

CLIMATOPIA HANDBUCH ZUM SELBSTSTUDIUM



CLIMATOPIA



Co-funded by
the European Union

The European Commission's support for the production of this publication does not constitute an endorsement of the contents, which reflect the views only of the authors, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.

Declaration on Copyright:



This work is licensed under
a Creative Commons Attribution NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.

You are free to:

- **share** — copy and redistribute the material in any medium or format
- **adapt** — remix, transform, and build upon the material

under the following terms:

- **Attribution** — You must give appropriate credit, provide a link to the license, and indicate if changes were made. You may do so in any reasonable manner, but not in any way that suggests the licensor endorses you or your use.
- **NonCommercial** — You may not use the material for commercial purposes.
- **ShareAlike** — If you remix, transform, or build upon the material, you must distribute your contributions under the same license as the original.

INHALTSVERZEICHNIS

CLIMATOPIA HANDBUCH ZUM SELBSTSTUDIUM	1
1. HINTERGRUND UND BEGRÜNDUNG	5
1.1 Warum es notwendig ist, den Klimawandel im Unterricht zu behandeln.....	5
1.2 Koordinierung der wissenschaftlichen Arbeiten zur Untersuchung des Klimawandels	7
1.3 Der wissenschaftliche Nachweis des Klimawandels in Kürze	8
1.4 Können wir den Klimawandel bekämpfen?.....	12
2. KLIMAVERÄNDERUNGEN IN DER GESCHICHTE UND NATÜRLICHE URSACHEN	12
2.1 Die Auswirkungen der Milankovitch-Zyklen	13
2.2 Die Auswirkung der Sonnenvariabilität.....	15
2.3 Effect of volcanoes.....	16
3. GRUNDLEGENDE INFORMATIONEN ZUM KLIMAWANDEL	18
3.1 Das Wetter im Vergleich zum Klima.....	18
3.2 Was ist der natürliche Treibhauseffekt?	19
Erklärung des Mechanismus	19
3.3 Was ist der verstärkte Treibhauseffekt?	20
3.4 Globale Erwärmung versus Klimawandel.....	20
Treibhausgase: eine kurze Beschreibung.....	21
Wie messen wir Treibhausgase?.....	23
Kohlenstoff-Fußabdruck	27
3.5 Wie machen wir Zukunftsprognosen zum Klimawandel?.....	27
Szenarien für Treibhausgasemissionen: Plausible Modelle für künftige Treibhausgasemissionen ..	29
4. WELCHE AUSWIRKUNGEN HAT DER KLIMAWANDEL?	32
4.1 Ökosysteme und biologische Vielfalt	32
4.2 Extreme Wetterereignisse	33
4.3 Ernährungssysteme, Ernährungssicherheit und Forstwirtschaft	34
4.4 Wassersysteme und Wassersicherheit	34

4.5 Gesundheit und Wohlbefinden.....	35
4.6 Migration und Vertreibung	36
4.7 Menschliche Vulnerabilität	37
1.1 Städte, Siedlungen und Infrastruktur	37
4. 8 Wirtschaftlicher Schaden	38
5. WELCHE VERÄNDERUNGEN WERDEN FÜR DIE ZUKUNFT ERWARTET?	40
6. ANPASSUNG AN DEN KLIMAWANDEL	42
6.1 Einige Beispiele für Maßnahmen zur Bewältigung der Klimakrise.....	43
7. ABSCHWÄCHUNG DES KLIMAWANDELS	44
7.1 Einzelne Aktivitäten zur Abschwächung des Klimawandels.....	45

1. HINTERGRUND UND BEGRÜNDUNG

1.1 Warum es notwendig ist, den Klimawandel im Unterricht zu behandeln

Das Klima der Erde ist ein komplexes dynamisches System. Verschiedene Prozesse (atmosphärische, ozeanische, biologische, geologische usw.) sind mit einer Vielzahl von ineinander verschachtelten Teilsystemen verknüpft, die alle das Klimasystem antreiben und zu regionalen Klimaschwankungen führen. Es gibt eine ganze Reihe unabhängiger Beweise dafür, dass der **vom Menschen verursachte Klimawandel** stattfindet, und zwar **auf der Grundlage internationaler wissenschaftlicher Forschung** der letzten Jahrzehnte und des Konsenses veröffentlichter, von Expert*innen begutachteter Studien von Forscher*innengruppen aus der ganzen Welt. Das Klima ist lebenswichtig, und daher ist es für uns alle von entscheidender Bedeutung, die Erkenntnisse der Klimawissenschaften genau zu verstehen: Der Klimawandel ist eines der wichtigsten Themen des 21. Jahrhunderts. Es geht darum, Jahr für Jahr mit Hilfe von Überwachungsstationen, Satelliten und geeigneten wissenschaftlichen Instrumenten zu erheben, was mit dem lokalen und globalen Klima geschieht, um zu sehen, wie gut die Maßnahmen zur Eindämmung des Klimawandels greifen.

Der Klimawandel gilt als ein sehr interdisziplinäres Forschungsgebiet. Die Komplexität des Klimawandels und der hohe Druck, nachhaltige Lösungen zu finden, indem das Problem mit vertieften, konkreten und umsetzbaren Kenntnissen angegangen wird, erfordert die Zusammenarbeit zwischen den Disziplinen der Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften. Es besteht jedoch wissenschaftliche Unsicherheit über zahllose Details wie die Veränderungsraten und die Wechselwirkungen zwischen den Komponenten des Klimasystems; dies liegt jedoch in der Natur der Forschung über alle komplexen Systeme, was als ein Aspekt der wissenschaftlichen Praxis verstanden werden muss. Aus diesem Grund wird das Wissen über das Klima und seine Veränderungen ständig auf der Grundlage neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse aktualisiert, und es sollte auch darauf hingewiesen werden, dass das, was wir heute wissen, weit über das hinausgeht, was wir vor zehn oder sogar fünf Jahren gewusst haben.

Die Wissenschaft macht deutlich, dass der Klimawandel das größte Problem der heutigen Gesellschaft ist. Eine gesunde Gesellschaft ist auf ein einigermaßen stabiles Klima, nachhaltige Ökosysteme, Energie- und Wasserversorgung, klare Meeresgewässer für Fischereierzeugnisse sowie hochwertige Böden für die landwirtschaftliche Produktion angewiesen. Alle diese Bereiche sind miteinander verknüpft, und das Klima ist eine entscheidende Komponente für die Sicherung ihrer Nachhaltigkeit. Ein sich veränderndes Klima wird also für große Teile der Welt negative Kaskadeneffekte zur Folge haben. So könnten beispielsweise

immer häufiger auftretende extreme Wetterereignisse zu mehr Ernährungsunsicherheit und Vertreibung von Menschen führen, was wiederum Auswirkungen auf ganze Regionen und die Weltwirtschaft hätte. Außerdem sind die Auswirkungen nicht auf den gefährdeten Ort beschränkt, an dem sie auftreten. Sie verursachen eine Reihe von Klimagefahren, die global sind oder zumindest große Regionen betreffen (z. B. Überschwemmungen, Dürren, Waldbrände).

Die Auswirkungen von Klimarisiken und unsere Fähigkeit, mit diesen Auswirkungen umzugehen, hängen von der Widerstandsfähigkeit oder Anfälligkeit unserer Gesellschaften ab. Klimarisiken werden die Gesellschaften in unterschiedlichem Maße treffen, da es auf der Welt besonders widerstandsfähige und besonders anfällige Regionen gibt. Wohlhabendere Länder, einschließlich der europäischen Nationen, könnten ein Hochwasserereignis problemlos bewältigen und dauerhafte Auswirkungen auf die lokale Landwirtschaft und Lebensmittelversorgung vermeiden. Ebenso erleichtern fortschrittliche Bewässerungssysteme und Wasserversorgungsinfrastrukturen die Kompensation geringer Niederschläge während Dürreperioden. Ein entwickeltes Land kann mit einem Klimaeffekt wie einer Dürre fertig werden. Andererseits können weniger entwickelte Länder eine Dürre, die zu Ernteausfällen, einer Unterbrechung der Nahrungsmittelversorgung und einem Anstieg der Armut führt, nicht so leicht verkraften. Dann sind mehr Menschen nicht in der Lage, mit der Situation fertig zu werden, wodurch die Ressourcen weiter belastet werden, was bedeutet, dass gefährdete Gemeinschaften noch anfälliger werden und ein Teufelskreis entsteht. Ein solches Ergebnis bleibt nicht auf die gefährdete Region beschränkt, sondern kann sich über Grenzen und Nationen hinweg ausbreiten und zu Konflikten, Störungen der Finanzmärkte und des internationalen Handels sowie zu Migration führen.

Daher ist es unerlässlich, dass die junge Generation mit dem Wissen und dem kritischen Denken ausgestattet wird, das sie benötigt, um diese unvermeidliche Hürde des Klimawandels und seiner Auswirkungen zu meistern. Bildung ist ein wesentlicher Faktor im immer dringender werdenden globalen Kampf gegen den Klimawandel. Das Wissen über den Klimawandel, das den Jüngsten vermittelt wird, kann:

1) ihnen helfen, das Ausmaß des Problems zu verstehen und die Folgen der globalen Erwärmung zu bewältigen

2) sie ermutigen, ihre täglichen Aktivitäten und ihre Lebensweise zu ändern, um die Auswirkungen des Klimawandels abzumildern

3) ihnen die Möglichkeit geben, sich an die bereits eingetretene globale Notlage anzupassen.

Darüber hinaus kann Klimabildung für Schüler*innen spannend sein, da sie ihnen hilft, die Zusammenhänge zwischen lokalen Ereignissen und globalen Auswirkungen zu erforschen, Wissen aus

verschiedenen wissenschaftlichen Fächern miteinander zu verknüpfen und das Gesamtbild des zukünftigen Zustands der Umwelt zu betrachten. Die Erziehung der jungen Generation durch die Vermittlung von Klimawissenschaft an Schulen und die Sensibilisierung für den Klimawandel ist ein wichtiger Schritt zur Bekämpfung des Klimawandels in den kommenden Jahren. Außerdem werden Teile der jungen Generation von heute die Entscheidungsträger*innen und politischen Gestalter*innen von morgen sein.

1.2 Koordinierung der wissenschaftlichen Arbeiten zur Untersuchung des Klimawandels

Mit dem Klimawandel befassen sich internationale Organisationen und Abkommen, die die Dringlichkeit eines sofortigen Handelns aller Nationen weltweit deutlich machen. Diese internationalen Verträge sind der Sensibilisierung der Öffentlichkeit und der Bekämpfung des Klimawandels gewidmet. Weitere Informationen finden Sie im Folgenden:

The United Nations Framework Convention on Climate Change¹, UNFCCC, das 1992 unterzeichnet und von 197 Ländern ratifiziert wurde, ist das erste Klimaabkommen. Mit dem Übereinkommen wurden eine Konferenz der Vertragsparteien (COP), ein Sekretariat und nachgeordnete Gremien eingerichtet, die die Umsetzung des Übereinkommens und der damit verbundenen Instrumente im Rahmen des Mandats überwachen. Die Konferenzen der Vertragsparteien finden alle zwei Jahre statt, um die Fortschritte bei der Bewältigung des Klimawandels zu bewerten und die Solidarität zwischen den Ländern bei der Bekämpfung des Klimawandels zu erneuern. Das UNFCCC hat ein Verfahren eingeführt, das es den Ländern ermöglicht, Daten über ihre nationalen Treibhausgasemissionen zu erstellen und auszutauschen.

The Kyoto Protocol² ist das erste internationale Regelwerk zur Umsetzung des UNFCCC. Kyoto ist der Name der japanischen Stadt, in der das Protokoll ausgehandelt wurde, wird aber heute in Diskussionen über den Klimawandel meist als Bezeichnung für das Protokoll selbst verwendet. Das Kyoto-Protokoll trat nach der Ratifizierung durch Russland im Februar 2005 in Kraft und verpflichtet Industrieländer und Schwellenländer zur Begrenzung und Reduzierung von Treibhausgasemissionen im Einklang mit vereinbarten Einzelzielen.

The Paris Agreement³ ist das erste rechtsverbindliche globale Abkommen zum Klimawandel, das 2015 in Paris von 196 Vertragsparteien vereinbart wurde und im November 2016 in Kraft trat. Das Pariser Abkommen verfolgt einen "Bottom-up"-Ansatz, bei dem die Länder einzeln entscheiden, um wie viel sie

¹ https://unfccc.int/?gclid=EAlalQobChMIudq5t6iP-wIVaoBQBh1WdQ5sEAAYASAAEgIh1vD_BwE

² https://unfccc.int/kyoto_protocol?gclid=EAlalQobChMI94uJ_KWP-wIVjNPtCh24WQa-EAAYASAAEgIqw_D_BwE

³ <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>

ihre nationalen Emissionen jedes Jahr reduzieren werden. Sein Ziel ist es, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 Grad Celsius, vorzugsweise auf 1,5 Grad Celsius, im Vergleich zum vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Die Länder, die das Pariser Abkommen unterzeichnet haben, haben sich verpflichtet, die Finanzströme auf einen "Weg zu niedrigen Treibhausgasemissionen und einer klimaresistenten Entwicklung" auszurichten.

The World Meteorological Organisation (WMO), als Sonderorganisation der Vereinten Nationen widmet sich der internationalen Koordinierung und Zusammenarbeit in Bezug auf den Zustand und das Verhalten der Erdatmosphäre, ihre Wechselwirkung mit dem Land und den Ozeanen, das von ihr erzeugte Wetter und Klima sowie die daraus resultierende Verteilung der Wasserressourcen. Die WMO hat die Aufgabe, über ein integriertes Beobachtungsnetz von meteorologischen Instrumenten das Wetter kontinuierlich zu überwachen und die Unterhaltung von Datenverwaltungszentren und Telekommunikationssystemen für die Bereitstellung und den schnellen Austausch von Wetter-, Klima- und Wasserdaten zu erleichtern.⁴

Die WMO hat den Entscheidungsträgern Fakten auf der Grundlage von Beobachtungen über den Zustand des Klimas und seine Veränderungen mitgeteilt, während der **Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)** (IPCC), die **weltweit führende wissenschaftliche Autorität** auf dem Gebiet des Klimawandels, diese durch wissenschaftliche Berichte auf der Grundlage aktueller wissenschaftlicher Informationen ergänzt hat.

1.3 Der wissenschaftliche Nachweis des Klimawandels in Kürze

Wissenschaftliche Informationen aus natürlichen Quellen (z. B. Eisbohrkerne, Gesteine und Baumringe) und aus modernen Geräten (wie Satelliten und Instrumente) zeigen die Anzeichen eines sich verändernden Klimas. Dem jüngsten wissenschaftlichen Bericht des IPCC (AR6)⁵, zufolge lassen sich einige der beobachteten Anzeichen für einen Klimawandel wie folgt zusammenfassen:

1. Das Klima der Erde hat sich im Laufe der Geschichte verändert, aber die derzeitige Erwärmung findet in einem Tempo statt, das in den letzten 10.000 Jahren nicht beobachtet wurde. Jedes der letzten vier Jahrzehnte war nacheinander wärmer als jedes vorherige Jahrzehnt seit 1850. Die **global mean surface**

⁴ <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate>

⁵ IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.

temperature (globale mittlere Oberflächentemperatur - GMST) steigt an. Dabei handelt es sich um einen globalen Durchschnittswert, der die extremen Temperaturschwankungen in verschiedenen Regionen und Jahreszeiten berücksichtigt. Im Jahr 2021 war die GMST um **1,11± 0,13°C (Grad Celsius)** wärmer als die vorindustrielle Basislinie (1850-1900). Der größte Teil der Erwärmung fand in den letzten 40 Jahren statt.

