

Themenbereich A: Grundlagen  
Themenblock 1: Ausgewählte Umweltwirkungsbereiche

# A1.1

## KLIMAWANDEL

Ökopol – Institut für Ökologie und Politik GmbH

Autorinnen und Autoren:

Dirk Jepsen (Ökopol), Evelyn Schönheit (FÖP), Susanne Volz (Ökopol),  
Dr. Olaf Wirth (Ökopol) und Till Zimmermann (Ökopol)

# KLIMAWANDEL

## Inhalt

- 1 Einleitung
- 2 Hintergrund und Wirkmechanismen
  - 2.1 Treibhausgase
  - 2.2 Aerosole
  - 2.3 Ozeane
  - 2.4 Landnutzungsänderung
- 3 Die größten Verursacher
  - 3.1 Kohlendioxid
  - 3.2 Methan
  - 3.3 Lachgas
  - 3.4 Halogenierte Kohlenwasserstoffe
- 4 Perspektiven
- 5 Bewertung und Reduktion der Emissionen
  - 5.1 Ökobilanz und Product Carbon Footprint
  - 5.2 Emissionshandel und Kyoto-Mechanismen
  - 5.3 Kompensation von Emissionen
- 6 Fazit
- 7 Weiterführende Quellen
  - Literatur

## 1 EINLEITUNG

In den letzten Jahrzehnten hat sich unser Klima merklich verändert. Dies stellten Wissenschaftler aus aller Welt zum wiederholten Male und unmissverständlich auch im 2013 erschienenen Sachstandsbericht des zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC; vgl. [IPCC 2013b, S.2]) fest. Der IPCC analysiert, bewertet und resümiert die für den Klimawandel relevanten Forschungsergebnisse im Auftrag des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP) und der Weltorganisation für Meteorologie (WMO).

Die Klimaänderungen der vergangenen Jahrzehnte und Jahrhunderte lassen sich eindrucksvoll für Temperaturen, Niederschläge, das Auftreten extremer Niederschlagsereignisse oder Stürme, aber auch für die Höhe des Meeresspiegels, für die Temperatur und den pH-Wert der Ozeane belegen.

Auch bei der Frage, ob natürliche oder anthropogene Faktoren zu diesen Änderungen geführt haben, sind sich die Forscher einig: die beobachteten Klimaänderungen sind zum größten Teil auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen.

Die nachfolgenden Abschnitte beleuchten die Wirkmechanismen und benennen die wesentlichen Verursacher. Darüber hinaus verweisen sie auf Szenarien zur zukünftigen Treibhausgasemissions- und Klimaentwicklung. Zuletzt geben sie einen kurzen Abriss über Bewertungsinstrumente und Maßnahmen zur Emissionsminderung.

## 2 HINTERGRUND UND WIRKMECHANISMEN

Der Erde wird durch die Sonne Energie zugeführt. Auch wird wieder Energie von der Erde in den Weltraum abgegeben. Stehen die von der Sonne eingestrahlte und die wieder von der Erde abgegebene Energiemenge im Gleichgewicht, so bleibt die Temperatur (globale Mitteltemperatur) auf der Erde konstant. Herrscht ein Ungleichgewicht, so ändert sich die Temperatur. Nach einer Weile wird sich wieder ein Gleichgewicht einstellen und somit auch wieder eine konstante Temperatur.

Von der Sonne erreicht eine sehr große Energiemenge (ca.  $1360 \text{ W/m}^2$ )<sup>1</sup> die oberen Schichten der Atmosphäre. Diese Strahlung umfasst mit einer Wellenlänge von ca.  $10^{-9} - 10^{-2} \text{ m}$  auch die relativ kurzwelligeren Bereiche (vgl. Abbildung 1). Durch unterschiedliche physikalische Vorgänge in der Atmosphäre wird diese Strahlung auf ihrem Weg zur Erdoberfläche verändert. Es werden einige Anteile der Strahlung durch Gase der Atmosphäre aufgenommen (Sauerstoff, Ozon u. a.). Auch wird ein Teil durch Partikel (Ruß, Sand u. a.) oder Wolken reflektiert. Der Großteil der Strahlung trifft mit einer Wellenlänge im Bereich von ca.  $0,2 - 2 \mu\text{m}$  auf die Erdoberfläche, also auch das sichtbare Licht. Dort wird ein Teil der Strahlung wieder reflektiert. Besonders stark ist dieser Effekt auf hellen Oberflächen wie z. B. dem Eis der Antarktis.

