



Klima Kompetenz Camps für Zukunftsberufe

Thema: CO₂-Restbudget und
Pfade zur Klimaneutralität



Hintergrundinformationen

Die weltweiten CO₂-Emissionen liegen gegenwärtig bei 35 Gt jährlich (siehe Bild 1) und steigen – trotz aller Bemühungen zum Klimaschutz – immer noch weiter an! In Bild 2 sind die CO₂-Emissionen verschiedener Länder pro Kopf und absolut gegenübergestellt.

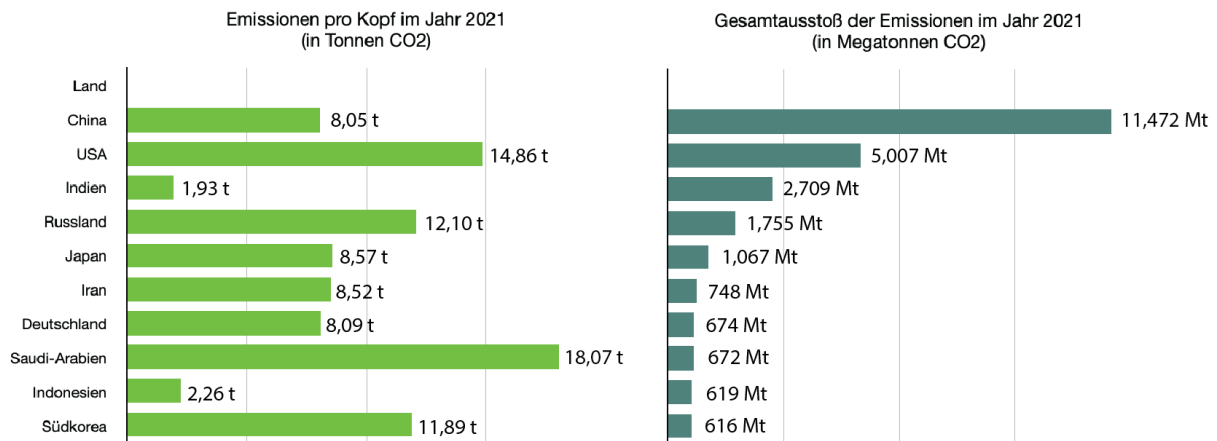


Bild 1, Quelle: „CO₂-Emissionen nach Ländern“, von Michelle Bruce, auf Datenbasis von [CO₂ Country Profile von our world in data](#), lizenziert unter [CC BY \(4.0\)](#).

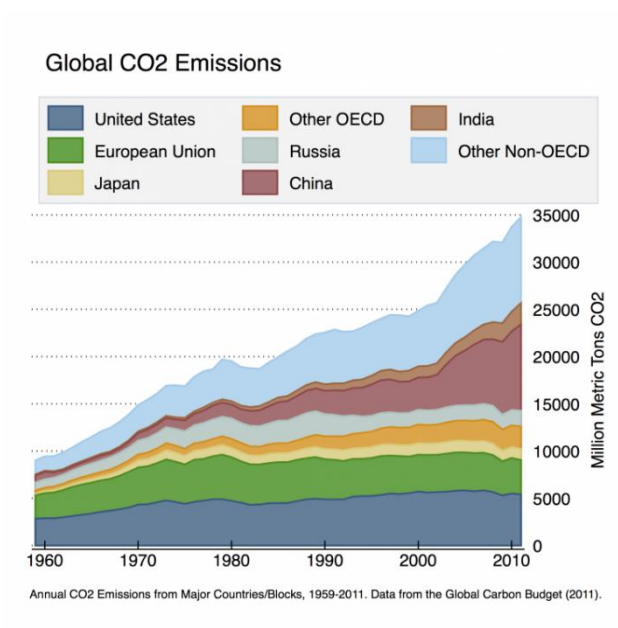


Bild 2, Quelle: Berkeley Earth, 2011, Annual CO₂ Emissions from Major Countries/Blocks, 1959-2011, <https://berkeleyearth.org/archive/graphics/global-energy-and-emissions/>.

Abhängig davon, welches Ziel die Menschheit in Bezug auf die Begrenzung des Temperaturanstiegs anstrebt, ergibt sich ein Restbudget für CO₂-Emissionen, die weltweit ab 2020 noch in die Atmosphäre emittiert werden dürfen, in der Größenordnung von 400 bis 800 Gt. Dieses CO₂-Restbudget wird nach bestimmten Kriterien (z.B. Bevölkerungszahl, Anrechnung bisheriger CO₂-Emissionen oder nicht usw.) auf alle Länder der Erde verteilt, woraus sich für die einzelnen Länder Reduzierungsverpflichtungen ableiten lassen.