Die GMST wird anhand einer Kombination aus der Lufttemperatur über Land und der Meeresoberflächentemperatur in den Ozeangebieten gemessen und in der Regel als Anomalie gegenüber einer Basisperiode ausgedrückt.

2. Die **atmosphärischen Konzentrationen von Treibhausgasen - hauptsächlich Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickstoffoxid (N₂O), Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), Ozon (O₃) und Wasserdampf (H₂O)** - spiegeln die Summe der Emissionen aus natürlichen (biogenen) und menschlichen (anthropogenen) Aktivitäten, Quellen und Senken wider. Der Anstieg der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre aufgrund menschlicher Aktivitäten ist eine der **Hauptursachen für den Klimawandel, da er die globale Temperatur erhöht**. Landökosysteme und Ozeane absorbieren etwa die Hälfte des emittierten CO₂ und wirken als Puffer (oder auch Senke) gegen einen noch stärkeren Temperaturanstieg. Es besteht jedoch die Gefahr, dass diese Senke in Zukunft weniger wirksam sein könnte.

Kohlendioxid (CO₂) ist das am häufigsten angesprochene Treibhausgas, und seine atmosphärische Konzentration wird in Teilen pro Million atmosphärischer Partikel (ppm) gemessen. **Methan (CH₄)** und **Distickstoffoxid (N₂O)** sind ebenfalls außerordentlich wichtig für das globale Klima und werden in Teilen pro Milliarde atmosphärischer Partikel (ppb) gemessen.

Derzeit beobachtete (gemessene) Konzentrationen und Zunahmen von Treibhausgasen:

- CO₂: 418,81ppm = **150% des vorindustriellen Niveaus; [Jahrtausendlang lag CO₂ nie über ~300 ppm]**
- CH₄: 1889±2 ppb = **262% des vorindustriellen Niveaus;**
- N₂O: 333,2±0,1 ppb = **123 % des vorindustriellen Niveaus.**

3. **Abnormale Niederschläge in verschiedenen Regionen.** Große Gebiete mit **überdurchschnittlichen Niederschlägen** waren in letzter Zeit Osteuropa, Südostasien, Gebiete im nördlichen Südamerika und im südöstlichen Nordamerika. Zu den Regionen mit **Niederschlagsdefiziten** gehörten dagegen Südwestasien und der Nahe Osten, Teile des südlichen Afrikas, das südliche Südamerika und das zentrale Nordamerika.

4. **Hitzeextreme** (Hitzewellen) haben in den meisten ländlichen Regionen seit den 1950er Jahren an Häufigkeit und Intensität zugenommen, während **Kälteextreme** seltener und weniger stark aufgetreten sind.

5. Es ist wahrscheinlich, dass der weltweite Anteil **schwerer tropischer Wirbelstürme** (Kategorie 3 bis 5) in den letzten vier Jahrzehnten zugenommen hat.

6. Das Eis an der Erdoberfläche umfasst **Meereis, Gletscher** und kontinentale **Eisschilde**, die zusammen etwa 2 % des Wassers auf der Erde enthalten. Die Wissenschaftler bezeichnen dieses System als **Kryosphäre**. Die globale Erwärmung führt zum **Abschmelzen der Eisschilde**. Die beiden großen **Eisschilde** in Grönland und der Antarktis verlieren seit mindestens 1990 an Eismasse, wobei der größte Verlust im letzten Jahrzehnt (2010-2019) zu verzeichnen war. Auch das **arktische Meereis nimmt ab**. Sowohl die Ausdehnung als auch die Dicke des arktischen Meereises haben in den letzten Jahrzehnten rapide abgenommen. Der Rückgang betrug im September 40 % und im März 10 %.

7. Alle Datensätze stimmen darin überein, dass die **Erwärmungsraten der Ozeane in den letzten zwei Jahrzehnten besonders stark zugenommen haben**. Seit 1969 zeigen die obersten 100 Meter der Ozeane eine Erwärmung von 0,33 Grad Celsius. Die Ozeane bedecken etwa 70 % der Erdoberfläche. Die **Ozeane spielen eine wichtige Rolle für die Erdatmosphäre und das globale Klima**. Wenn sich die Erdatmosphäre erwärmt, nimmt das Wasser in den Ozeanen Energie (Wärme) auf und verteilt sie gleichmäßiger über den Planeten, in verschiedene Teile der Welt und in die Atmosphäre, durch Bewegungen, die als Meeresströmungen bekannt sind. Außerdem nehmen die Ozeane Kohlendioxid aus der Erdatmosphäre auf. Die zusätzliche Wärme und das Kohlendioxid im Ozean können die Umwelt für die vielen Pflanzen und Tiere, die dort leben, verändern. Die obersten paar Meter der Ozeane speichern so viel Wärme wie die gesamte Erdatmosphäre. Wenn sich also der Planet erwärmt, bekommen die Ozeane den größten Teil der zusätzlichen Energie ab. Mehr als 90 % der globalen Erwärmung fließt in die Ozeane. Wärmeres Wasser dehnt sich aus und steigt nach oben. Darüber hinaus führt das zusätzliche Wasser, das durch das Abschmelzen der Eisschilde entsteht, zu einem Anstieg des Meeresspiegels, der sich auf die Küstengebiete auswirken kann. Die NASA berichtet, dass ein Kind, das heute geboren wird, mit einem Anstieg des Meeresspiegels zwischen 0,3 und 1,2 Metern rechnen muss. Im Jahr 2021 wird der **mittlere globale Meeresspiegel** einen neuen Rekordwert erreichen. Allerdings steigt der Meeresspiegel nicht überall gleich

stark an: Die regionalen Muster der Meeresspiegelveränderung werden von lokalen Veränderungen des Wärmeinhalts und des Salzgehalts der Ozeane dominiert. Die Ozeane absorbieren etwa ein Viertel des CO₂, das der Mensch durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe (Öl, Kohle und Erdgas) erzeugt. Zu viel Kohlendioxid im Ozean verursacht jedoch ein Problem, das als Ozeanversauerung bezeichnet wird und für Pflanzen und Tiere im Meer schädlich sein kann.

8. **Die Schneedecke nimmt ab.** Satellitenbeobachtungen zeigen, dass die Schneedecke in der nördlichen Hemisphäre in den letzten fünf Jahrzehnten abgenommen hat und der Schnee früher schmilzt. Es ist *so gut wie sicher*, dass die Schneedecke im 21. Jahrhundert in den meisten Landregionen abnehmen wird, und zwar in Bezug auf das Wasseräquivalent, die Ausdehnung und die jährliche Dauer.

9. Mit wenigen Ausnahmen haben sich die **Gebirgsgletscher** seit der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts zurückgezogen. Dieses Phänomen ist zumindest in den letzten 2.000 Jahren beispiellos. Der durch die globale Erwärmung bedingte frühere Beginn der Schneeschmelze im Frühjahr und das verstärkte Abschmelzen der Gletscher haben bereits zu saisonalen Veränderungen des Abflusses in niedrig gelegenen Gebirgseinzugsgebieten beigetragen.

All die oben genannten Veränderungen werden Herausforderungen für die Wasserversorgung, die Energieerzeugung, die Integrität der Ökosysteme, die land- und forstwirtschaftliche Produktion, die Katastrophenvorsorge und den Ökotourismus mit sich bringen.

Kernaussage

Der globale Temperaturanstieg hat weltweit zu **häufigeren und schwereren extremen Wetterereignissen** wie Kälte- und Hitzewellen, Überschwemmungen, Dürren, Waldbränden und Stürmen beigetragen.

Ökosysteme - einschließlich Land-, Süßwasser-, Küsten- und Meeresökosysteme - und die von ihnen erbrachten Leistungen werden durch den Klimawandel beeinträchtigt, und einige sind anfälliger als andere. Die **Ökosysteme verschlechtern sich in einem noch nie dagewesenen Tempo**, was ihre Fähigkeit, das menschliche Wohlergehen zu unterstützen, einschränkt und ihre Anpassungsfähigkeit zur Stärkung ihrer Widerstandsfähigkeit beeinträchtigt.

Nach Angaben des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) wird es in naher Zukunft mehr schwere und häufige extreme Wetterereignisse wie Überschwemmungen, Dürren, Waldbrände und Wirbelstürme geben.

1.4 Können wir den Klimawandel bekämpfen?

Briefing-Berichte der WMO informierten kürzlich die Öffentlichkeit darüber, dass die Botschaft der Wissenschaft über den Klimawandel gehört wurde und die Entscheidungsträger bestrebt sind, dieses Problem zu lösen. Die von den meisten Ländern unterzeichneten internationalen Abkommen und Protokolle zum Klimawandel zeigen den allgemeinen Konsens über die Dringlichkeit und die Bewältigung des Problems. Laut der Action Note⁶ des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP) befindet sich die Welt in einer Klimakrise. Wir befinden uns auf dem Weg zu einem Temperaturanstieg bis zum Ende dieses Jahrhunderts, der weit über den im Pariser Abkommen⁷ festgelegten Zielen von 1,5-2 °C liegt. Würden wir aufhören, Treibhausgase zu emittieren, würde die globale Durchschnittstemperatur schon nach wenigen Jahren nicht mehr steigen, sondern noch viele Jahrhunderte lang erhöht bleiben. Das liegt daran, dass die Treibhausgase viele Jahre in der Atmosphäre überleben. Es könnte jedoch noch nicht zu spät sein, die schlimmsten Auswirkungen des Klimawandels zu vermeiden oder zu verringern. Solche Maßnahmen würden Folgendes beinhalten:

1. **Abschwächung:** Verringerung der Emissionen von Treibhausgasen in die Atmosphäre
2. **Anpassung:** Bewältigung und Anpassung an den Klimawandel.

Viele Länder haben sich kohlenstoffneutrale Ziele gesetzt, um die Auswirkungen des Klimawandels einzudämmen. Die Europäische Union hat sich das Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2050 keine Treibhausgasemissionen mehr zu verursachen. Diese Ambitionen müssen jedoch in die Tat umgesetzt werden. Wir müssen die industriellen Abläufe, die Energieerzeugungs- und Verkehrssysteme sowie die gesamte Lebensweise überdenken. Wir müssen um unseres Planeten und der Zukunft der Menschheit willen handeln.

2. KLIMAVERÄNDERUNGEN IN DER GESCHICHTE UND NATÜRLICHE URSACHEN

⁶ <https://www.unep.org/explore-topics/climate-action/what-we-do/climate-action-note/climate-action-progress.html>

⁷ The Paris Agreement is an international treaty on climate change. Adopted in 2015, the agreement covers climate change mitigation, adaptation, and finance. The Paris Agreement was negotiated by 196 parties at the 2015 United Nations Climate Change Conference near Paris, France.

Das Klima der Erde hat sich im Laufe der Geschichte verändert. Allein in den letzten 800.000 Jahren gab es acht Zyklen von Eiszeiten und wärmeren Perioden, wobei das Ende der letzten Eiszeit vor etwa 11.700 Jahren den Beginn des modernen Klimazeitalters und der menschlichen Zivilisation markiert. Die meisten dieser Klimaveränderungen werden auf sehr kleine Schwankungen in der Erdumlaufbahn (bekannt als Milankovitch-Zyklen) zurückgeführt, die die Menge der Sonnenenergie, die unser Planet empfängt, verändern. Auch Schwankungen in der von der Sonne abgegebenen Strahlung, die auf der Erde ankommt, können aufgrund von Sonnenzyklen oder anderen solaren Schwankungen eine Rolle für das Klima der Erde spielen. Diese beiden Arten von natürlichen Klimaschwankungen werden im Folgenden erörtert.

2.1 Die Auswirkungen der Milankovitch-Zyklen

Es gibt drei periodische Bewegungen der Erde, die als Milankovitch-Zyklen bekannt sind und zu einem mathematisch gut vorhersagbaren Ausmaß an Schwankungen des Klimas auf dem Planeten über verschiedene Zeiträume hinweg beitragen, die von Zehntausenden bis zu Hunderttausenden von Jahren reichen. Zu den Milankovitch-Zyklen gehören die Form der Erdumlaufbahn (ihre Exzentrizität), der Winkel, um den die Erdachse gegenüber der Erdbahnebene geneigt ist (ihre Schiefe), und die Richtung, in die die Erddrehachse zeigt (ihre Präzession). Diese Zyklen beeinflussen die Menge des Sonnenlichts und damit die Energie, die die Erde von der Sonne absorbiert. Sie bieten einen soliden Rahmen für das Verständnis **langfristiger** Veränderungen des Erdklimas, einschließlich des Beginns und des Endes der Eiszeiten in der Erdgeschichte. Die drei Zyklen werden im Folgenden kurz beschrieben:

1. Die Form der Erdumlaufbahn um die Sonne, bekannt als **Exzentrizität** (100.000 Jahre Zyklen). Die jährliche Umlaufbahn der Erde um die Sonne ist nicht perfekt kreisförmig. Im Laufe der Zeit führt die Anziehungskraft der beiden größten Gasriesenplaneten unseres Sonnensystems, Jupiter und Saturn, dazu, dass sich die Form der Erdbahn von nahezu kreisförmig zu leicht elliptisch verändert. Die Exzentrizität misst, wie sehr die Form der Erdbahn von einem perfekten Kreis abweicht. Diese Abweichungen wirken sich auf den Abstand zwischen der Erde und der Sonne aus.

Wenn die Erdbahn am stärksten elliptisch ist, erreicht jedes Jahr etwa 23 Prozent mehr einfallende Sonnenstrahlung die Erde bei ihrer größten Annäherung an die Sonne als bei ihrer weitesten Entfernung von der Sonne. Gegenwärtig befindet sich die Exzentrizität der Erde in der Nähe ihrer geringsten Elliptizität (kreisförmigste Bahn) und nimmt sehr langsam ab, in einem Zyklus von etwa 100.000 Jahren. Alle ~400.000 Jahre ist diese Veränderung der Exzentrizität noch ausgeprägter.

Die Gesamtveränderung der globalen jährlichen Sonneneinstrahlung aufgrund des Exzentrizitätszyklus ist sehr gering. Da die Schwankungen der Exzentrizität der Erde recht gering sind, spielen sie bei den jährlichen saisonalen Klimaschwankungen eine relativ geringe Rolle.

2. Die Rotationsachse der Erde ist auf ihrer Reise um die Sonne geneigt, was als **Schieflage** bekannt ist (**41.000 Jahre Zyklen**). Die Schiefe ist der Grund, warum die Erde Jahreszeiten hat. In den letzten Millionen Jahren schwankte sie alle ~41.000 Jahre zwischen 22,1 und 24,5 Grad in Bezug auf die Erdbahnebene. Die Neigung der Erdachse ist auf die Verteilung der Landmasse auf dem Planeten zurückzuführen, wodurch die nördliche Hemisphäre schwerer ist. Die Neigung der Erde wirkt sich darauf aus, wie viel Sonnenstrahlung in den verschiedenen Breitengraden vom Planeten absorbiert wird. Wenn die Erdachse aufrechter steht und einen geringeren Neigungswinkel hat, erhalten die Pole weniger Sonnenstrahlung.