Die verbleibende Strahlung wird vom Erdboden bzw. Ozean aufgenommen und auf diese Weise wird dieser erwärmt. Jeder warme Körper, so auch die Erde, gibt Energie in Form thermischer Infrarotstrahlung wieder ab (Wellenlängenbereich von ca.  $5 - 50 \mu\text{m}$ , vgl. Abbildung 1). In welchem Umfang an der Erdoberfläche eingehende Strahlung wieder abgestrahlt wird, hängt v. a. von der Oberflächenbeschaffenheit und somit u. a. von der Landnutzung, der Eis-/Schneefläche und den Bedingungen an der Oberfläche der Ozeane ab.

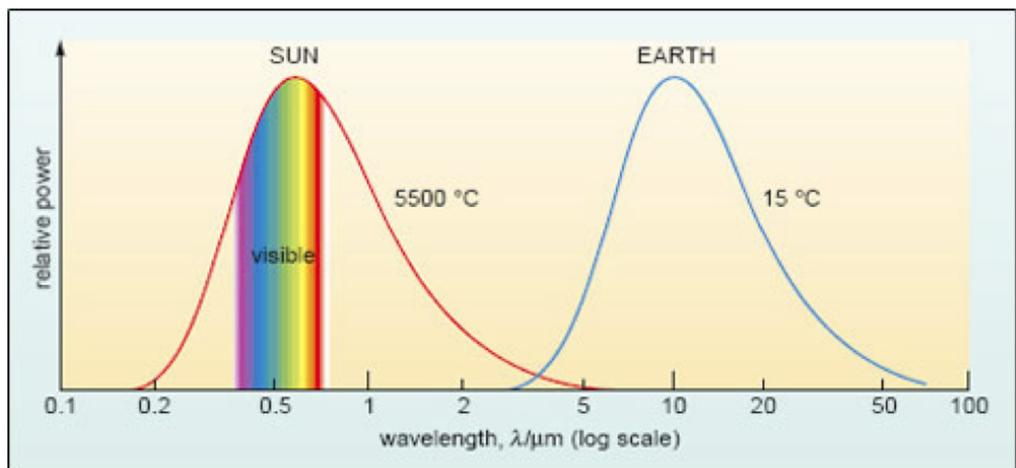


Abbildung 1: Einstrahlungsspektrum der Sonne und der Ausstrahlung der Erde  
relative power = relative Stärke; wavelength = Wellenlänge in  $\mu\text{m}$  ( $1 \mu\text{m} = 1.000 \text{ nm} = 1/1.000.000 \text{ m} = 10^{-6} \text{ m}$ ) aufgetragen auf einer logarithmischen Skala, die Temperaturen ( $5500 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ) sind die globalen Durchschnittstemperaturen der Oberfläche von Sonne und Erde, visible = sichtbar kennzeichnet das Spektrum des Sichtbaren Lichtes. Quelle: [media.kingdown.wilts.sch.uk/mod/page/view.php](http://media.kingdown.wilts.sch.uk/mod/page/view.php), zuletzt geprüft am 29.09.2014.

Diese Infrarotstrahlung trifft auf ihrem Weg in Richtung Weltraum wieder auf die Atmosphäre. Von herausragender Bedeutung für Klima und Temperatur ist, wie viel dieser abgehenden Strahlung durch die Atmosphäre hindurch ins All gelangt und wie viel wieder zurück zur Erde zurück geworfen wird. Dieser Mechanismus der Strahlung zurück auf die Erde leitet, wird Treibhauseffekt genannt. Ohne diesen wären die Temperaturen auf der Erdoberfläche deutlich niedriger. Abbildung 2 zeigt das grundlegende Schema dieses Prozesses.