Unter Vernachlässigung von historischen CO₂-Emissionen ergeben sich für Deutschland mit einem Anteil von 1,1 % an der Weltbevölkerung folgende Restbudgets für den Zeitraum ab 01.01.2020 in Abhängigkeit von dem Temperaturziel:

Temperaturziel: Begrenzung des Temperaturanstiegs auf...	Verbliebenes CO ₂ -Restbudget für Deutschland (in Mt)
1,5 °C	4200
1,75 °C	6700
2,0 °C	9200

Quelle: 1,5 °C- und 1,75 °C-Ziel: Deutsche Welle: [THEMEN/WISSEN / UMWELT vom 14.5.2020](#); 2 °C-Ziel: eigene Schätzung von Hartmut Oswald (lineare Extrapolation)

Um deutlich zu machen, welche CO₂-Einsparungen in den nächsten Jahren notwendig sind, werden verschiedene Szenarien erstellt. Beispielsweise sind in Bild 3 verschiedene Reduktionspfade zur Erreichung des 1,5 °C-Ziels dargestellt (wobei diese aus der Perspektive von 2020 davon ausgeht, dass die CO₂-Emissionen ab 2020 stetig sinken, was jedoch nicht eingetreten ist).

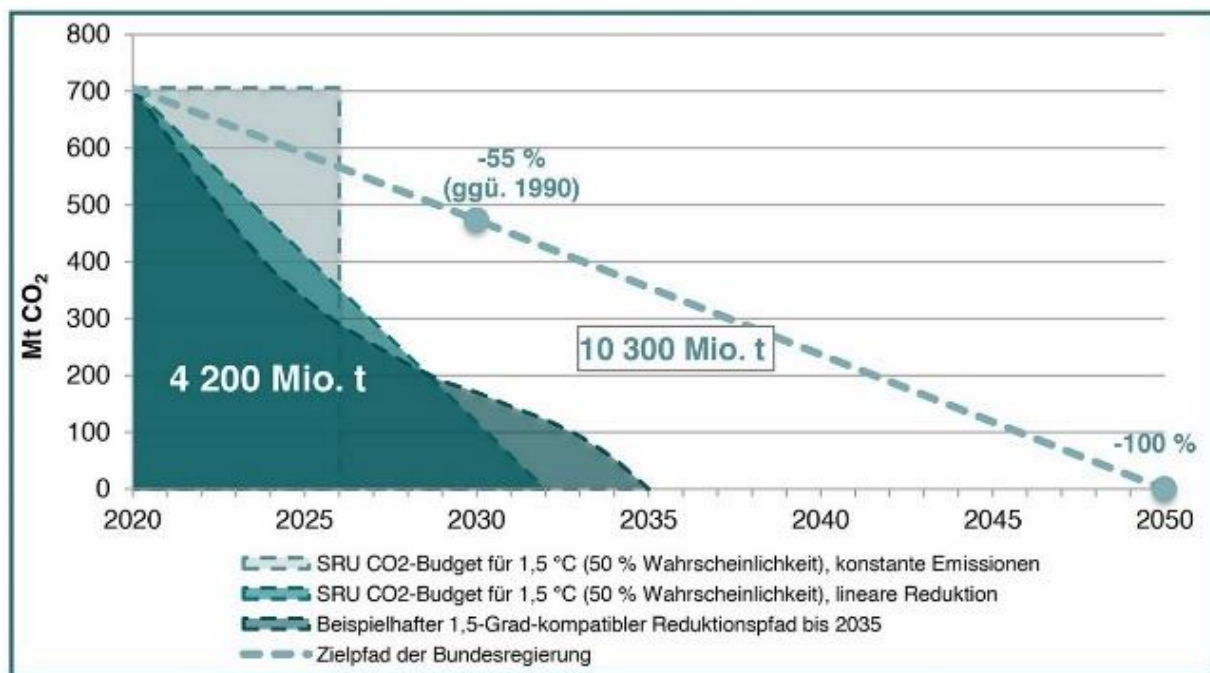


Bild 3, Quelle: Wuppertal Institut auf Basis des Sachverständigenrats für Umweltfragen (SRU), 2020, CO₂-Emissionspfade zur Einhaltung des deutschen 1,5-Grad-Budgets bis 2035 und Zielpfad der Bundesregierung, <https://www.factory-magazin.de/news/beitrag/artikel/wie-deutschlands-energiesystem-bis-2035-co2-neutral-werden-kann-um-das-15-grad-ziel-zu-erreichen.html>