Je größer der Neigungswinkel der Erdachse ist, desto extremer sind unsere Jahreszeiten, da jede Hemisphäre im Sommer mehr Sonnenstrahlung erhält, wenn sie der Sonne zugewandt ist, und im Winter weniger, wenn sie von der Sonne abgewandt ist. Größere Neigungswinkel begünstigen Perioden der Deglazierung (Abschmelzen und Rückzug der Gletscher und Eisschilde). Diese Auswirkungen sind weltweit nicht einheitlich - in höheren Breitengraden ist die Veränderung der gesamten Sonneneinstrahlung größer als in Gebieten, die näher am Äquator liegen.

3. Wenn sich die Erde dreht, wackelt sie leicht um ihre Achse, was als **axiale Präzession (26.000-Jahres-Zyklen)** bezeichnet wird. Dieses Wackeln ist auf die Gezeitenkräfte zurückzuführen, die durch die Gravitationseinflüsse von Sonne und Mond verursacht werden und dazu führen, dass sich die Erde am Äquator ausbeult, was ihre Rotation beeinträchtigt. Der Zyklus der axialen Präzession erstreckt sich über etwa 26 000 Jahre..

Aber die Milankovitch-Zyklen können nicht alle Klimaveränderungen erklären, die in den letzten 2,5 Millionen Jahren oder so aufgetreten sind. Und was noch wichtiger ist: Sie können nicht die derzeitige Phase der raschen Erwärmung erklären, die die Erde seit der vorindustriellen Zeit (zwischen 1850 und 1900) und insbesondere seit Mitte des 20. Die Wissenschaftler sind sich sicher, **dass die jüngste Erwärmung der**

Erde in erster Linie auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen ist - insbesondere auf den direkten Eintrag von Kohlendioxid in die Erdatmosphäre durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe⁸.

Woher wissen wir, dass nicht die Milankovitch-Zyklen die Ursache für die derzeitigen Veränderungen sind?

Die Milankovitch-Zyklen laufen auf sehr langen Zeitskalen ab, die von Zehntausenden bis Hunderttausenden von Jahren reichen. Die derzeitige Erwärmung der Erde findet dagegen auf einer Zeitskala von Jahrzehnten bis Jahrhunderten statt. In den letzten 150 Jahren haben die Milankovitch-Zyklen die Menge der von der Erde absorbierten Sonnenenergie nicht sehr stark verändert. Satellitenbeobachtungen der NASA zeigen, dass die Sonneneinstrahlung in den letzten 40 Jahren sogar etwas abgenommen hat.

Schließlich befindet sich die Erde derzeit in einer Zwischeneiszeit (eine Periode mit milderem Klima zwischen den Eiszeiten). Gäbe es keine menschlichen Einflüsse auf das Klima, so sagen die Wissenschaftler voraus, dass sich unser Planet aufgrund der aktuellen Position der Erde in den Milankovitch-Zyklen abkühlen und nicht erwärmen sollte, womit sich ein langfristiger Abkühlungstrend fortsetzt, der vor 6.000 Jahren begann.

2.2 Die Auswirkung der Sonnenvariabilität

Die Sonne ist eine gigantische Kugel aus heißen Gasen, die mit enormer Geschwindigkeit rotiert. Die Gase der Sonne sind ständig in Bewegung. Diese Bewegung erzeugt eine Menge Aktivität auf der Sonnenoberfläche, die so genannte Sonnenaktivität, die Strahlung und damit Energie erzeugt. Manchmal ist die Oberfläche der Sonne sehr aktiv. Zu anderen Zeiten ist es etwas ruhiger. Die Menge der Sonnenstrahlung ändert sich mit den Phasen des Sonnenzyklus. Die Sonnenaktivität kann Auswirkungen auf die Erde haben, weshalb Wissenschaftler die Sonnenaktivität täglich genau beobachten.

Die Wissenschaftler verwenden eine Kennzahl namens Total Solar Irradiance (TSI), um die Veränderungen der Energie zu messen, die die Erde von der Sonne empfängt. Die TSI berücksichtigt den 11-jährigen Sonnenzyklus und die Sonneneruptionen/-stürme auf der Sonnenoberfläche. Studien zeigen, dass die Sonnenvariabilität in der Vergangenheit eine Rolle bei Klimaveränderungen gespielt hat. So trug beispielsweise ein Rückgang der Sonnenaktivität in Verbindung mit verstärkter vulkanischer Aktivität zur

⁸ <https://climate.nasa.gov/ask-nasa-climate/2949/why-milankovitch-orbital-cycles-cant-explain-earths-current-warming/>
Climatopia Handbuch zum Selbststudium Seite 15/46

Auslösung der Kleinen Eiszeit bei, einer Periode regionaler Abkühlung, die besonders in der nordatlantischen Region ausgeprägt war und vom frühen 14. bis zur Mitte des 19.

Es gibt mehrere Anhaltspunkte dafür, dass die derzeitige globale Erwärmung nicht durch Veränderungen der Sonnenenergie erklärt werden kann:

- Seit 1750 ist die durchschnittliche Energiemenge der Sonne entweder konstant geblieben oder leicht gestiegen.
- Wäre eine aktivere Sonne die Ursache für die Erwärmung, würden die Wissenschaftler wärmere Temperaturen in allen Schichten der Atmosphäre erwarten. Stattdessen haben sie eine Abkühlung in der oberen Atmosphäre und eine Erwärmung an der Oberfläche und in den unteren Teilen der Atmosphäre beobachtet. Das liegt daran, dass die Treibhausgase den Wärmeverlust aus der unteren Atmosphäre verlangsamen, weil sie die Wärme zurückhalten.
- Klimamodelle, die Änderungen der Sonneneinstrahlung berücksichtigen, können den beobachteten Temperaturtrend des letzten Jahrhunderts oder länger nicht reproduzieren, ohne einen Anstieg der Treibhausgase⁹ einzubeziehen.

2.3 Effect of volcanoes

Vulkane können das Klima beeinflussen und sich auf den Klimawandel auswirken. Bei großen explosiven Ausbrüchen werden riesige Mengen an vulkanischem Material (Gas, Aerosoltröpfchen und Asche) sehr hoch in die Atmosphäre geschleudert (bis in die Stratosphäre; die Stratosphäre ist die Atmosphärenschicht, die sich in einer Höhe von etwa 10 bis 50 km erstreckt). Die eingeblasene Asche fällt dann schnell aus der Stratosphäre auf den Boden - das meiste davon wird innerhalb weniger Tage bis Wochen abgetragen - und hat kaum Auswirkungen auf den Klimawandel. **Vulkanische Gase wie Schwefeldioxid (SO₂) können jedoch in großen Höhen verbleiben und die Lufttemperatur senken, was zu einer globalen Abkühlung führt, während vulkanisches Kohlendioxid, ein Treibhausgas, die globale Erwärmung fördern kann.**

Schwefeldioxid, das bei heutigen Vulkanausbrüchen freigesetzt wird, hat gelegentlich eine nachweisbare **globale Abkühlung der unteren Atmosphäre** verursacht, während Kohlendioxid, das bei heutigen Vulkanausbrüchen freigesetzt wird, nie eine nachweisbare globale Erwärmung der Atmosphäre verursacht hat. Zu den bemerkenswertesten Ausbrüchen des 20. Jahrhunderts, die zu einer **deutlichen**

⁹ <https://climate.nasa.gov/causes/>

Abkühlung der Atmosphäre führten, gehören die Ausbrüche des **Novarupta**¹⁰ (Alaska, 6. Juni 2012) und des **Mount Pinatubo** (Philippinen, 2. April 1991).

Es steht außer Frage, dass sehr große Vulkanausbrüche erhebliche Mengen an Kohlendioxid in die Atmosphäre einbringen können. Beim Ausbruch des Mount St. Helens im Jahr 1980 wurden in nur 9 Stunden etwa 10 Millionen Tonnen CO₂ in die Atmosphäre freigesetzt. Derzeit benötigt die Menschheit jedoch nur 2,5 Stunden, um die gleiche Menge auszustoßen. Während große explosive Eruptionen wie diese selten sind und weltweit nur etwa alle 10 Jahre auftreten, sind die Emissionen der Menschheit unaufhörlich und nehmen jedes Jahr zu.

Kernaussage

Der derzeitige Erwärmungstrend entwickelt sich mit einer Geschwindigkeit, die in den letzten Jahrtausenden nicht zu beobachten war. Eine sorgfältige Analyse von Paläoklimadaten aus Baumringen, Ozeansedimenten, Korallenriffen, Schichten von Sedimentgestein und Eiskernen (Antarktis, Grönland und Gebirgsgletscher) ergibt, dass:

- i) Das Klima reagiert auf die Veränderungen der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre
- ii) Die derzeitige Erwärmung ist etwa 10-mal schneller als die durchschnittliche Erwärmungsrate nach einer Eiszeit.
- iii) Die jährliche Anstiegsrate des atmosphärischen Kohlendioxids in den letzten 60 Jahren ist etwa 100-mal schneller als frühere natürliche Anstiege, wie z.B. am Ende der letzten Eiszeit vor 11.000-17.000 Jahren.

Es ist unbestreitbar¹¹, dass die vom Menschen emittierten Treibhausgase mehr Sonnenenergie in der Atmosphäre zurückhalten. Satelliten in der Erdumlaufbahn, Oberflächenüberwachungsnetze und neue Technologien haben es den Wissenschaftlern ermöglicht, Wissen über das System Erde aufzubauen und über viele Jahre Daten zu sammeln, die die Anzeichen und Muster eines sich verändernden Klimas aufzeigen.

Die Behauptung, dass der Klimawandel nicht stattfindet, ist angesichts der landgestützten und satellitengestützten Daten, die eindeutig den Anstieg der durchschnittlichen Meeres- und Landtemperaturen und das Schrumpfen der Eismassen weltweit belegen, nur schwer zu verteidigen.

¹⁰ <https://www.nps.gov/articles/aps-v11-i1-c12.htm>

¹¹ <https://climate.nasa.gov/faq/17/do-scientists-agree-on-climate-change/>

3. GRUNDLEGENDE INFORMATIONEN ZUM KLIMAWANDEL

In diesem Abschnitt werden einige grundlegende Informationen zum Verständnis der Begriffe Atmosphäre, Wetter, Klima, natürlicher Treibhauseffekt und durch menschliche Aktivitäten verstärkter Treibhauseffekt gegeben, um die Bedeutung des Klimawandels zu verdeutlichen.

3.1 Das Wetter im Vergleich zum Klima

Wetter bezieht sich auf atmosphärische Bedingungen, die lokal **über kurze Zeiträume** - von Minuten bis Stunden oder Tagen - auftreten. Die meisten Menschen denken bei Wetter an Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Niederschlag, Bewölkung, Helligkeit, Sichtweite, Wind und Luftdruck, wie Hoch- und Tiefdruck.

Andererseits bezieht sich der Begriff **Klima** auf die **langfristigen** (in der Regel mindestens 30 Jahre) lokalen, regionalen oder sogar globalen Durchschnittswerte von Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Niederschlagsmustern über Jahreszeiten, Jahre oder Jahrzehnte. Das Klima ist also der Durchschnitt des Wetters über Zeit und Raum. Kurz gesagt, das Klima ist die Beschreibung des langfristigen Musters des Wetters in einem bestimmten Gebiet.

Wenn Wissenschaftler von Klima sprechen, betrachten sie Durchschnittswerte für Niederschlag, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Sonnenschein, Windgeschwindigkeit, Phänomene wie Nebel, Frost und Hagelstürme und andere Wetterdaten, die über einen langen Zeitraum an einem bestimmten Ort auftreten.

Anhand von Regenschlagsdaten, Pegelständen von Seen und Stauseen sowie Satellitendaten können Wissenschaftler zum Beispiel feststellen, ob ein Gebiet im Sommer trockener war als der Durchschnitt. Bleibt es über viele Sommer hinweg trockener als normal, deutet dies wahrscheinlich auf eine Veränderung des Klimas¹² hin. Neben den langfristigen Klimaveränderungen gibt es auch kurzfristige Klimaschwankungen. Diese so genannte **Klimavariabilität** kann durch periodische oder intermittierende Veränderungen im Zusammenhang mit El Niño, La Niña, Vulkanausbrüchen oder anderen Veränderungen im Erdsystem auftreten.

Wenn wir über den Klimawandel sprechen, meinen wir Veränderungen der langfristigen Durchschnittswerte des Wetters.

¹² https://www.nasa.gov/mission_pages/noaa-n/climate/climate_weather.html
Climatopia Handbuch zum Selbststudium

3.2 Was ist der natürliche Treibhauseffekt?

Die Erdatmosphäre besteht hauptsächlich aus einem Gemisch von nur wenigen Gasen - Stickstoff, Sauerstoff und Argon; zusammengenommen machen diese drei Gase mehr als 99,5 % aller Gasmoleküle in der Atmosphäre aus. Diese Gase, die in der Atmosphäre am häufigsten vorkommen, haben so gut wie keinen Einfluss auf die Erwärmung der Erde und ihrer Atmosphäre, da sie keine sichtbare oder infrarote Strahlung absorbieren. Es gibt jedoch kleinere Gase, die nur einen kleinen Teil der Atmosphäre ausmachen (etwa 0,43 % aller Luftmoleküle, von denen der größte Teil Wasserdampf mit 0,39 % ist), die Infrarotstrahlung absorbieren. Diese "Spurengase" (sehr kleine Mengen) tragen aufgrund ihrer Eigenschaft, die von der Erde abgegebene Infrarotstrahlung zu absorbieren, wesentlich zur Erwärmung der Erdoberfläche und der Atmosphäre bei (Einzelheiten zum Treibhauseffekt siehe unten). Da diese Spurengase die Erde in gewisser Weise wie ein Treibhaus beeinflussen, werden sie als Treibhausgase (GreenHouse Gases, GHG) bezeichnet.

Erklärung des Mechanismus

Es ist bekannt, dass ein Gewächshaus das Sonnenlicht durchlässt, während es die erzeugte Wärme speichert, um die Pflanzen und die Luft im Inneren auch während der Nacht zu erwärmen. Der atmosphärische Treibhauseffekt ist dem ähnlich, doch anstelle der Glaswände und des Daches eines Gewächshauses absorbieren bestimmte atmosphärische Gase das Sonnenlicht, d. h. die Energie der Sonne, oder fangen es auf.

Genauer gesagt, gelangt etwa die Hälfte der Lichtenergie, die die Erdatmosphäre erreicht, durch die Luft und die Wolken an die Oberfläche, wo sie absorbiert und in Form von Infrarotwärme abgestrahlt wird. Der größte Teil dieser Wärme (ca. 90 %) wird von atmosphärischen Gasen absorbiert, die wir als Treibhausgase bezeichnen, und dann in alle Richtungen der Atmosphäre zurückgestrahlt, wodurch die Erde erwärmt wird. Dieser Prozess wird als natürlicher Treibhauseffekt bezeichnet und ist vorteilhaft, da er günstige Lebensbedingungen für die mikrobiellen, tierischen und pflanzlichen Bewohner der Erde aufrechterhält. Dank dieses Phänomens ist die Erde viel wärmer, als sie es ohne Atmosphäre wäre, da die Wärme nicht in den Weltraum entweichen kann¹³, wodurch die Durchschnittstemperatur der Erde bei etwa 15 Grad Celsius gehalten wird.