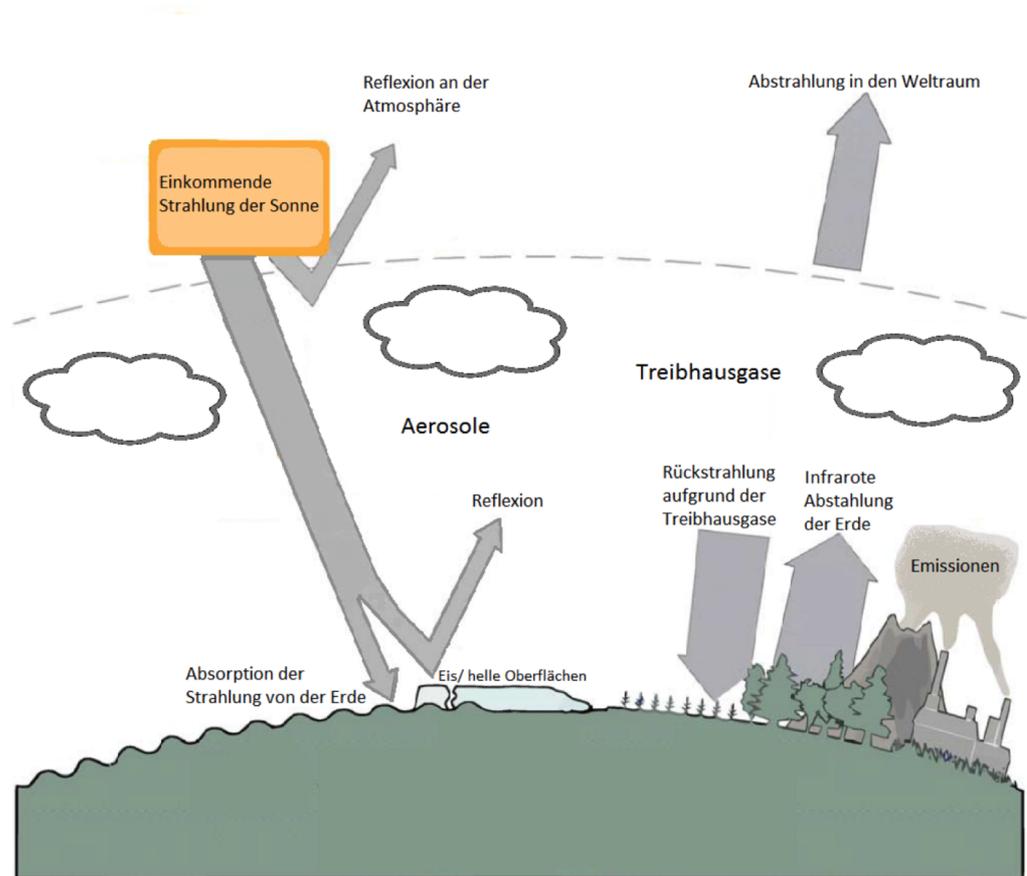


Abbildung 2: Einstrahlung der Sonne, Ausstrahlung der Erde mit der teilweisen Absorption der Infrarotstrahlung durch die Erdatmosphäre

Quelle: eigene Abbildung nach IPCC 2013b, Kapitel 1, Abbildung 1.1

Verändert sich die Zusammensetzung der Atmosphäre, so werden diese Prozesse beeinflusst. Das Gleichgewicht zwischen eingestrahelter und abgehender Strahlung – und somit die Voraussetzung für eine ausgeglichene Energiebilanz – kann hierdurch verschoben werden. Dadurch würde die globale Mitteltemperatur der Erde verändert.

Bestandteile der Atmosphäre, die einen Einfluss auf dieses Gleichgewicht haben, sind die sog. Treibhausgase (wie Kohlendioxid, Lachgas und Methan<sup>2</sup>) sowie in der Luft fein verteilte Tröpfchen oder Partikel (Aerosole).

Das Energiegleichgewicht der Erde ergibt sich aus komplexen Mechanismen, die miteinander interagieren. Mit mathematischen Modellen wird versucht, das aus den Interaktionen resultierende Klima vorher zu sagen (Klimamodelle).