Entwicklung von Szenarien zur CO₂-Reduzierung

Im Folgenden sollen beispielhaft für Deutschland CO₂-Reduktionsszenarien zur Erreichung der verschiedenen Klimaschutzziele (1,5 °C-, 1,75 °C- und 2 °C-Ziel) entwickelt werden. Zur Veranschaulichung werden die Restbudgets und die sich daraus ergebenden Reduktionsverpflichtungen mit Hilfe von Bausteinen dargestellt, wobei ein Baustein jeweils 100 Mt CO₂ entsprechen soll. (Hinweis: Als Bausteine eignen sich Duplo-, Lego-, Jenga- oder Dominosteine, wobei es für die Darstellung der Reduktionsszenarien vorteilhaft ist, wenn auch halbe Steine, 50 Mt CO₂ entsprechend, zur Verfügung stehen.)

Gemäß der o.g. Tabelle werden für Deutschland also maximal 92 Bausteine benötigt, um die den verschiedenen Temperaturzielen entsprechenden Restbudgets sowie die sich daraus ergebenden Reduktionspfade ab dem Jahr 2020 darzustellen.

In Deutschland gingen die CO₂-Emissionen in den 2010er Jahren leicht zurück bis auf 805 Mt (gerundet 800 Mt bzw. 8 Bausteine) im Jahr 2019. Laut Umweltbundesamt sanken die CO₂-Emissionen im Jahr 2020 auf 729 Mt, (rund 700 Mt bzw. 7 Steine), was vor allem auf den Rückgang wirtschaftlicher Aktivitäten und des Verkehrs infolge der Corona-Pandemie zurückzuführen ist. Im Jahr 2021 stiegen die CO₂-Emissionen wieder auf 762 Mt (rund 800 Mt bzw. 8 Steine).

Quelle: [UBA, Pressemitteilung Nr. 15/2022 vom 15.3.2022](#)

Die Emissionen der Jahre 2020 und 2021 müssen vom verbliebenen Restbudget ab 2020 abgezogen werden, woraus sich ein Restbudget ab 2022 in Höhe von 2700 Mt (27 Bausteine für die Erreichung des 1,5 °C-Ziels), 5200 Mt (52 Steine für 1,75 °C) bzw. 7700 Mt (77 Steine für 2 °C) ergeben. Diese verbliebenen CO₂-Emissionsbudgets (Steine) sollen nun so verteilt werden, dass sich möglichst realistische Reduktionspfade für die Erreichung der Klimaneutralität ergeben.

Geht man vom CO₂-Budget zur Erreichung des 1,5 °C-Ziels (27 Steine) von einer linearen Reduzierung der CO₂-Emissionen um 100 Mt/Jahr (1 Stein /Jahr) aus, so müsste die Klimaneutralität bereits im Jahr 2028 erreicht werden (siehe Bild 4).

Dieses Ergebnis bietet vielfältigen Anlass zur Diskussion, z.B. darüber, ob das Ziel realistisch ist und was eine Reduzierung der CO₂-Emissionen um 100 Mt/Jahr bedeuten würde. Diese Diskussion sollte zuerst einmal zugelassen werden. Anschließend bietet die Bearbeitung der folgenden Aufgaben Unterstützung bei der Beantwortung der aufgeworfenen Fragen.



Bild 4: „CO₂-Budget zur Erreichung des 1,5 °C-Ziels“, Foto: Hartmut Oswald, lizenziert unter [CC BY \(4.0\)](#).

Aufgaben

- 1) Stapeln Sie die CO₂-Emissionen für die Erreichung des 1,75 °C- und des 2,0 °C-Ziels und diskutieren Sie die Ergebnisse der drei Szenarien!

Hinweise:

Für die Durchführung der Unterrichtseinheit ab 2023 ist es sinnvoll, die CO₂-Daten zu aktualisieren. Für das dann verbliebene CO₂-Restbudget sind vom Restbudget ab 01.01.2020 (laut o.g. Tabelle) die jährlichen CO₂-Emissionen ab 2020 zu subtrahieren.

Zur Dokumentation der 3 Szenarien empfiehlt sich jeweils ein Foto.