¹³<https://www.britannica.com/science/greenhouse-effect>

Natürlich vorkommende Treibhausgase sind Kohlendioxid, CO₂, Methan, CH₄, Distickstoffoxid, N₂O, Ozon, O₃, und Wasserdampf, H₂O

Kernaussage

Die Atmosphäre ist wichtig für die Aufrechterhaltung der Wärme an der Erdoberfläche. Ohne die natürlich vorkommenden Treibhausgase in der Atmosphäre läge die Durchschnittstemperatur der Erde bei ~ -18 Grad Celsius statt bei ~+15 Grad Celsius wie heute.

3.3 Was ist der verstärkte Treibhauseffekt?

Die seit Mitte des 20. Jahrhunderts beobachteten Veränderungen des Erdklimas sind auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen.

Menschliche Aktivitäten - insbesondere die Verbrennung fossiler Brennstoffe (Kohle, Erdöl und Erdgas), Landwirtschaft und Landrodung (z. B. Entwaldung) - erhöhen die Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre. Menschliche Aktivitäten erhöhen nicht nur, wie bereits erwähnt, die natürlich vorkommenden Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, O₃, H₂O), sondern führen auch neue chemische Verbindungen ein, die Wärme in der Atmosphäre absorbieren, wie **Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW)** ¹⁴. Die höheren Treibhausgaskonzentrationen halten mehr Wärme in der Atmosphäre zurück, sie wirken wie eine Decke, die die Erde isoliert, und führen zu einer weiteren **globalen Erwärmung**, indem sie die Durchschnittstemperatur der Erde erhöhen und damit den Treibhauseffekt verstärken.

Seit der vorindustriellen Zeit haben menschliche Aktivitäten die globale Durchschnittstemperatur der Erde schätzungsweise um etwa 1 Grad Celsius erhöht, eine Zahl, die derzeit um mehr als 0,2 Grad Celsius pro Jahrzehnt zunimmt. Der derzeitige globale Erwärmungstrend ist eindeutig das Ergebnis menschlicher Aktivitäten seit den 1950er Jahren und schreitet in einem noch nie dagewesenen Tempo über Jahrtausende hinweg voran.

3.4 Globale Erwärmung versus Klimawandel

Der Begriff "**globale Erwärmung**" ist nicht identisch mit dem Begriff "**Klimawandel**".

Die globale Erwärmung treibt den Klimawandel voran.

¹⁴ <https://www.acs.org/content/acs/en/education/whatischemistry/landmarks/cfcs-ozone.html>
Climatopia Handbuch zum Selbststudium Seite 20/46

Wärme ist Energie, und wenn einem System mehr Energie zugeführt wird, gerät es in Bewegung, was zu Veränderungen führt. Das globale Klimasystem hängt von verschiedenen Systemen bzw. Komponenten der Erde ab (Atmosphäre, Ozean, Land und Ökosysteme), die miteinander verbunden sind. Wenn also einem System bzw. einer Komponente wie der Atmosphäre Wärmeenergie zugeführt wird, verändert sich das globale Klima als Ganzes.

Die Ozeane bedecken mehr als 70 Prozent der Erdoberfläche. Die **Ozeane tauschen Wärme mit der Atmosphäre aus und heizen sich auf**. Die zunehmende Erwärmung durch die globale Erwärmung führt dazu, dass mehr Wasser verdunstet und sich Wolken bilden, die mehr und energieintensivere Stürme verursachen. Eine wärmere Atmosphäre lässt Gletscher, Eisschilde, Gebirgsschnee und die Polkappen schmelzen und den Meeresspiegel ansteigen. Außerdem verändern Temperaturschwankungen die globalen Windmuster, die z. B. den Monsun in Asien sowie Regen und Schnee auf der ganzen Welt bringen, wodurch Dürren und unvorhersehbares Wetter häufiger werden.

Aus diesem Grund haben die Wissenschaftler*innen aufgehört, sich nur auf die globale Erwärmung zu konzentrieren und konzentrieren sich jetzt auf das größere Thema des Klimawandels.

Treibhausgase: eine kurze Beschreibung

Verschiedene Treibhausgase können unterschiedliche Auswirkungen auf die Erwärmung der Erde haben. Zwei Hauptunterschiede zwischen diesen Gasen sind ihre Fähigkeit, die Wärme der Sonne (d.h. Energie) zu absorbieren (bekannt als ihre "Strahlungseffizienz"), und wie lange sie in der Atmosphäre verbleiben (bekannt als ihre "Lebensdauer"). Ein weiterer Begriff, der bei der Erörterung von Treibhausgasen häufig auftaucht, ist der des "globalen Erwärmungspotenzials".

Der Begriff **Global Warming Potential** (GWP) wurde entwickelt, um die Auswirkungen verschiedener Treibhausgase auf die globale Erwärmung vergleichen zu können.

Er gibt an, wie viel Energie die Emissionen von einer Tonne eines Treibhausgases in einem bestimmten Zeitraum im Vergleich zu den Emissionen von einer Tonne Kohlendioxid (CO₂) absorbieren.

Je größer der GWP-Wert ist, desto stärker erwärmt ein bestimmtes Treibhausgas die Erde im Vergleich zu CO₂ in diesem Zeitraum. Der übliche Zeitraum für GWPs ist 100 Jahre.

Das am häufigsten vorkommende Treibhausgas ist Kohlendioxid. Weil es so häufig vorkommt, verwenden Wissenschaftler es als Maßstab für die Erwärmung der Atmosphäre.

Die wichtigsten Treibhausgase sind:

Kohlendioxid, CO₂, ein sehr wichtiger Bestandteil der Atmosphäre, wird durch natürliche Prozesse (wie Vulkanausbrüche, Ausgasungen aus den Ozeanen, die Atmung von Tieren und Pflanzen, die Zersetzung organischer Stoffe und Waldbrände) und durch menschliche Aktivitäten immer dann freigesetzt, wenn etwas verbrannt wird (vor allem durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe wie Kohle, Erdöl und Erdgas zur Energieerzeugung). Fossile Brennstoffe wie Kohle und Öl enthalten Kohlenstoff, den Pflanzen über viele Millionen Jahre hinweg durch Photosynthese aus der Atmosphäre entnommen haben; durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe geben wir diesen Kohlenstoff in nur wenigen hundert Jahren wieder an die Atmosphäre ab. Durch menschliche Aktivitäten ist die CO₂-Menge in der Atmosphäre seit Beginn der industriellen Revolution (1750) um 50 % gestiegen. Dieser starke Anstieg des CO₂ ist der wichtigste Faktor des Klimawandels im letzten Jahrhundert. Wegen seiner Allgegenwärtigkeit wird es beispielsweise von der US-Umweltschutzbehörde als Marker verwendet. CO₂ kann lange Zeit in der Atmosphäre verbleiben, zwischen 300 und 1000 Jahren. Kohlendioxid wird ein Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP) von 1 zugewiesen.

Methan, CH₄, ein wichtiges Treibhausgas, stammt sowohl aus natürlichen als auch aus vom Menschen verursachten Quellen. Methan wird beim Abbau von Pflanzenmaterial in Feuchtgebieten, auf Mülldeponien und beim Reisanbau freigesetzt. Nutztiere emittieren Methan aus ihrer Verdauung und ihrem Dung. Leckagen aus der Produktion und dem Transport fossiler Brennstoffe sind eine weitere wichtige Methanquelle, und Erdgas besteht zu 70 bis 90 % aus Methan. Als einzelnes Molekül ist Methan ein weitaus wirksameres Treibhausgas als Kohlendioxid, kommt aber in der Atmosphäre viel seltener vor. Die Menge an Methan in unserer Atmosphäre hat sich seit der vorindustriellen Zeit mehr als verdoppelt. Methan verbleibt etwa 10 Jahre in der Atmosphäre, ist aber ein Vorläufer von Ozon (d. h., es trägt zur Bildung von Ozon bei). CH₄ hat ein GWP von 28-36.

Distickstoffoxid, N₂O, ist ein starkes Treibhausgas, das durch landwirtschaftliche Praktiken entsteht und bei der Produktion und Verwendung von kommerziellen und organischen Düngemitteln freigesetzt wird. Lachgas entsteht auch bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe und der Verbrennung von Pflanzen und hat in den letzten 100 Jahren um 18 % zugenommen. Distickstoffoxid verbleibt durchschnittlich 114 Jahre in der Atmosphäre. N₂O hat ein GWP von 265-298.

Fluorchlorkohlenwasserstoffe, FCKW, sind vom Menschen hergestellte chemische Verbindungen, die ausschließlich industriellen Ursprungs sind. Sie wurden als Kühlmittel, Lösungsmittel (eine Substanz, die andere auflöst) und als Treibmittel für Spraydosen verwendet. Ein internationales Abkommen, das so

genannte Montrealer Protokoll¹⁵, regelt nun die FCKW, weil sie die Ozonschicht schädigen. Trotzdem stiegen die Emissionen einiger FCKW-Typen aufgrund von Verstößen gegen das internationale Abkommen etwa fünf Jahre lang sprunghaft an. Nachdem die Mitglieder des Abkommens sofortige Maßnahmen und eine bessere Durchsetzung gefordert hatten, gingen die Emissionen ab 2018 deutlich zurück. FCKW können 40-150 Jahre lang in der Atmosphäre verbleiben. Die GWP-Werte für diese Gase können in die Tausende oder Zehntausende gehen.

Wasserdampf, H₂O, ist das am häufigsten vorkommende Treibhausgas, aber da die Erwärmung des Ozeans die Menge dieses Gases in unserer Atmosphäre erhöht, ist es keine direkte Ursache für den Klimawandel. Vielmehr reagiert der Wasserdampf in der Atmosphäre auf die Veränderung der globalen Temperaturen durch andere Faktoren (wie Kohlendioxid) und verstärkt den bereits stattfindenden Klimawandel. Der Wasserdampf nimmt zu, wenn sich das Klima auf der Erde erwärmt. Wolken und Niederschlag (Regen oder Schnee) reagieren ebenfalls auf Temperaturänderungen und können ebenfalls wichtige Rückkopplungsmechanismen darstellen.

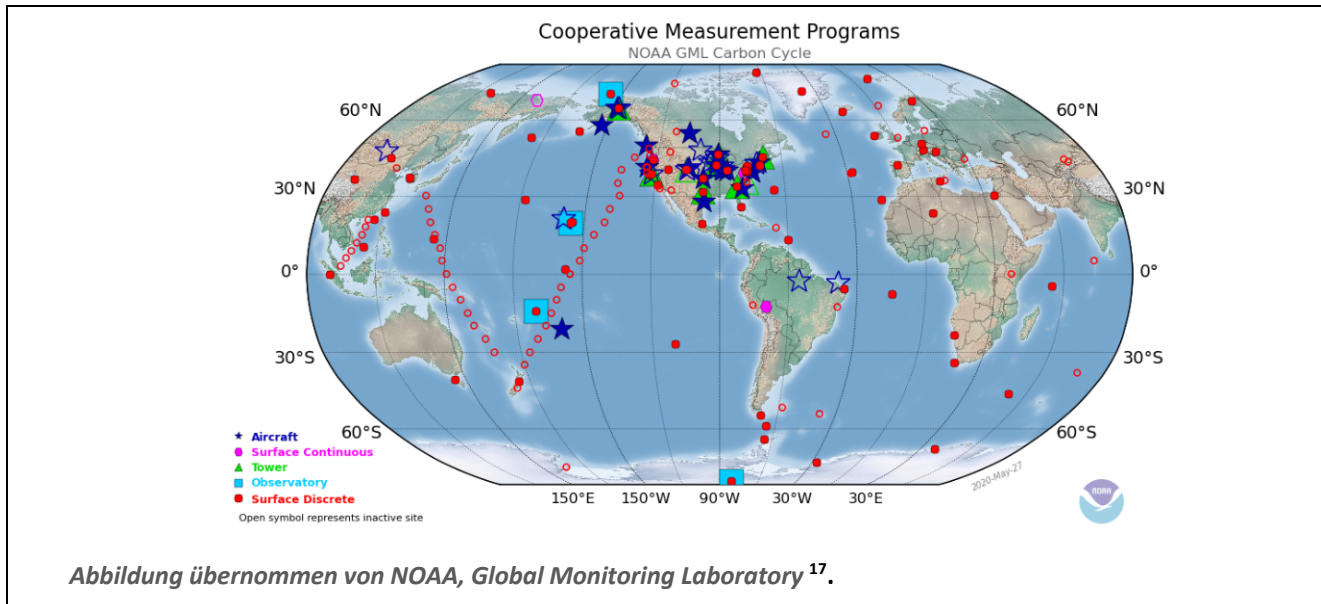
Schwarzer Kohlenstoff, BC, liegt in Form fester Partikel mit winzigem Durchmesser vor (nicht als Gas) und gilt als zweitgrößter Verursacher der globalen Erwärmung nach CO₂, da er die Sonnenwärme millionenfach effektiver absorbiert als CO₂. Es entsteht bei der unvollständigen Verbrennung von fossilen Brennstoffen und Biokraftstoffen (Industrie, Verkehr) sowie von Biomasse (Waldbrände, traditionelle Hausbrände). Nachdem er in die Atmosphäre gelangt ist, verbleibt er einige Tage und lagert sich dann an der Erdoberfläche ab. Schwarzer Kohlenstoff ist weltweit verbreitet, aber seine Präsenz und seine Auswirkungen sind in Asien besonders ausgeprägt. BC-Konzentrationen in der Luft führen auch zu vorzeitiger menschlicher Sterblichkeit und Behinderung, da sie von der Lunge in den Blutkreislauf gelangen. Die GWP-Werte von BC reichen von 1.055 bis 2.240 Jahren.

Wie messen wir Treibhausgase?

Wissenschaftler messen weltweit kontinuierlich die Treibhausgaskonzentrationen mit Hilfe eines Beobachtungssystems, das auf einer Kombination aus weltraumgestützten Beobachtungen und bodengestützten Überwachungsnetzen beruht. Die Messungen werden auf verschiedene Weise durchgeführt, mit Hilfe von Satelliten, Bodenstationen und Geräten, die auf Schiffen, Bojen und Flugzeugen

¹⁵ <https://www.unep.org/ozonaction/who-we-are/about-montreal-protocol>

(an Bord normaler Passagierflugzeuge) ¹⁶ angebracht sind. Es wurde eine Reihe von Netzen gebildet, die weltweit eine große Anzahl von Bodenstationen zur Aufzeichnung der Treibhausgaskonzentrationen umfassen. Ein Beispiel dafür ist das Globale Referenznetzwerk für Treibhausgase (Global Greenhouse Gas Reference Network), das die atmosphärische Verteilung und die Trends der drei wichtigsten langfristigen Treiber des Klimawandels, Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Distickstoffoxid (N₂O), überwacht.



Gemessen wird jedoch die Gesamtkonzentration der Gase, die von beiden Arten von Quellen - natürlichen und anthropogenen - emittiert werden. Um den anthropogenen Beitrag zum Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen so genau wie möglich zu ermitteln, bemühen sich die Wissenschaftler ständig darum, die derzeitigen Einschränkungen bei der Verfügbarkeit von Beobachtungen und Methoden zu überwinden.