Wissenschaftler geben das Potenzial eines Faktors zur Klimaänderung als sog. Strahlungsantrieb (engl. radiative forcing) an. In Abbildung 3 ist der Anteil der verschiedenen Mechanismen ablesbar. Neben den anthropogenen Anteilen ist auch die natürliche Veränderung der Sonneneinstrahlung mit angegeben. Die zugrunde liegenden Modelle berücksichtigen

den aktuellen Kenntnisstand über die Wirkmechanismen ebenso wie die beobachteten Veränderungen der jeweiligen Faktoren, etwa eine Erhöhung des Kohlendioxidgehaltes in der Luft. Je größer der Strahlungsantrieb (der Balken in der Abbildung 3) eines Mechanismus ist, umso stärker ist dieser für die Erwärmung des Klimas verantwortlich. Umgekehrt führt ein negativer Strahlungsantrieb zu einer Abkühlung des Klimas.

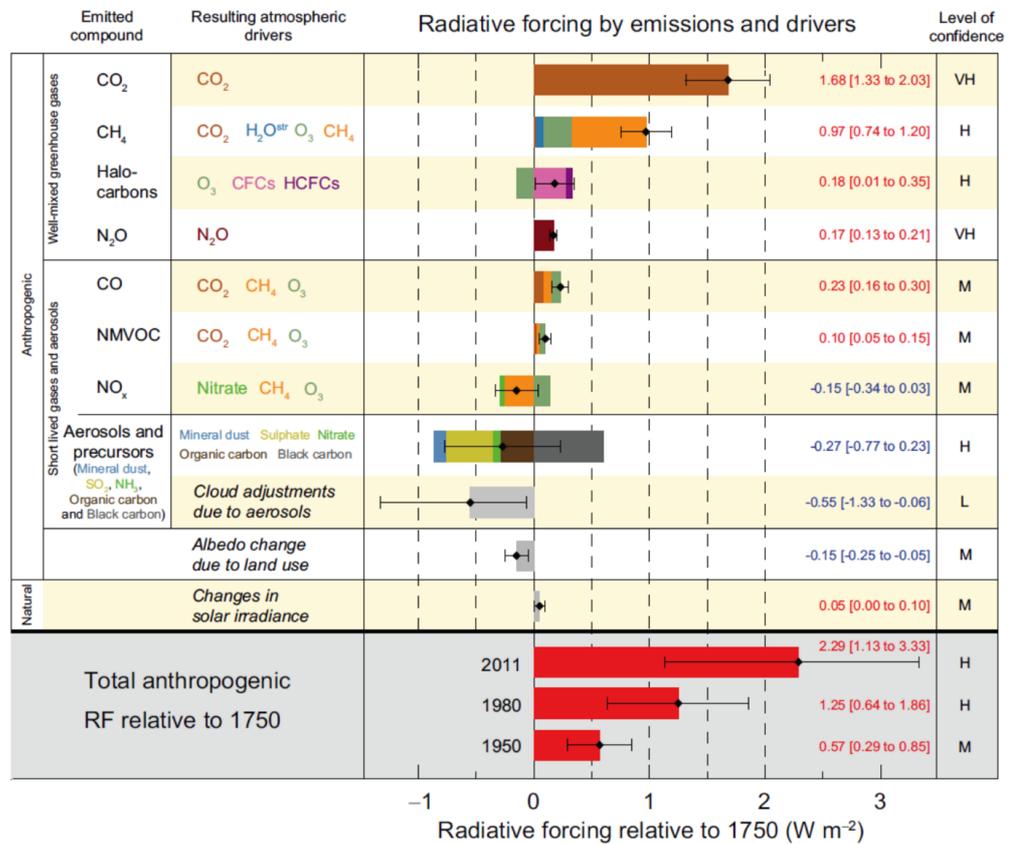


Abbildung 3: Anteile der verschiedenen Mechanismen am Strahlungsantrieb (= radiative forcing), d. h. an der Veränderung des KlimasQuelle: IPCC 2013, S.14.

Aus Abbildung 3 lassen sich somit wesentliche Erkenntnisse entnehmen. Diese betreffen erstens die Relevanz der einzelnen Faktoren. Als mit Abstand wichtigsten Faktor stellt sich das in der Atmosphäre enthaltene Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), gefolgt von der Konzentration an Methan (CH<sub>4</sub>) dar. Des Weiteren spielen halogenierte Kohlenwasserstoffe und Lachgas eine Rolle als Treibhausgase.

