionen der Entwicklungsländer bleiben unter den Pro-Kopf-Emissionen der Industriestaaten.
- **«Cumulative per Capita»:** Die kumulierten Pro-Kopf-Emissionen der Industriestaaten und der Entwicklungsländer zwischen 1990 und dem Ende des 21. Jahrhunderts sind gleich hoch.
- **«Responsibility Capacity Index»:** Die Emissionen werden zwischen den unterschiedlichen Ländern aufgeteilt gemäss den historischen Emissionen und dem Bruttosozialprodukt.

Kurzfristig sind die drei Ansätze der Lastenverteilung ähnlich. Langfristig aber müssten beim Ansatz «Cumulative per Capita» die Emissionen in den Industriestaaten negativ werden. Negative Emissionen kann ein Land beispielsweise erreichen, indem es Zertifikate für Emissionen kauft. Mit dem Kaufpreis werden die Emissionen im Ausland eingespart. Eine andere Möglichkeit ist, Bioenergie mit CO<sub>2</sub>-Sequestrierung zu kombinieren: CO<sub>2</sub> aus der Luft wird gebunden und im Boden eingelagert. Den drei Lösungsansätzen gemeinsam ist, dass die Länder mit den heute höchsten Emissionen am stärksten mindern müssen und dass der grössere Teil des verbleibenden Budgets den Entwicklungsländern zusteht.

Obwohl in der Politik seit langem darüber diskutiert wird, konnten sich die Länder bis heute nicht auf eine Lösung der Lastenverteilung einigen. Zum Beispiel ist unklar, ob die Bewohner eines Landes nur für die momentanen Emissionen oder auch für die Emissionen ihrer Vorfahren verantwortlich sind. Das Prinzip der Verteilung des Budgets wird von einigen als politisch nicht durchsetzbar kritisiert. Andere argumentieren, dass es kein «Recht auf Verschmutzung» gebe, das man verteilen könnte. Alternativ wäre zum Beispiel ein Recht auf Entwicklung oder

auf Lebensqualität denkbar, aber dessen Berechnung und der Zusammenhang mit historischen und momentanen Emissionen ist noch subjektiver. 2015 haben die Länder in Paris beschlossen, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 Grad Celsius und möglichst auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen. Diese Ziele sollen durch Beiträge auf Länderebene erreicht werden: Jedes beteiligte Land wird wahrscheinlich einen Beitrag vorschlagen, den es als gerecht empfindet. Bisher ist die Summe der Beiträge nicht ausreichend, um das Zwei-Grad- oder 1,5-Grad-Ziel zu erreichen. Eine andere Sichtweise ist, dass die Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen kaum durch eine Diskussion der Lastenverteilung und ein globales Abkommen gelöst werden kann, sondern dass vielmehr Rahmenbedingungen geschaffen werden müssen, unter denen die Dekarbonisierung für Einzelpersonen, Firmen oder Länder so attraktiv ist, dass sie unabhängig von den Handlungen der anderen Beteiligten vorangetrieben wird (Patt 2015).

### Zeit für Dekarbonisierung ist knapp

Mit Integrated-Assessment-Modellen (s. a. Kap. 1.4 Klimamodelle, S. 36) können für ein vorgegebenes CO<sub>2</sub>-Budget oder für ein Klimaziel die kostengünstigsten CO<sub>2</sub>-Pfade berechnet werden (Abb. 3.4). Dabei werden auch Unsicherheiten in Bezug auf den Ausstoss weiterer Treibhausgase und zur Entwicklung von Technik und Gesellschaft berücksichtigt, zum Beispiel, ob Nuklearenergie in Zukunft zur Verfügung steht oder nicht. Abbildung 3.4 zeigt, dass sich die heutigen Emissionen im oberen Bereich der Referenzszenarien ohne Klimaschutz bewegen und deutlich über den kostenoptimalen Szenarien zur Erreichung eines 2-Grad-Ziels liegen, die schon ab 2010 die Emissionen deutlich mindern (Abb. 3.4, dunkelrot).