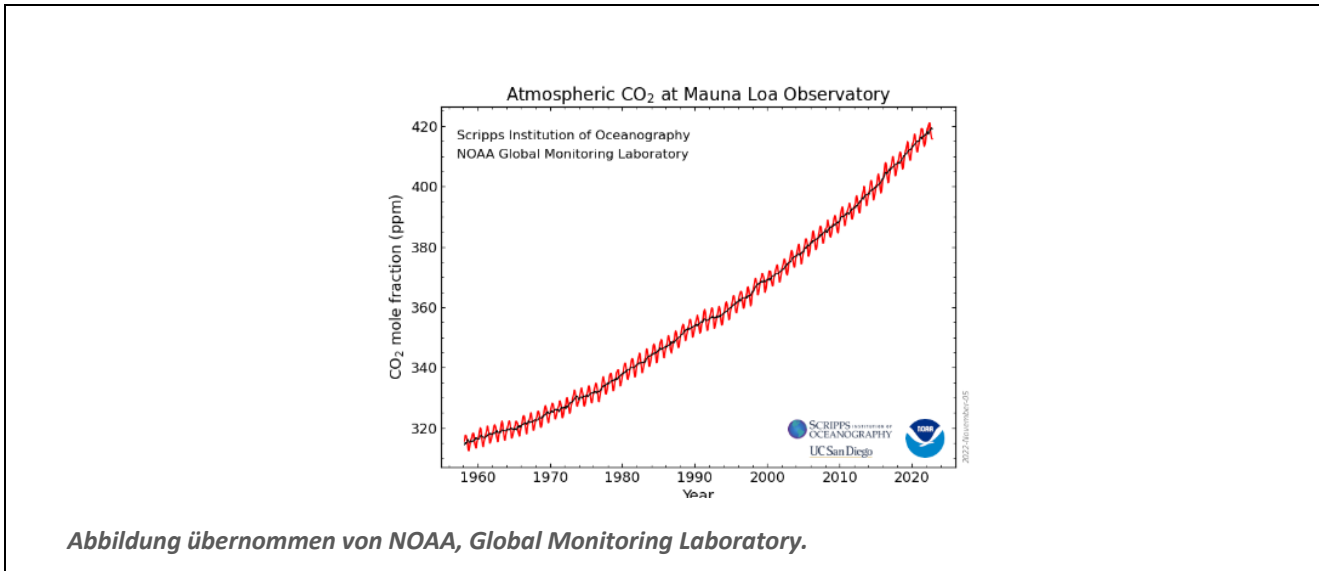
Die modernen Aufzeichnungen der atmosphärischen CO₂-Konzentrationen begannen mit Beobachtungen, die in den späten 1950er Jahren am Mauna Loa Observatory¹⁸ (in 3400 m Höhe) in Hawaii aufgezeichnet wurden. Die nachstehende Abbildung zeigt den jährlichen Anstieg der CO₂-Konzentration, wie er in Mauna Loa gemessen wurde. Die horizontale Achse zeigt den Monat der Messung und die vertikale Achse die CO₂-Konzentration. Die rote Linie zeigt die monatlichen CO₂-Mittelwerte; die Variabilität der roten Linie ist auf die Photosyntheseaktivität der Pflanzen zurückzuführen. Wenn die Pflanzen im Frühjahr und Sommer mit der Photosynthese beginnen, verbrauchen sie CO₂ aus der Atmosphäre und

¹⁶ Pinty B., P. Ciais, et al. (2019) An Operational Anthropogenic CO₂ Emissions Monitoring & Verification Support Capacity – Needs and high level requirements for in situ measurements, doi: 10.2760/182790, European Commission Joint Research Centre, EUR 29817 EN.

¹⁷ <https://gml.noaa.gov/ccgg/about.html>

¹⁸ <https://gml.noaa.gov/obop/mlo/>

verwenden es schließlich als Kohlenstoffquelle für Wachstum und Fortpflanzung. Dies verursacht den Rückgang des CO₂-Gehalts, der jedes Jahr im Mai beginnt. Sobald der Winter eintritt, sparen die Pflanzen Energie, indem sie die Photosynthese verringern. Die schwarze Linie in der Abbildung, die den Durchschnitt der roten Linie darstellt, zeigt, dass der CO₂-Gehalt immer schneller ansteigt.

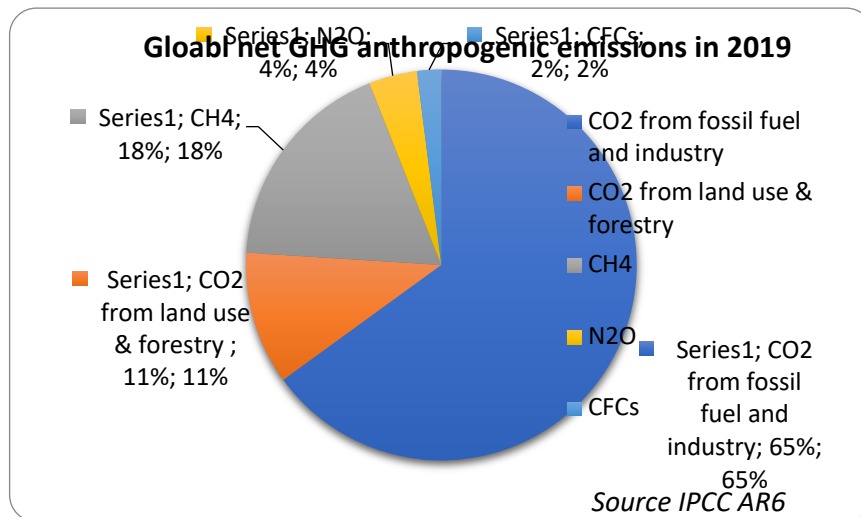


Seit Mitte des 20. Jahrhunderts sind die jährlichen Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe in jedem Jahrzehnt gestiegen, von durchschnittlich 3 Milliarden Tonnen Kohlenstoff (11 Milliarden Tonnen Kohlendioxid) pro Jahr in den 1960er Jahren auf 9,5 Milliarden Tonnen Kohlenstoff (35 Milliarden Tonnen Kohlendioxid) pro Jahr in den 2010er Jahren, so das *Global Carbon Update 2021*¹⁹.

Dem IPCC-Bericht AR6²⁰, zufolge wurden 2019 insgesamt schätzungsweise 59 Milliarden Tonnen Treibhausgase aus anthropogenen Quellen in die Atmosphäre freigesetzt, was etwa 59 % über dem Niveau von 1990 und 12 % über dem von 2010 liegt. Das nachstehende Tortendiagramm zeigt grafisch den prozentualen Anteil der einzelnen Treibhausgase an den Gesamtemissionen in die Atmosphäre durch menschliche Aktivitäten.

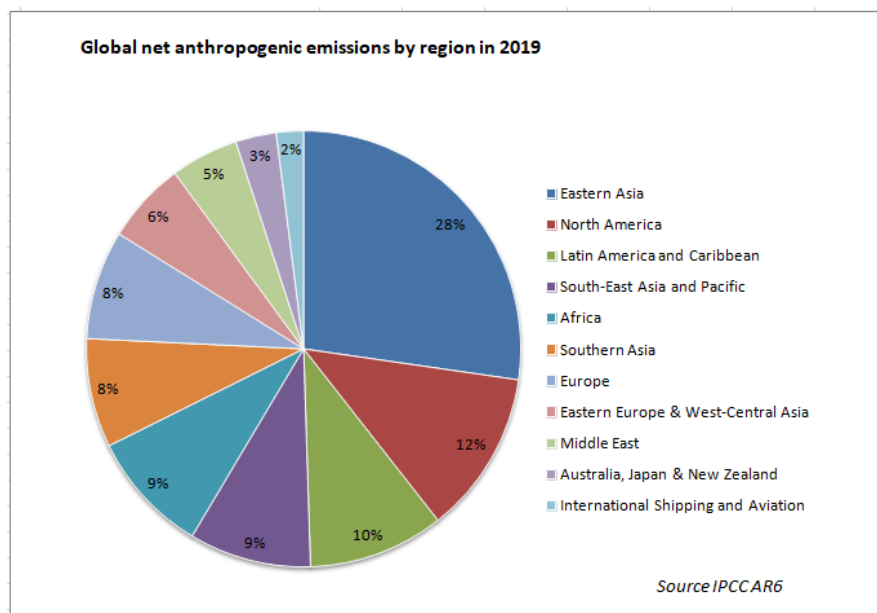
¹⁹<https://climate.esa.int/en/news-events/carbon-emissions-rebound-in-2021-new-study-finds/#:~:text=Global%20fossil%20CO2%20emissions,after%20decreasing%205.4%20%25%20in%202020.>

²⁰ https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_SPM.pdf



Tortendiagramm, das den prozentualen Anteil der einzelnen Treibhausgase an den Gesamtemissionen in die Atmosphäre durch menschliche Aktivitäten im Jahr 2019 zeigt. Quelle: IPCC AR6.

Die Treibhausgasemissionen haben in den meisten Regionen der Welt zugenommen, sind aber ungleichmäßig verteilt (siehe nachstehendes Tortendiagramm), sowohl in der Gegenwart als auch kumuliert seit 1850.



Tortendiagramm, das den prozentualen Beitrag der verschiedenen Regionen der Welt im Jahr 2019 zeigt. Quelle: IPCC AR6.

Kohlenstoff-Fußabdruck

Der Kohlenstoff-Fußabdruck ist die Gesamtmenge der Treibhausgasemissionen in die Atmosphäre, die durch die Aktivitäten einzelner Menschen, Organisationen, Staaten, Haushalte usw. entstehen, **ausgedrückt in CO₂-Äquivalenten**, für einen bestimmten Zeitraum (Monat, Jahr, Jahrzehnt usw.).

Das **CO₂-Äquivalent** ist ein eindeutiges Maß, um die Emissionen aller Treibhausgase zu vergleichen und zu addieren (die unterschiedliche Treibhauspotenziale (GWP) haben, wobei das GWP von CO₂ 1 ist).

Es gibt viele einfache Anwendungen, die zur Berechnung des CO₂-Fußabdrucks verwendet werden können. Hier ist ein Beispiel für eine Webanwendung, die auf der UN Carbon Offset Platform verfügbar ist:

<https://offset.climateutralnow.org/footprintcalc>

Der durchschnittliche Kohlenstoff-Fußabdruck einer Person in den Vereinigten Staaten beträgt 16 Tonnen und ist damit einer der höchsten der Welt. Weltweit liegt der durchschnittliche Kohlenstoff-Fußabdruck bei etwa 4 Tonnen. Um die besten Chancen zu haben, einen Anstieg der globalen Temperaturen um 2°C zu vermeiden, muss der durchschnittliche globale Kohlenstoff-Fußabdruck pro Jahr bis 2050 auf unter 2 Tonnen sinken²¹.

Wir können unseren CO₂-Fußabdruck verringern, indem wir anfangen, kleine Änderungen in unserem Alltag vorzunehmen. Wir alle benutzen Verkehrsmittel, tragen Kleidung, essen Lebensmittel und verbrauchen Strom und andere Güter des modernen Zeitalters. Die Entscheidungen, die jeder von uns trifft, können jedoch einen Unterschied machen. Einige weitere Aktivitäten sind im letzten Abschnitt beschrieben

3.5 Wie machen wir Zukunftsprognosen zum Klimawandel?

Es ist sehr wichtig zu wissen, wie sich das Klimasystem entwickeln wird, um frühzeitig Entscheidungen zur Verringerung der Treibhausgasemissionen und zur Anpassung an Veränderungen treffen zu können. Wissenschaftler gewinnen wertvolle Informationen, um den Klimamechanismus der Erde und seine Veränderungen zu verstehen, indem sie Experimente durchführen und kontinuierlich Messungen von

²¹ <https://www.nature.org/en-us/get-involved/how-to-help/carbon-footprint-calculator/>
Climatopia Handbuch zum Selbststudium Seite 27/46

Beobachtungssystemen sammeln und analysieren. Dieses Wissen wird dann mit Hilfe einer Programmiersprache in einen Computercode bzw. ein Programm, das so genannte **Klimamodell**, übersetzt, das nachahmt, wie sich die Wettermuster über lange Zeiträume verändern. In vielerlei Hinsicht ist die Klimamodellierung nur eine Erweiterung der Wettervorhersage, die sich jedoch auf Veränderungen über Monate, Jahre und Jahrzehnte und nicht über Stunden konzentriert.

Es gibt zwei Varianten von globalen Klimamodellen, die **General Circulation Models (GCM)** und das **Earth System Model (ESM)**. Ein GCM stellt im Allgemeinen die physikalischen Prozesse in der Atmosphäre, den Ozeanen und der Kryosphäre sowie die Wechselwirkungen zwischen diesen Bereichen dar, einschließlich der Veränderungen des Energieausstoßes der Sonne. ESMs stellen nicht nur die ozeanische und atmosphärische Dynamik dar, sondern enthalten auch Informationen über biogeochemische Kreisläufe in terrestrischen und marinen Ökosystemen. Daher kann ein ESM simulieren, wie sich diese Komponenten im Laufe der Zeit als Reaktion auf anthropogene Aktivitäten und veränderte Klimabedingungen verändern. Es gibt auch Klimamodelle, die nur Teile oder Regionen der Welt abdecken, so genannte regional climate models (RCM), die verwendet werden, um zu untersuchen, wie sich der Klimawandel auf Sektoren wie die Landwirtschaft, Krankheiten und bestimmte Ökosysteme auswirkt, und um Pläne zur Anpassung an den künftigen Klimawandel zu erstellen.

Wissenschaftler verwenden Klimamodelle, um das Klima in der Vergangenheit zu simulieren und um vorherzusagen, wie sich das Klima in Zukunft verändern könnte, vor allem, wenn der Mensch durch sein Handeln, z. B. durch den Eintrag von Treibhausgasen in die Atmosphäre, die Grundbedingungen auf unserem Planeten verändert. Klimamodelle stimmen bei vielen wichtigen Fakten über das beobachtete Klima überein. So zeigen die Modelle zum Beispiel zuverlässig, dass die Zugabe von mehr Treibhausgasen in die Atmosphäre zu einem Anstieg der Durchschnittstemperaturen führen wird. Die Modelle versuchen auch vorherzusagen, wie sich der Klimawandel auf die Niederschläge, den Meeresspiegel, die Eisbedeckung und andere Teile der Natur auswirken wird.

Climate models are run on massive supercomputers because they require vast computing power. Simpler forms of climate models were built in the late 1950s and over time they have increased in complexity. **A climate model will have taken hundreds of scientists of different disciplines many years to build and improve.** Yet, the Earth's climate is too complex and there is no perfect model to describe it. Just as modern weather models cannot tell us with certainty whether it will rain next week, climate models can only predict a likely range of outcomes.

Nonetheless, **climate models are a crucial tool for understanding climate change, and are continually growing more detailed and accurate.** New discoveries in climate science are improving our understanding of natural climate processes, and providing more real-world data about the Earth's climate system, which allows for more accurate simulations of complex features like clouds, the water cycle, ocean currents and interactions between the different components of the Earth. At the same time, advances in computer technology are making it possible to simulate weather and climate patterns on finer spatial and temporal scales than ever before²².