Zweitens stellt die Tabelle klar heraus, dass nicht etwa natürliche Prozesse, sondern anthropogene Effekte den entscheidenden Beitrag zu der beobachteten Erwärmung leisten.

Zwischen den Faktoren bestehen zum Teil recht komplexe Zusammenhänge und Rückkopplungsmechanismen. Beispielsweise führt eine Erwärmung der Erde zum Abschmelzen von Schnee und Eis der Gletscher und an den Polen. Da die so freigelegten Erd- bzw. Meeresflächen jedoch das eingestrahelte Sonnenlicht wesentlich weniger reflektieren, nimmt die Erde mehr Energie auf (Absorption), was wiederum zu einer weiteren Verstärkung der Klimaerwärmung führt. Diesen Effekt bezeichnet man als positive Rückkopplung: Eine einmal eingetretene Klimaerwärmung wird (in diesem Fall durch das Abschmelzen von Eisflächen) noch weiter verstärkt.

Im Folgenden wird auf die wichtigsten Faktoren und Wirkmechanismen und auf deren Änderungen in den letzten Jahren eingegangen werden.

<sup>1</sup> Dies ist der zuletzt (2013) vom IPCC veröffentlichte Wert, es sind auch andere Werte zu finden.

<sup>2</sup> Eine Liste mit Treibhausgasen (Stand 2007) findet sich unter [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html).

## 2.1 TREIBHAUSGASE

Einige Gase in der Atmosphäre absorbieren die von der Oberfläche der Erde ausstrahlende Infrarotstrahlung (Wärmestrahlung, vgl. Abbildung 2). Die so aufgenommene (absorbierte) Energie wird ebenfalls wieder gleichmäßig in alle Richtungen abgestrahlt, so dass ein Teil davon auch in die unteren Schichten der Erdatmosphäre und auf die Erdoberfläche gelangt. So wird die Abstrahlung in den Weltraum verlangsamt und die Temperatur der Erde liegt höher als sie ohne diesen natürlichen Treibhauseffekt wäre. Je mehr Treibhausgase sich in der Atmosphäre befinden, desto stärker wird dieser Effekt.

Der Wellenlängenbereich, in dem ein Gas Strahlung absorbiert, hängt von der jeweiligen Molekülstruktur ab und ist somit für jedes Gas unterschiedlich. Die Gase der Atmosphäre, die die passenden Eigenschaften besitzen, um den Treibhauseffekt zu bewirken, werden als Treibhausgase bezeichnet.

Die wichtigsten Treibhausgase in der Atmosphäre sind (neben Wasserdampf) Kohlendioxid, Methan, halogenierte Kohlenwasserstoffverbindungen und Lachgas. Die Klimawirksamkeit der Gase ist sehr unterschiedlich und wird über das Treibhauspotenzial (GWP, Global Warming Potential) miteinander verglichen. Definitionsgemäß dient das Treibhauspotenzial von CO<sub>2</sub> als Referenzgröße, d. h. das Treibhauspotenzial von CO<sub>2</sub> wurde auf 1 festgelegt.

Über einen Zeitraum von 100 Jahren<sup>3</sup> hat 1 kg Methan in der Atmosphäre eine 28-fache, Lachgas eine 265-fache und Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>) sogar eine 23.500-fache Treibhauswirkung im Vergleich zu 1 kg CO<sub>2</sub>. Sie haben daher GWPs von 28, 265 und 23.500. Die GWPs der Treibhausgase spiegeln den Wissensstand über die Wirkmechanismen der Klimagase wieder. In den regelmäßig erscheinenden wissenschaftlichen Berichten des IPCC finden sich entsprechende aktualisierte Listen (vgl. IPCC 2013b, Tabelle 8.A.1, S. 731).

<sup>3</sup> Diese Betrachtung der Wirkung von Treibhausgasen wird meist über den Zeitraum von 100 Jahren angegeben. Betrachtet man andere Zeiträume (z.B. 20 Jahre) ergeben sich andere Werte, da bei der Berechnung neben der Absorptionseigenschaft auch die Lebensdauer der Gase in der Atmosphäre eine Rolle spielt.