Szenario 1:

Szenario 2:

Szenario 3:

- 2) Recherchieren Sie die Aufteilung der CO₂-Emissionen für das Jahr 2021 (oder möglichst aktuell) nach ihrer Herkunft (z.B. nach den Sektoren: Stromerzeugung, Verkehr, Wärme, Industrie, Landwirtschaft und Sonstige) und stellen Sie die Anteile mit Hilfe der Steine sowie grafisch (als Torten- oder Balkendiagramm) dar!

- 3) Diese Aufgabe dient zur Veranschaulichung der CO₂-Menge von 100 Mt (1 Baustein), mit Beispielen aus den Bereichen Stromerzeugung, Erneuerbare Energien, grüner Wasserstoff, Verkehr, Heizung, Industrie und Aufforstung, welche die Komplexität der Energiewende abbilden. Zwar kann keine dieser Maßnahmen innerhalb eines Jahres umgesetzt werden, aber sie veranschaulichen die Größenordnung der notwendigen CO₂-Reduktionen insgesamt: Wenn alle acht Maßnahmen zusammen mit einem Anteil von 10 % pro Jahr umgesetzt werden würden, dann könnten die Ziele innerhalb von 10 Jahren erreicht werden.

Methodischer Hinweis:

Für die Bearbeitung der Aufgabe 3 eignet sich das Gruppenpuzzle: Dazu werden acht Tische (für jede Aufgabe einer) vorbereitet. Auf jeden dieser Tische wird ein Blatt mit einer der Aufgabenstellungen gelegt und die Schülerinnen und Schüler können sich einem Tisch zuordnen und die dort gestellte Aufgabe lösen und anschließend präsentieren.

(Eventuell ist durch die Lehrkraft eine Auswahl der Aufgaben zu treffen, die dem Wissensstand der Lernenden entspricht.)

Berechnen Sie, ...

- a) ..., wie viele Braunkohlekraftwerke mit einer Leistung von 1 GW und einer jährlichen Laufzeit von 6000 Volllaststunden dafür abgeschaltet und durch CO₂-emissionsfreie Kraftwerke ersetzt werden müssten! (CO₂-Emissionsfaktor: Bei der Erzeugung von 1 kWh Braunkohlestrom wird ca. 1 kg CO₂ emittiert.)

Übrigens:

Beim Ersatz dieser Kohlekraftwerke durch herkömmliche Atomkraftwerke müsste ungefähr dieselbe Anzahl davon gebaut werden, da diese vergleichbare Leistung und Laufzeiten besitzen. Dabei sind jedoch die CO₂-Emissionen beim Bau dieser Kraftwerke und bei der Förderung, Aufbereitung und Transport des spaltbaren Materials sowie beim Bau und Betrieb des Endlagers noch nicht berücksichtigt!

- b) ..., wie viele Windkraftanlagen mit einer Leistung von 5 MW und 2500 Volllaststunden jährlich notwendig wären, um den Braunkohlestrom aus a) zu ersetzen!

- c) ..., wie viel Fläche mit Solarmodulen dafür belegt werden müsste, wenn Solarmodule mit einer Nennleistung von 200 W/m^2 verwendet werden (bei 900 Volllaststunden) und welchem Flächenanteil von Deutschland das entspricht!

- d) ..., wie viel grünen Wasserstoff wir benötigen um 100 Mt CO_2 -Emissionen, welche durch Erdgas mit einem CO_2 -Emissionsfaktor von $0,2 \text{ kg/kWh}$ verursacht werden, einzusparen (Energiegehalt von Wasserstoff: $33\,330 \text{ kWh/t}$)! Welcher Anteil des Erdgasverbrauchs von Deutschland könnte damit (bezogen auf das Jahr 2021) eingespart werden?

- e) ..., wie viele Verbrenner-Autos mit einer CO_2 -Emission von 150 g/km und einer jährlichen Fahrleistung von 20.000 km stillgelegt bzw. durch CO_2 -neutrale Alternativen ersetzt werden müssten und welchem Anteil der zugelassenen Pkw in Deutschland dies entspricht!

- f) ..., wie viele Wohnungen und Einfamilienhäuser energetisch saniert werden müssen, wobei von einer durchschnittlichen Wohnfläche von 80 m^2 , einem durchschnittlichen Wärmeverbrauch von $16\,000 \text{ kWh/a}$ und einem mittleren CO_2 -Emissionsfaktor von $0,23 \text{ kg/kWh}$ (Mittelwert zwischen Heizöl und Erdgas) ausgegangen werden soll!