Klimamodelle werden auf riesigen Supercomputern betrieben, da sie eine enorme Rechenleistung erfordern. Einfachere Formen von Klimamodellen wurden in den späten 1950er Jahren entwickelt, und mit der Zeit wurden sie immer komplexer. **Hunderte von Wissenschaftler*innen verschiedener Fachrichtungen haben viele Jahre gebraucht, um ein Klimamodell zu erstellen und zu verbessern.** Doch das Klima der Erde ist zu komplex, und es gibt kein perfektes Modell, das es beschreiben könnte. So wie moderne Wettermodelle uns nicht mit Sicherheit sagen können, ob es nächste Woche regnen wird, können Klimamodelle nur eine wahrscheinliche Bandbreite von Ergebnissen vorhersagen.

Dennoch **sind die Klimamodelle ein wichtiges Instrument zum Verständnis des Klimawandels und werden immer detaillierter und genauer.** Neue Entdeckungen in der Klimawissenschaft verbessern unser Verständnis der natürlichen Klimaprozesse und liefern mehr reale Daten über das Klimasystem der Erde, die genauere Simulationen komplexer Merkmale wie Wolken, den Wasserkreislauf, Meeresströmungen und Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Komponenten der Erde ermöglichen. Gleichzeitig ermöglichen die Fortschritte in der Computertechnologie die Simulation von Wetter- und Klimamustern auf feineren räumlichen und zeitlichen Skalen als je zuvor²³.

Szenarien für Treibhausgasemissionen: Plausible Modelle für künftige Treibhausgasemissionen

Um die von Menschen verursachten Aktivitäten in den Klimamodellen quantitativ zu beschreiben, haben Wissenschaftler*innen Szenarien für die THG-Konzentrationen erstellt, die sich im Laufe der Zeit in Abhängigkeit von einer Reihe verschiedener Annahmen über Veränderungen der globalen und regionalen sozioökonomischen Aktivitäten verändern. Bei diesen Szenarien handelt es sich also um Schätzungen plausibler, quantitativer Entwicklungen aller Treibhausgasemissionen - so genannter repräsentativer

²² <https://climate.mit.edu/explainers/climate-models>

²³ <https://climate.mit.edu/explainers/climate-models>

Konzentrationspfade - weltweit von heute bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Diese Schätzungen beruhen auf Bevölkerungswachstum, Verstädterung, globaler Energieproduktion, Landnutzung, Handel, technologischem Fortschritt und der Weltwirtschaft²⁴.

Die aktuellsten Emissionspfade der Treibhausgaskonzentration, die vom Zwischenstaatlichen Ausschuss für Klimaänderungen (IPCC) entwickelt wurden und für die Arbeit der UN-Klimaberichte von zentraler Bedeutung sind, sind die Shared Socioeconomic Pathways (SSP). Es gibt fünf zentrale SSPs (SSP1-SSP5), die in der Forschung verwendet werden und deren Szenarien sich in ihren Annahmen über die sozioökonomische und technologische Entwicklung in den kommenden Jahrzehnten unterscheiden. **Sie zeigen, wie die Dinge ohne Klimapolitik aussehen würden, und ermöglichen es den Forschern, Hindernisse und Chancen für den Klimaschutz und die Anpassung an den Klimawandel in jeder möglichen zukünftigen Welt in Verbindung mit Klimaschutzziele²⁵ zu untersuchen.**

Weitere Einzelheiten zu den SSPs und den sich daraus ergebenden Änderungen der Emissionen und der globalen Durchschnittstemperatur finden Sie weiter unten.

■ SSP1: Nachhaltigkeit - den grünen Weg einschlagen

SSP1 bietet das positivste Szenario sowohl für die menschliche Entwicklung als auch für Umweltmaßnahmen. *Die Welt bewegt sich allmählich, aber stetig auf einen nachhaltigeren Weg zu.* Wir sehen weiterhin Verbesserungen in den Bereichen Bildung und Gesundheit in der ganzen Welt, einen starken Rückgang der Armut und eine Verringerung der globalen Ungleichheiten. In diesem Szenario gehen die Forscher davon aus, dass sich die Welt in eine wesentlich nachhaltigere Richtung bewegt.

Die Treibhausgasemissionen erreichen zwischen 2040 und 2060 ihren Höchststand - selbst wenn keine spezifischen klimapolitischen Maßnahmen ergriffen werden - und sinken bis 2100 auf etwa 22 bis 48 Gigatonnen CO₂ (GtCO₂) pro Jahr. Dies führt zu einer Erwärmung von 3 bis 3,5 °C bis 2100.

■ SSP2: Mittelweg

Die Welt folgt einem Weg, bei dem die sozialen, wirtschaftlichen und technologischen Trends nicht deutlich von den historischen Mustern abweichen. Entwicklung und Einkommenswachstum verlaufen ungleichmäßig, wobei einige Länder relativ gute Fortschritte machen, während andere hinter den

²⁴ <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>

²⁵ <https://www.carbonbrief.org/explainer-how-shared-socioeconomic-pathways-explore-future-climate-change/>

Erwartungen zurückbleiben. Globale und nationale Institutionen arbeiten auf die Erreichung der Ziele der nachhaltigen Entwicklung hin, kommen aber nur langsam voran.

Die Treibhausgasemissionen steigen bis zum Ende des Jahrhunderts weiter an und erreichen zwischen 65 GtCO₂ und 85 GtCO₂, was zu einer Erwärmung von 3,8-4,2 °C führt.

■ **SSP3: Regionale Rivalität - ein steiniger Weg**

Ein wieder auflebender Nationalismus, die Sorge um Wettbewerbsfähigkeit und Sicherheit sowie regionale Konflikte zwingen die Länder dazu, sich zunehmend auf nationale oder allenfalls regionale Fragen zu konzentrieren. Die Länder konzentrieren sich auf das Erreichen von Energie- und Ernährungssicherheitszielen in ihren eigenen Regionen auf Kosten einer breiteren Entwicklung. Die wirtschaftliche Entwicklung verläuft langsam, der Konsum ist materialintensiv, und die Ungleichheiten bleiben bestehen oder verschärfen sich im Laufe der Zeit. Das Bevölkerungswachstum ist in den Industrieländern gering und in den Entwicklungsländern hoch. Eine geringe internationale Priorität für Umweltbelange führt in einigen Regionen zu einer starken Umweltzerstörung. Ein pessimistisches Szenario.

Anstieg der Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2100 auf etwa 76-86 GtCO₂ und eine geschätzte globale Erwärmung von 3,9-4,6°C.

■ **SSP4: Ungleichheit - ein geteilter Weg**

Sehr ungleiche Investitionen in das Humankapital in Verbindung mit zunehmenden Unterschieden bei den wirtschaftlichen Möglichkeiten und der politischen Macht führen zu einer zunehmenden Ungleichheit und Schichtung sowohl zwischen als auch innerhalb von Ländern. Im Laufe der Zeit vergrößert sich die Kluft zwischen einer international vernetzten Gesellschaft, die zu den wissens- und kapitalintensiven Sektoren der Weltwirtschaft beiträgt, und einer zersplitterten Ansammlung einkommensschwacher, schlecht ausgebildeter Gesellschaften, die in einer arbeitsintensiven, technologiearmen Wirtschaft arbeiten. Die technologische Entwicklung ist in der High-Tech-Wirtschaft und in den High-Tech-Sektoren hoch. Ein pessimistisches Szenario.

Die Treibhausgasemissionen reichen von 34 GtCO₂ bis 45 GtCO₂ bis zum Jahr 2100, mit einer Erwärmung von 3,5-3,8°C.

■ **SSP5: Entwicklung mit fossilen Brennstoffen**

SSP5 ist in Bezug auf die Entwicklung ähnlich optimistisch wie SSP1, erreicht dies jedoch durch einen hohen Einsatz fossiler Brennstoffe. Dies führt daher zu anhaltend großen negativen Auswirkungen auf die Umwelt.

Die höchsten Emissionen reichen von 104 GtCO₂ bis 126 GtCO₂ im Jahr 2100, was zu einer Erwärmung von 4,7-5,1°C führt.

4. WELCHE AUSWIRKUNGEN HAT DER KLIMAWANDEL?

Die Auswirkungen des Klimawandels sind in vollem Gange und haben an Bedeutung gewonnen, da sie mit den verschiedenen Systemen der Natur und Sektoren der Gesellschaft interagieren und erhebliche Veränderungen verursachen. Nach Angaben des IPCC²⁶ lassen sich die beobachteten Auswirkungen des Klimawandels auf folgende Bereiche zusammenfassen:

1. Ökosysteme und biologische Vielfalt
2. Extreme Wetterereignisse
3. Ernährungssysteme, Ernährungssicherheit und Forstwirtschaft
4. Wassersysteme und Wassersicherheit
5. Gesundheit und Wohlbefinden
6. Migration und Vertreibung
7. Menschliche Vulnerabilität
8. Städte, Siedlungen und Infrastruktur
9. Wirtschaftlicher Schaden

Nachfolgend eine kurze Erläuterung über die oben genannten Auswirkungen.

4.1 Ökosysteme und biologische Vielfalt

Wissenschaftlichen Erkenntnissen zufolge sind die Ökosysteme auf der ganzen Welt vom Klimawandel betroffen. Die Veränderungen haben laut dem jüngsten IPCC-Bericht [19] die Meeres-, Land- und Süßwasserökosysteme verändert. Die Auswirkungen sind weiter verbreitet und haben weitreichendere Folgen als erwartet. Biodiversität ist ein Begriff, der die Vielfalt des Lebens auf der Erde in all seinen Formen bezeichnet. Die Reaktionen der biologischen Vielfalt, einschließlich Veränderungen in der Physiologie, im Wachstum, in der Abundanz, in der geografischen Verteilung und in der Verschiebung des saisonalen Rhythmus, reichen oft nicht aus, um den jüngsten Klimawandel zu bewältigen. Der Klimawandel hat zu einer Zunahme der durch Waldbrände verbrannten Flächen und zum Verlust lokaler Arten geführt, die Zahl

²⁶ https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_TechnicalSummary.pdf
Climatopia Handbuch zum Selbststudium Seite 32/46

der Krankheiten erhöht und ein Massensterben von Pflanzen und Tieren ausgelöst, das zu den ersten klimabedingten Aussterbeereignissen führte.

Die klimabedingten Auswirkungen auf die Ökosysteme²⁷ haben zu messbaren wirtschaftlichen und existenziellen Verlusten geführt und kulturelle Praktiken und Freizeitaktivitäten auf der ganzen Welt verändert.

An Land haben die höheren Temperaturen Tiere und Pflanzen dazu gezwungen, in höhere Lagen oder höhere Breitengrade zu ziehen, viele davon in Richtung der Pole der Erde, was weitreichende Folgen für die Ökosysteme hat. Das Risiko des Artensterbens steigt mit jedem Grad der Erwärmung.

In den Ozeanen erhöht der Temperaturanstieg das Risiko eines unwiderruflichen Verlusts von Meeres- und Küstenökosystemen. Die Zahl der lebenden Korallenriffe beispielsweise hat sich in den letzten 150 Jahren fast halbiert, und bei weiterer Erwärmung droht die Zerstörung fast aller noch vorhandenen Riffe.

Insgesamt **wirkt sich der Klimawandel auf die Gesundheit der Ökosysteme aus** und beeinflusst Verschiebungen in der Verteilung von Pflanzen, Viren, Tieren und sogar menschlichen Siedlungen. Dies kann die Chancen erhöhen, dass Tiere Krankheiten verbreiten und Viren auf den Menschen übergreifen. Die Gesundheit des Menschen kann auch durch den Rückgang der Ökosystemleistungen beeinträchtigt werden, z. B. durch den Verlust von Nahrungsmitteln, Medikamenten und Lebensgrundlagen, die von der Natur bereitgestellt werden.

4.2 Extreme Wetterereignisse

Vom Menschen verursachte Klimaveränderungen haben die Häufigkeit und/oder Intensität und/oder Dauer extremer Wetterereignisse wie Dürren, Waldbrände, Hitzewellen auf dem Land und im Meer, Wirbelstürme und Überschwemmungen erhöht, die weit verbreitete und schwerwiegende Verluste und Schäden für die menschliche Bevölkerung und natürliche Systeme verursachen. Extreme übersteigen die **Widerstandsfähigkeit** einiger ökologischer und menschlicher Systeme und stellen darüber hinaus die **Anpassungsfähigkeit** anderer Systeme in Frage.

Klimabedingte Extreme haben die Produktivität der Land-, Forst- und Fischereiwirtschaft beeinträchtigt. Dürren, Überschwemmungen, Waldbrände und Hitzewellen im Meer tragen zu einer geringeren Verfügbarkeit von Nahrungsmitteln und einem Anstieg der Nahrungsmittelpreise bei und bedrohen die

²⁷ https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_CCP1.pdf
Climatopia Handbuch zum Selbststudium Seite 33/46

Ernährungssicherheit, die Ernährung und die Lebensgrundlagen von Millionen von Menschen in verschiedenen Regionen.

Extreme Klimaereignisse wurden in allen bewohnten Regionen beobachtet, wobei viele Regionen noch nie dagewesene Folgen zu spüren bekamen, insbesondere wenn mehrere Gefahren zur gleichen Zeit oder im gleichen Raum auftreten. Klimabedingte Extremereignisse haben negative Auswirkungen auf die psychische Gesundheit, das Wohlbefinden, die Lebenszufriedenheit, das Glücksgefühl, die kognitive Leistungsfähigkeit und die Aggressivität der betroffenen Bevölkerung.

4.3 Ernährungssysteme, Ernährungssicherheit und Forstwirtschaft

Der Klimawandel belastet bereits die Lebensmittel- und Forstwirtschaftssysteme mit negativen Folgen für die Lebensgrundlagen, die Ernährungssicherheit und die Ernährung von Hunderten von Millionen Menschen, insbesondere in den niedrigen (äquatornahen) und mittleren Breiten der Erde. Das globale Ernährungssystem ist nicht in der Lage, Ernährungsunsicherheit und Mangelernährung auf ökologisch nachhaltige Weise zu bekämpfen.

Die Auswirkungen des Klimawandels wirken sich negativ auf die Land- und Forstwirtschaft, die Fischerei und die Aquakultur aus und behindern zunehmend die Bemühungen, den menschlichen Bedarf zu decken.

Die Erwärmung wirkt sich negativ auf die Qualität von Feldfrüchten und Grasland sowie auf die Stabilität der Ernten aus. Wärmere und trockenere Bedingungen haben in vielen gemäßigten und borealen Biomen zu einem erhöhten Baumsterben und zu Störungen in den Wäldern geführt. Die Erwärmung der Ozeane hat die nachhaltigen Erträge einiger Wildfischpopulationen zwischen 1930 und 2010 um 4,1 % verringert. Die Versauerung der Meere und die Erwärmung haben bereits Auswirkungen auf gezüchtete aquatische Arten.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Nahrungsmittelsysteme betreffen alle Menschen, aber einige Gruppen sind besonders gefährdet.