In Abbildung 3.4 ist ersichtlich, dass die Emissionen immer rascher abnehmen oder nach etwa 2060 stärker negativ werden müssen, je länger wir mit Massnahmen zur Minderung der Treibhausgasemissionen zuwarten, falls wir ein bestimmtes Temperaturziel einhalten möchten. So dürfte das 2-Grad-Ziel bei ungebremstem Wachstum der CO<sub>2</sub>-Emissionen über die nächsten fünf Jahre nur noch sehr schwer zu erreichen sein, von einem 1,5-Grad-Ziel gar nicht erst zu reden. Sogar wenn Länder ihre freiwilligen Emissionsziele bis 2020 erreichen wollen, müsste ein Trendbruch bei der Energieeffizienz und der Abnahme der CO<sub>2</sub>-Intensität stattfinden. In kostenoptimalen Szenarien liegen die zwischen 2030 und 2050 notwendigen Emissionsminderungen im Bereich von jährlich drei Prozent. Die Minderungen steigen auf ungefähr fünf Prozent jährlich an in denjenigen Szenarien, die davon ausgehen, dass die derzeit angekündigten Klimamassnahmen bis 2030 effektiv umgesetzt werden. Szenarien, die davon ausgehen, dass die momentanen Trends bis 2030 weiterlaufen, verlangen

eine jährlichen Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von sechs Prozent. Es ist klar, dass mit jedem weiteren Jahr ohne umfassende globale Klimamassnahmen die Möglichkeiten, den globalen Temperaturanstieg unter zwei Grad Celsius zu halten, rasch abnehmen.

### Freiwillige Länderverpflichtungen sind zu gering

In kostenoptimalen Szenarien für zwei Grad Celsius sind die Emissionen von Industriestaaten bis 2030 um 20 bis 40 Prozent tiefer als im Jahr 2010 (IPCC 2014/WGIII/Tab.6.4). Weltweit wären rund 40 bis 70 Prozent Minderung bis 2050 nötig, um das 2-Grad-Ziel zu erreichen. Für Industriestaaten bedeutet dies, dass ihre Emissionen im Jahr 2050 um 80 bis über 90 Prozent tiefer sein sollten als im Jahr 2010. Diese Zahlen gelten für einen grossen Teil der Lösungsansätze zur Lastenverteilung (IPCC 2014/WGIII/Figur 6-29). In vielen Szenarien werden die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen um 2070 zudem negativ. Das bedeutet, dass die durch Bioenergie mit Sequestrierung eingelagerte CO<sub>2</sub>-Menge die Emissionen übersteigen muss.

Die von den verschiedenen Ländern freiwillig eingegangenen Verpflichtungen sind wesentlich kleiner als die in Abbildung 3.3 und 3.4 gezeigten Minderungen, die für eine kostenoptimale Erreichung des 2-Grad-Ziels nötig sind (Rogelj et al. 2016). Die globale Weltgemeinschaft ist trotz aller Klimaverhandlungen nicht auf dem Weg, das 2-Grad-Ziel zu erreichen, sondern zielt eher auf eine Erwärmung von drei bis vier Grad Celsius (Schaeffer et al. 2013).

### Referenzen

- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)**. Summary for Policymakers (SPM). [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGII)**. [www.ipcc.ch/report/ar5/wg3](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)**. Chapter 6 «Assessing Transformation Pathways». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg3](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3)
- Knutti R, Rogelj J (2015) **The legacy of our CO<sub>2</sub> emissions: a clash of scientific facts, politics and ethics**. *Climatic Change* 133: 361–373.
- Knutti R, Rogelj J, Sedláček J, Fischer EM (2016) **A scientific critique of the two-degree climate change target**. *Nature Geoscience* 9: 13–18.
- Patt A (2015) **Transforming Energy: Solving Climate Change with Technology Policy**. University Press, Cambridge.
- Rogelj J, den Elzen M, Höhne N, Fransen T, Fekete H, Winkler H, Schaeffer R, Sha F, Riahi K, Meinshausen M (2016) **Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2°C**. *Nature* 534: 631–639.
- Schaeffer M, Gohar LK, Kriegler E, Lowe JA, Riahi K, Van Vuuren DP (2013) **Mid- and long-term climate projections for fragmented and delayed-action scenarios**. *Technological Forecasting & Social Change* 90: 257–268.