Hinweis:

Bei der Sanierung kann im Durchschnitt von einer Halbierung des Wärmeverbrauchs ausgegangen werden. Der Restverbrauch soll CO_2 -emissionsfrei erfolgen, indem die alten Erdgas- und Heizölkessel durch klimaneutrale Heizsysteme, z.B. Elektrowärmepumpen, die mit Ökostrom betrieben werden, oder Biomasse- bzw. Biogasheizungen, evtl. in Kombination mit Solarthermie-Anlagen, ersetzt werden.

- g) ..., was es bedeutet, 100 Mt CO₂ im Bereich der Industrie einzusparen!
Recherchieren Sie dazu, wie viel Stahl, Aluminium, Beton und Glas jährlich in Deutschland hergestellt werden, wie viel CO₂ dabei entsteht und welcher Anteil davon 100 Mt entspricht!

- h) ..., wie viele Bäume bzw. welche Fläche zur Neutralisierung von jährlich 100 Mt CO₂ aufgeforstet werden müssten und welchem Flächenanteil von Deutschland das entspricht!
Berechnungsgrundlagen: Nach www.co2online.de bindet eine Buche ca. 12,5 kg CO₂ pro Jahr. Es soll angenommen werden, dass eine ausgewachsene Buche 100 m² Fläche benötigt.

- 4) Überlegen Sie sich weitere Maßnahmen zur Senkung der CO₂-Emissionen und schätzen bzw. recherchieren Sie im Internet, welchen Beitrag diese Maßnahmen leisten können!

Projektarbeit

Entwerfen Sie einen Plan zur Erreichung der Klimaneutralität für Deutschland!

Hinweise:

- Entscheiden Sie, welches Ziel (1,5 °C, 1,75 °C oder 2 °C Temperaturerhöhung) Sie erreichen wollen und begründen Sie Ihre Entscheidung!
- Diskutieren Sie die Maßnahmen aus den Aufgaben 3 und 4 und entwickeln Sie einen Maßnahmenplan zur Erreichung der Klimaneutralität für die verschiedenen Sektoren (Stromerzeugung, Verkehr, Wärme, Industrie, Landwirtschaft und Sonstige)!
- Erstellen Sie eine
- Präsentation für einen Vortrag vor der Klasse!

Notizen:

Lösungen zur Aufgabe 3:

- a) 16,7 – also rund 17 Braunkohlekraftwerke
- b) 8.000 Windkraftanlagen
- c) 556 km² bzw. 0,15 % der Fläche Deutschlands
- d) 15 Mt Wasserstoff bzw. 500 TWh Energie – entsprechend ca. 50 % von 1003 TWh Erdgasverbrauch in 2021
Quelle: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/164119/umfrage/erdgasverbrauch-in-deutschland-seit-1999/>
- e) 33 Mio. Pkw – entsprechend ca. 56 % von 58,5 Mio. zugelassenen Pkw (2022)
Quelle: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand_node.html
- f) 27,2 Mio. Wohnungen – entsprechend ca. 63 % von 43,1 Mio. Wohnungen in 2021
Quelle: <https://www.immobilien-erfahrung.de/wohnungen-deutschland-wohnungsbau-2021-zahlen/>
- g) Bitte recherchieren Sie selbst, ich freue mich auf Ihre Berechnungen!
Bitte senden Sie diese an hartmut_oswald@yahoo.de – Danke!
- h) 8 Mrd. Bäume mit einem Platzbedarf von 800 000 m²
Anmerkung: Etwas realistischer wird das Ergebnis, wenn man so rechnet, dass jedes Jahr ein 80-stel dieser Fläche (und auch Bäume) aufgeforstet wird, dann würde sich nach 13 Jahren eine **kumulierte** CO₂-Einsparung von 100 Mio. t ergeben (berechenbar mit der Gaußschen Summenformel: 1 + 2 + 3 + 4 + ... + 13 = 80).
Dann würden in diesen 13 Jahren jeweils 100 Mio. Bäume (etwas mehr als 1 Baum pro Einwohner) auf 10 000 km² Fläche gepflanzt. Zusammen wären das dann 1,3 Mrd. Bäume auf 130 000 km² Fläche.



Arbeits- / Lernmaterial 'CO₂-Restbudget und Pfade zur Klimaneutralität' von Hartmut Oswald, Cornelia Ditsch und Stefan Grabiger - [KlimaKompetenz-Camps](#), lizenziert unter [CC-BY-SA \(4.0\)](#) - sofern nicht anders angegeben. Dargestellte Logos unterliegen dem Markenrecht, bleiben weiterhin geschützt und dürfen nicht verändert werden.