4.4 Wassersysteme und Wassersicherheit

Gegenwärtig leidet etwa die Hälfte der Weltbevölkerung mindestens einen Monat pro Jahr unter schwerwiegender Wasserknappheit, die auf klimatische und andere Faktoren zurückzuführen ist. Die Wasserunsicherheit äußert sich in klimabedingter Wasserknappheit und -gefährdung und wird durch unzureichende Wasserbewirtschaftung noch verschärft. Extreme Ereignisse und die ihnen zugrunde

liegende Anfälligkeit haben die gesellschaftlichen Auswirkungen von Dürren und Überschwemmungen verschärft, die Landwirtschaft und die Energieerzeugung beeinträchtigt und das Auftreten von durch Wasser übertragenen Krankheiten verstärkt. Die wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Auswirkungen der Wasserunsicherheit sind in Ländern mit niedrigem Einkommen stärker ausgeprägt als in Ländern mit mittlerem und hohem Einkommen.

Der Klimawandel hat den globalen Wasserkreislauf verschärft und mehrere gesellschaftliche Auswirkungen verursacht, die von den gefährdeten Menschen unverhältnismäßig stark zu spüren sind. Weltweit sind die Menschen zunehmend mit ungewohnten Niederschlagsmustern konfrontiert, einschließlich extremer Niederschlagsereignisse. Darüber hinaus schmelzen die Gletscher in einem noch nie dagewesenen Tempo, was sich negativ auf die Gesellschaft auswirkt, die auf kryosphärische Wasserressourcen angewiesen ist. Der Wandel der Kryosphäre hat Auswirkungen auf Ökosysteme, Wasserressourcen, Lebensgrundlagen und die kulturelle Nutzung von Wasser in allen von der Kryosphäre abhängigen Regionen der Welt.

Die klimabedingten Veränderungen des Wasserkreislaufs haben sich negativ auf Süßwasser- und Landökosysteme ausgewirkt. Klimatrends und Extremereignisse haben sich auf viele natürliche Systeme stark ausgewirkt. Insbesondere haben sich die klimabedingten Trends und Extreme im Wasserkreislauf positiv und negativ auf die landwirtschaftliche Produktion ausgewirkt, wobei die negativen Auswirkungen die positiven überwiegen. Dürren, Überschwemmungen und schwankende Niederschläge haben zu einer geringeren Verfügbarkeit von Nahrungsmitteln und einem Anstieg der Nahrungsmittelpreise beigetragen und bedrohen die Nahrungsmittel- und Ernährungssicherheit sowie die Lebensgrundlagen von Millionen Menschen weltweit. Dürrejahre haben die Produktion von Wärme- und Wasserkraftwerken seit den 1980er Jahren um etwa 4-5 % im Vergleich zum langfristigen Durchschnitt reduziert.

Veränderungen bei Temperatur, Niederschlag und wasserbedingten Katastrophen stehen im Zusammenhang mit dem vermehrten Auftreten von durch Wasser übertragenen Krankheiten wie Cholera, insbesondere in Regionen mit begrenztem Zugang zu sicherem Wasser, sanitären Einrichtungen und Hygieneinfrastruktur.

4.5 Gesundheit und Wohlbefinden

Der Klimawandel hat bereits die körperliche und geistige Gesundheit der Menschen beeinträchtigt. Frauen, Kinder, ältere Menschen, indigene Völker, einkommensschwache Haushalte und sozial ausgegrenzte Gruppen in Städten, Siedlungen, Regionen und Ländern sind am stärksten gefährdet. Die

beobachtete Sterblichkeit aufgrund von Überschwemmungen, Dürren und Stürmen war in den letzten zehn Jahren in den als stark gefährdet eingestuften Ländern 15 Mal höher als in den weniger gefährdeten Ländern. Die Herausforderungen für die psychische Gesundheit nehmen mit steigenden Temperaturen, Traumata im Zusammenhang mit extremen Wetterereignissen und dem Verlust von Lebensgrundlagen und Kultur zu.

Steigende Temperaturen und Hitzewellen haben die Sterblichkeit und Morbidität erhöht, wobei die Auswirkungen je nach Alter, Geschlecht, Urbanisierung und sozioökonomischen Faktoren variieren. Extreme Klimaereignisse sind die Hauptursache für die zunehmende Unterernährung von Millionen von Menschen, vor allem in Afrika und Mittelamerika. Klimabedingte Risiken für die Lebensmittelsicherheit haben weltweit zugenommen. Zu diesen Risiken gehören Salmonellen-, Campylobacter- und Cryptosporidium-Infektionen, Mykotoxine, die mit Krebs und Verkümmern bei Kindern in Verbindung gebracht werden, sowie die Verunreinigung von Meeresfrüchten mit marinen Toxinen und Krankheitserregern.

Höhere Temperaturen, starke Regenfälle und Überschwemmungen werden mit einer Zunahme von durch Wasser übertragenen Krankheiten in Verbindung gebracht, insbesondere von Durchfallerkrankungen, einschließlich Cholera und anderen Magen-Darm-Infektionen (hohes Vertrauen) in Ländern mit hohem, mittlerem und niedrigem Einkommen. Durch den Klimawandel bedingte Verschiebungen der Verbreitungsgebiete wild lebender Tiere, die Ausbeutung wild lebender Tiere und der Verlust der Qualität der Lebensräume wild lebender Tiere haben die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass sich Krankheitserreger von wild lebenden Tieren auf menschliche Populationen ausbreiten, was zu einem verstärkten Auftreten von Zoonosen (von Tieren auf Menschen übertragene Krankheiten), Epidemien und Pandemien geführt hat. Zoonosen, die in der Vergangenheit in den arktischen und subarktischen Regionen Europas, Asiens und Nordamerikas selten oder nie dokumentiert wurden, treten infolge der klimabedingten Umweltveränderungen immer häufiger auf.

Mehrere chronische, nicht übertragbare Atemwegserkrankungen sind aufgrund ihrer Expositionswege (z. B. Hitze, Kälte, Staub, kleine Partikel, Ozon, Brandrauch und Allergene) klimaempfindlich, auch wenn der Klimawandel nicht in allen Fällen die Hauptursache ist.

4.6 Migration und Vertreibung

Klimagefahren in Verbindung mit extremen Ereignissen (Dürre, tropische Stürme und Wirbelstürme, starke Regenfälle und Überschwemmungen) und Klimaschwankungen wirken als direkte Triebkräfte für

unfreiwillige Migration und Vertreibung und als indirekte Triebkräfte durch die Verschlechterung der klimabedingten Existenzgrundlagen. Die meisten klimabedingten Vertreibungen und Migrationen finden innerhalb der Landesgrenzen statt, wobei die internationalen Bewegungen hauptsächlich zwischen Ländern mit zusammenhängenden Grenzen stattfinden. Seit 2008 wurden jährlich durchschnittlich über 20 Millionen Menschen durch wetterbedingte Extremereignisse vertrieben, wobei Stürme und Überschwemmungen am häufigsten vorkommen.

Extreme Klimaereignisse sind sowohl direkte (z. B. Zerstörung von Häusern durch tropische Wirbelstürme) als auch indirekte Ursachen (z. B. Einkommensverluste in ländlichen Gebieten während lang anhaltender Dürreperioden) für unfreiwillige Migration und Vertreibung. Die größte absolute Zahl von Menschen, die jedes Jahr durch extreme Wetterereignisse vertrieben werden, findet sich in Asien (Süd-, Südost- und Ostasien), gefolgt von Afrika südlich der Sahara, aber auch kleine Inselstaaten in der Karibik und im Südpazifik sind im Verhältnis zu ihrer geringen Bevölkerungszahl unverhältnismäßig stark betroffen.

4.7 Menschliche Vulnerabilität

Die Vulnerabilität bestimmt maßgeblich, wie die Auswirkungen des Klimawandels von Gesellschaften und Gemeinschaften erlebt werden. Die Vulnerabilität für den Klimawandel ist ein mehrdimensionales, dynamisches Phänomen, das durch sich überschneidende historische und aktuelle politische, wirtschaftliche und kulturelle Prozesse der Marginalisierung geprägt ist. Gesellschaften mit einem hohen Maß an Ungleichheit sind weniger widerstandsfähig gegenüber dem Klimawandel. Etwa 3,3 Milliarden Menschen leben in Ländern mit hoher menschlicher Vulnerabilität für den Klimawandel.

Klimaschwankungen und -extreme werden mit länger andauernden Konflikten in Verbindung gebracht, die durch Preissteigerungen bei Nahrungsmitteln, Nahrungsmittel- und Wasserunsicherheit, Einkommensverluste und den Verlust von Lebensgrundlagen verursacht werden, wobei es mehr Belege für organisierte Gewalt geringer Intensität innerhalb von Ländern gibt als für größere oder internationale bewaffnete Konflikte..

1.1 Städte, Siedlungen und Infrastruktur

Städte und Siedlungen (insbesondere ungeplante und inoffizielle Siedlungen sowie in Küsten- und Bergregionen) sind weiter rasant gewachsen und bleiben als konzentrierte Orte mit erhöhter Risikoexposition und zunehmender Anfälligkeit von entscheidender Bedeutung. Seit dem letzten Jahrzehnt

sind mehr Menschen und wichtige Vermögenswerte klimabedingten Auswirkungen sowie Verlusten und Schäden in Städten, Siedlungen und wichtigen Infrastrukturen ausgesetzt. Zu diesen Auswirkungen des Klimawandels gehören der Anstieg des Meeresspiegels, Hitzewellen, Dürren, Veränderungen des Abflusses, Überschwemmungen, Waldbrände und das Auftauen des Permafrostbodens, die zu Unterbrechungen wichtiger Infrastrukturen und Dienstleistungen wie der Energieversorgung und -übertragung, der Kommunikation, der Lebensmittel- und Wasserversorgung sowie der Verkehrssysteme in und zwischen städtischen und stadtnahen Gebieten führen. Der schnellste Anstieg der städtischen Anfälligkeit und Gefährdung wurde aus Städten und Siedlungen gemeldet, in denen die Anpassungsfähigkeit begrenzt ist, einschließlich informeller Siedlungen in Gemeinden mit niedrigem und mittlerem Einkommen und in kleineren und mittleren städtischen Gemeinden.

4. 8 Wirtschaftlicher Schaden

Die Auswirkungen des Klimawandels sind in mehreren Wirtschaftssektoren zu beobachten, wobei das Ausmaß der Schäden je nach Sektor und Region variiert. Die jüngsten wetter- und klimabedingten Extremereignisse waren mit hohen Kosten durch Sach- und Infrastrukturschäden sowie Unterbrechungen der Versorgungsketten verbunden, wobei ein Großteil dieses Anstiegs auf Entwicklungsmuster zurückzuführen ist. Es wurden negative Auswirkungen extremer Wetterereignisse auf das Wirtschaftswachstum festgestellt, die vor allem in Entwicklungsländern zu spüren sind. Weit verbreitete Klimaauswirkungen haben die wirtschaftlichen Lebensgrundlagen untergraben, insbesondere bei gefährdeten Bevölkerungsgruppen. Klimaauswirkungen und prognostizierte Risiken wurden nur unzureichend in die Planungs- und Budgetierungspraktiken des privaten und öffentlichen Sektors sowie in die Anpassungsfinanzierung einbezogen.

Kernaussage

Veränderungen bei Temperaturen, Niederschlägen sowie Wetterextreme haben die Häufigkeit und Verbreitung von Krankheiten in der Tierwelt, der Landwirtschaft und beim Menschen erhöht. Die Saison für Waldbrände verlängert sich und die Zahl der verbrannten Flächen nimmt zu. Etwa die Hälfte der Weltbevölkerung leidet derzeit zu einem bestimmten Zeitpunkt im Jahr unter schwerem Wassermangel, was zum Teil auf den Klimawandel und extreme Ereignisse wie Überschwemmungen und Dürren zurückzuführen ist. Dürreperioden sind in vielen Regionen häufiger geworden, was sich negativ auf die Landwirtschaft und die Energieerzeugung aus Wasserkraftwerken auswirkt.

Menschen, die in Städten leben, sind heute einem höheren Risiko von Hitzestress, schlechterer Luftqualität aufgrund von Waldbränden, Wassermangel, Nahrungsmittelknappheit und anderen Auswirkungen ausgesetzt, die durch den Klimawandel und seine Auswirkungen auf Lieferketten, Verkehrsnetze und andere kritische Infrastrukturen verursacht werden. Weltweit führt der Klimawandel zunehmend zu Verletzungen, Krankheiten, Unterernährung, Bedrohungen der körperlichen und geistigen Gesundheit und des Wohlbefindens und sogar zu Todesfällen. Er führt dazu, dass heiße Gebiete noch heißer werden und sich die Zeit, die die Menschen im Freien verbringen können, drastisch verkürzt, was bedeutet, dass einige Arbeitnehmer, die im Freien arbeiten, nicht die erforderlichen Arbeitsstunden leisten können und daher weniger verdienen werden.

Es wird erwartet, dass sich die Auswirkungen des Klimawandels mit einer weiteren Erwärmung verstärken werden. Es ist auch erwiesen, dass sie mit zahlreichen anderen gesellschaftlichen und ökologischen Herausforderungen in Wechselwirkung stehen

5. WELCHE VERÄNDERUNGEN WERDEN FÜR DIE ZUKUNFT ERWARTET?

Nach dem jüngsten Bewertungsbericht des IPCC (AR6) werden viele Veränderungen im Klimasystem in direktem Zusammenhang mit der zunehmenden globalen Erwärmung größer. Eine Zusammenfassung der prognostizierten Veränderungen findet sich unten:

- Unter allen betrachteten Emissionsszenarien wird die globale Oberflächentemperatur mindestens bis zur Mitte des Jahrhunderts weiter ansteigen. Eine globale Erwärmung von 1,5°C und 2°C wird im Laufe des 21. Jahrhunderts überschritten werden, wenn die Treibhausgasemissionen in den kommenden Jahrzehnten nicht stark reduziert werden. Das letzte Mal, dass die globale Oberflächentemperatur 2,5°C oder mehr über dem Niveau von 1850-1900 lag, war vor über 3 Millionen Jahren.
- Genauer gesagt: Im Vergleich zu 1850-1900 wird die globale Oberflächentemperatur in den Jahren 2081-2100 in einem Szenario mit sehr geringen Treibhausgasemissionen höchstwahrscheinlich um durchschnittlich 1,0°C bis 1,8°C steigen. Bei mittleren Treibhausgasemissionen wird die Temperatur um 2,1°C bis 3,5°C ansteigen. Im Szenario mit sehr hohen Treibhausgasemissionen wird der Anstieg um etwa 3,3°C bis 5,7°C zunehmen.
- Zu den klimatischen Veränderungen gehören die Zunahme der Häufigkeit und Intensität von extremen Hitzewellen, Starkniederschlägen und in einigen Regionen landwirtschaftliche und ökologische Dürren. Auf globaler Ebene wird prognostiziert, dass die extremen täglichen Niederschlagsereignisse pro 1°C globaler Erwärmung um etwa 7% zunehmen werden.
- Es wird mit einer Zunahme intensiver tropischer Wirbelstürme und einem Rückgang des arktischen Meereises, der Schneedecke und des Permafrostes gerechnet.
- Es ist fast sicher, dass der mittlere globale Meeresspiegel im 21. Jahrhundert weiter ansteigen wird. Im Vergleich zu 1995-2014 beträgt der wahrscheinliche Anstieg des globalen mittleren Meeresspiegels bis 2100 0,28-0,55 m im Szenario mit sehr niedrigen Treibhausgasemissionen; im Szenario mit mittleren Treibhausgasemissionen 0,44-0,76 m, und bei sehr hohen Treibhausgasemissionen wird der Anstieg 0,63-1,01 m betragen.
- In den nächsten Jahren wird der mittlere globale Meeresspiegel um etwa 2 bis 3 m ansteigen, wenn die globale Erwärmung auf 1,5°C begrenzt wird. Er wird um 2 bis 6 m ansteigen, wenn er auf 2°C begrenzt wird, und um 19 bis 22 m, wenn er auf 5°C ansteigt.

- Viele Veränderungen, die auf vergangene und künftige Treibhausgasemissionen zurückzuführen sind, lassen sich über Jahrhunderte bis Jahrtausende nicht rückgängig machen - insbesondere Veränderungen der Ozeane, der Eisschilde und des globalen Meeresspiegels. Längerfristig wird der Meeresspiegel aufgrund der anhaltenden Erwärmung der Tiefsee und des Abschmelzens der Eisschilde über Jahrhunderte bis Jahrtausende hinweg ansteigen und über Tausende von Jahren hinweg erhöht bleiben.

Kernaussage

Der Klimawandel wird sich aufgrund von Überschwemmungen und Dürren auf die Wasserqualität und -verfügbarkeit für die Hygiene, die Nahrungsmittelproduktion und die Ökosysteme auswirken.

Mehrere Klimagefahren werden in Zukunft immer häufiger gleichzeitig auftreten. Sie können sich gegenseitig verstärken und zu verstärkten Auswirkungen und Risiken für Natur und Menschen führen, die komplexer und schwieriger zu bewältigen sind.

Die Auswirkungen des Klimawandels werden weiter zunehmen, wenn sich die drastische Reduzierung der Treibhausgasemissionen weiter verzögert. Aber die Wissenschaft ist auch klar: Wenn jetzt sofort gehandelt wird, können drastische Auswirkungen noch verhindert werden.

6. ANPASSUNG AN DEN KLIMAWANDEL

Die Risiken und Auswirkungen des Klimawandels können in Grenzen verringert werden, wenn sich Mensch und Natur an die veränderten Bedingungen anpassen. Umfang und Reichweite der Maßnahmen zur Verringerung der Klimarisiken (Anpassung) haben weltweit zugenommen. Einzelpersonen und Haushalte, aber auch Gemeinden, Unternehmen, religiöse Gruppen und soziale Bewegungen passen sich bereits an den Klimawandel an. Der jüngste IPCC-Bericht (AR6) stellt jedoch fest, dass es große Lücken zwischen den laufenden Bemühungen und den Anpassungsmaßnahmen gibt, die erforderlich sind, um mit der derzeitigen Erwärmung fertig zu werden, wobei das Ausmaß der Herausforderung in den verschiedenen Regionen unterschiedlich ist. In dem Bericht wird auch hervorgehoben, dass die Wirksamkeit der verfügbaren Anpassungsoptionen mit jedem weiteren Erwärmungsschritt abnimmt. Eine erfolgreiche Anpassung erfordert dringende, ehrgeizigere und beschleunigte Maßnahmen und gleichzeitig eine rasche und tiefgreifende Senkung der Treibhausgasemissionen. Je schneller und weiter die Emissionen sinken, desto mehr Spielraum bleibt für Mensch und Natur, sich anzupassen. Aus wissenschaftlicher Sicht erfordert die Begrenzung der vom Menschen verursachten globalen Erwärmung auf ein bestimmtes Niveau eine Begrenzung der kumulativen CO₂- und anderer Treibhausgasemissionen. Zumindest muss ein Netto-Null-Wert für Treibhausgasemissionen erreicht werden!

Anpassung bedeutet für Pflanzen und Tiere, sich entweder an das veränderte Klima und seine Auswirkungen anzupassen, indem sie mehr Zeit und Energie für lebenserhaltende Maßnahmen aufwenden (z. B. Regulierung der Körpertemperatur, Auswahl kühlerer Orte oder Flüssigkeitszufuhr), oder, wenn möglich, in Regionen auszuweichen, in denen die Umweltbedingungen noch in dem von den Organismen gewohnten Klimabereich liegen. Für die Menschen und die Gesellschaft bedeutet die Anpassung an den Klimawandel, dass wir unser Verhalten (z. B. die Wahl unseres Wohnortes, die Planung unserer Städte und Siedlungen) und unsere Infrastruktur (z. B. die Begrünung städtischer Gebiete zur Wasserspeicherung) an das sich verändernde Klima anpassen - heute und in Zukunft.

Eine erfolgreiche Anpassung erfordert eine Analyse der durch den Klimawandel verursachten Risiken und die rechtzeitige Umsetzung von Maßnahmen zur Verringerung dieser Risiken. Die gute Nachricht ist, dass das Bewusstsein und die Bewertung aktueller und zukünftiger Klimarisiken weltweit zugenommen haben. Nationale und lokale Regierungen, aber auch Unternehmen und die Zivilgesellschaft erkennen die wachsende Notwendigkeit der Anpassung an.

6.1 Einige Beispiele für Maßnahmen zur Bewältigung der Klimakrise

Unsere Volkswirtschaften und Gesellschaften müssen widerstandsfähiger gegen die Auswirkungen des Klimawandels werden. Dies erfordert groß angelegte Anstrengungen, von denen viele von den Regierungen orchestriert werden sollten. **Nationale Anpassungspläne**²⁸ sind ein entscheidender Steuerungsmechanismus für die Länder, um für die Zukunft zu planen und den Anpassungsbedarf strategisch zu priorisieren. Das Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) und seine Partner haben eine globale Bewegung zur Wiederherstellung der Ökosysteme der Welt im Jahr 2021 ins Leben gerufen, die **“UN Decade on Ecosystem Restoration”**²⁹. Diese globalen Wiederherstellungsbemühungen werden nicht nur Kohlenstoff absorbieren, sondern auch die "Ökosystemleistungen" erhöhen, um die Welt vor den verheerendsten Auswirkungen des Klimawandels zu schützen.

Straßen und Brücken müssen möglicherweise neu gebaut oder angepasst werden, um höheren Temperaturen und stärkeren Stürmen standzuhalten. Einige Küstenstädte müssen möglicherweise Systeme einrichten, um Überschwemmungen in Straßen und unterirdischen Verkehrswegen zu verhindern. Bergregionen müssen möglicherweise Wege finden, um Erdbeben und Überschwemmungen durch schmelzende Gletscher zu begrenzen. Die Wiederbegrünung von Berghängen schützt die Gemeinden vor klimabedingten Erdbeben und Lawinen. Einige Gemeinden müssen vielleicht sogar an neue Standorte umziehen, weil die Anpassung zu schwierig wird. Dies geschieht bereits in einigen Inselländern, die mit dem steigenden Meeresspiegel konfrontiert sind. Wissenschaftlichen Studien zufolge wird bis zum Jahr 2030 jeder zweite Mensch mit schwerem Wassermangel³⁰ konfrontiert sein. Investitionen in eine effizientere Bewässerung werden von entscheidender Bedeutung sein, da 70 % aller weltweiten Süßwasserentnahmen auf die Landwirtschaft entfallen. In den städtischen Zentren könnten bis 2030 weltweit etwa 100-120 Milliarden Kubikmeter Wasser eingespart werden, indem Leckagen reduziert werden.

In den Städten kühlt die Wiederherstellung der städtischen Wälder die Luft ab und verringert die Auswirkungen von Hitzewellen. Jeder Einzelne kann einige einfache Maßnahmen ergreifen. Man könnte zum Beispiel Bäume in der Umgebung seines Hauses pflanzen oder erhalten, um die Temperaturen im Haus kühler zu halten. An einem normalen sonnigen Tag hat ein einziger Baum einen Kühleffekt, der dem von zwei Klimaanlage entspricht, die 24 Stunden lang laufen. Die Rodung von Buschwerk kann die Brandgefahr verringern. Ein Unternehmer kann anfangen, über mögliche Klimarisiken nachzudenken und zu planen, z. B. an heißen Tagen, die seine Mitarbeiter daran hindern, im Freien zu arbeiten.

²⁸ <https://www.unep.org/explore-topics/climate-action/what-we-do/climate-adaptation/national-adaptation-plans>

²⁹ <https://www.decadeonrestoration.org/>

³⁰ <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/half-world-face-severe-water-stress-2030-unless-water-use-decoupled>

Jeder sollte sich des möglicherweise größeren Potenzials für Naturkatastrophen an seinem Wohnort bewusst sein und wissen, welche Ressourcen er im Falle eines solchen Ereignisses hat. Das kann bedeuten, dass man im Voraus eine Versicherung abschließt oder weiß, wo man Informationen über Katastrophen und Hilfe im Krisenfall erhält.

Es ist erwiesen, dass eine der wirksamsten Möglichkeiten zur Anpassung an den Klimawandel darin besteht, in Frühwarnsysteme **Early Warning Services (EWS)** zu investieren, damit wir im Voraus wissen, wann ein Sturm, ein Kälteeinbruch, eine Hitzewelle, eine Überschwemmung oder eine Trockenperiode bevorsteht. Durch die Entwicklung von Frühwarnsystemen können wir menschliche und wirtschaftliche Verluste vermeiden. Untersuchungen zeigen, dass eine Vorwarnung von nur 24 Stunden vor einer Hitzewelle oder einem Sturm die Folgeschäden um 30 %³¹ verringern kann. Frühwarnsysteme, die Klimaprognosen liefern, sind eine der kosteneffizientesten Anpassungsmaßnahmen, die für jeden investierten Dollar einen Gesamtnutzen von etwa neun Dollar erbringen.

7. ABSCHWÄCHUNG DES KLIMAWANDELS

Maßnahmen zur Verringerung der Treibhausgasemissionen und zur Verbesserung der Emissionssenkung werden als "Mitigation" bezeichnet. Viele dieser Maßnahmen beziehen sich auf die Energieeffizienz in der Bauindustrie, die Nutzung erneuerbarer Energiequellen, die nachhaltige Nutzung der Wälder, einen effizienteren Verkehr usw. Um ein lebenswertes Klima zu erhalten, müssen die Treibhausgasemissionen bis 2030 um die Hälfte und bis 2050 auf Null reduziert werden. Der Übergang zu einer kohlenstoffarmen Welt erfordert jedoch auch die Mitwirkung der Bürger - insbesondere in den fortgeschrittenen Volkswirtschaften.

Die Verringerung der Treibhausgasemissionen im gesamten Energiesektor erfordert einen grundlegenden Wandel, einschließlich einer erheblichen Verringerung des Gesamtverbrauchs an fossilen Brennstoffen, des Einsatzes emissionsarmer Energiequellen, der Umstellung auf alternative Energieträger sowie Energieeffizienz und Energieeinsparung. Elektrizitätssysteme, die überwiegend aus erneuerbaren Energien gespeist werden, werden zunehmend realisierbar³².

³¹ https://gca.org/wp-content/uploads/2019/09/GlobalCommission_Report_FINAL.pdf

³² <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>

7.1 Einzelne Aktivitäten zur Abschwächung des Klimawandels

Etwa zwei Drittel der weltweiten Treibhausgasemissionen sind auf die privaten Haushalte zurückzuführen. Der Strom, den wir verbrauchen, die Lebensmittel, die wir essen, die Art und Weise, wie wir reisen, und die Dinge, die wir kaufen, tragen alle zum "Kohlenstoff-Fußabdruck" einer Person bei, d. h. zur Menge der Treibhausgasemissionen, die mit den Aktivitäten einer Person verbunden sind.

Hier sind einige Vorschläge, was jede/r Einzelne tun kann, um die Treibhausgasemissionen zu reduzieren.

- Verringern Sie Ihren CO₂-Fußabdruck durch Autofahren. Benutzen Sie wann immer möglich das Fahrrad oder öffentliche Verkehrsmittel anstelle des Autos. Fahren Sie ein kohlenstoffarmes Fahrzeug. Elektroautos stoßen kein CO₂ aus, wenn sie mit sauberem Strom (aus erneuerbaren Quellen) aufgeladen werden.
- Nehmen Sie weniger Anschlussflüge.
- Verbrauchen Sie weniger Energie, indem Sie weniger heizen und kühlen, auf energieeffiziente Elektrogeräte umsteigen, Ihre Wäsche mit kaltem Wasser waschen oder Dinge zum Trocknen aufhängen, anstatt einen Trockner zu benutzen. Ersetzen Sie alte Glühbirnen durch moderne LED-Birnen, die weniger Energie verbrauchen, die gleiche Lichtmenge erzeugen und viel länger halten.
- Vergewissern Sie sich, dass Sie die Temperatur an den Thermostaten eines Wärmeregulierungsgeräts richtig einstellen. Schließen Sie sofort die Kühlschränktür. Verbessern Sie die Energieeffizienz Ihrer Wohnung durch eine bessere Isolierung.
- Schalten Sie Licht, Fernseher und Computer aus, wenn Sie sie nicht brauchen.
- Ziehen Sie alle Adapter und Ladegeräte aus den Steckdosen.
- Essen Sie lokal produzierte und biologische Lebensmittel. Bei der Herstellung und dem Transport von Lebensmitteln entstehen hohe Treibhausgasemissionen. Für den Transport von Lebensmitteln werden Kraftstoffe auf Erdölbasis benötigt, und viele Düngemittel basieren ebenfalls auf fossilen Brennstoffen.
- Reduzieren Sie den Konsum von Rindfleisch und Molkereiprodukten. Für die Aufzucht von Kühen werden viele Ressourcen benötigt, und besonders schlimm ist es, wenn Sie Rindfleisch aus Ländern wie Brasilien kaufen, wo es auf Flächen geweidet wurde, die früher Tropenwald waren, aber für die landwirtschaftliche Nutzung gerodet wurden. Die Abholzung der Wälder ist einer der Hauptverursacher der Kohlenstoffemissionen und damit des Klimawandels.

- Werfen Sie weniger Lebensmittel weg. Wenn Sie Lebensmittel wegwerfen, verschwenden Sie auch die Ressourcen und die Energie, die für den Anbau, die Produktion, die Verpackung und den Transport der Lebensmittel aufgewendet wurden. Und wenn Lebensmittel auf einer Mülldeponie verrotten, entsteht Methan, ein starkes Treibhausgas. Verwenden Sie also höchstens das, was Sie kaufen, und kompostieren Sie alle Reste.
- Verwenden Sie so wenig Papier wie möglich, denn so können Sie Bäume retten.
- Verwenden Sie so viel Leitungswasser wie möglich. Nehmen Sie Wasser in recycelbaren Flaschen mit. Entscheiden Sie sich beim Kauf von Duschköpfen, Wasserhähnen, Toiletten, Geschirrspülern und Waschmaschinen für wassersparende Produkte.
- Kaufen Sie Produkte, die keine stabile Verpackung benötigen.
- Pflanzen Sie einen Baum.
- Installieren Sie Sonnenkollektoren auf dem Dach, um Energie für Ihr Haus zu erzeugen.
- Unterstützen Sie saubere Energiequellen. Wann immer Sie können, setzen Sie sich für saubere Alternativen zu fossilen Brennstoffen ein, z. B. Windkraft, Solarenergie, Erdwärme und entsprechend konzipierte Wasserkraft- und Biomasse-Energieprojekte.