## 2.2 AEROSOLE

Als Aerosol bezeichnet man ein Gemisch aus Gas mit Schwebeteilchen. Die enthaltenen Aerosolpartikel können fest sein (wie bei Ruß oder Feinstaub), aber auch flüssig sein. So kondensieren verschiedenste Gase je nach Bedingungen zu feinen Tröpfchen.

Auf die Aerosolpartikel einfallende Strahlung wird reflektiert und absorbiert. Dies führt dazu, dass einerseits eingehende Sonnenstrahlung zurückgeworfen wird. Andererseits verhindern die Aerosolpartikel aber auch die Abstrahlung der von der Erde kommenden Wärmestrahlung. Der Einfluss der Aerosole auf das Klima ist sehr komplex und die diesbezüglichen Ergebnisse der Klimamodelle sind mit großen Unsicherheiten behaftet.

Aerosole haben verschiedene natürliche und anthropogene Quellen. Natürliche Quellen sind z. B. Vulkane, die Meeressgischt oder Winderosion. Anthropogene Quellen sind Straßenstaub, Bodenpartikel, die sich aufgrund menschlicher Eingriffe ergeben (Pflügen,

Roden usw.) und das Verbrennen von Biomasse und fossiler Energieträger.

## 2.3 OZEANE

Eine herausragende Rolle im Klimasystem spielen die Ozeane sowohl als Wärme- und  $\text{CO}_2$ -Speicher wie auch als Wärmetransportmedium. Über die großen Meeresströmungen wird Wärme in andere Regionen geleitet. Dieses Phänomen sorgt z. B. dafür, dass das Klima in Westeuropa, relativ zu seiner geographischen Breite, mild ist. Verantwortlich hierfür ist der Nordatlantikstrom, der warmes Meerwasser aus Mittelamerika (Golf-Strom) weiter leitet. Dieses Meerwasser erwärmt die darüber gelegenen Luftschichten und sorgt so für die milden Temperaturen in Nord- und Westeuropa.

Die Meeresoberfläche steht mit der Atmosphäre auch im stofflichen Austausch. Entsprechend der Lösungsfähigkeit der Gase besteht ein Gleichgewicht zwischen der Konzentration eines Gases in der Luft und der im Wasser. Somit lösen sich Gase bei Zunahme der Konzentration in der Atmosphäre und gleichbleibender Temperatur vermehrt im Wasser (vgl. Abbildung 4). Auf diese Weise puffern die Ozeane Zunahmen der  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen der Atmosphäre ab. (Ohne diese Pufferwirkung wäre der  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Luft durch die anthropogenen Emissionen deutlich stärker gestiegen). Ozeane sind somit die wichtigste  $\text{CO}_2$ -Senke.

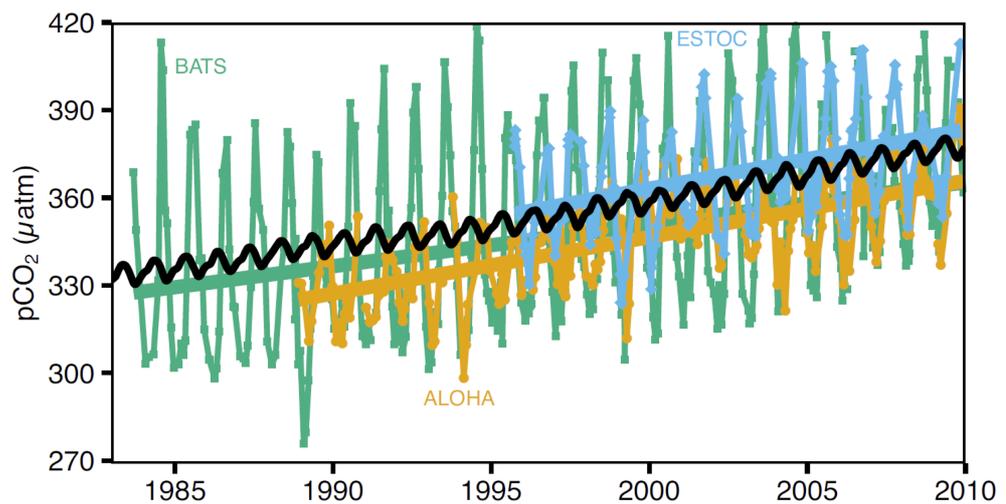


Abbildung 4: Partialdruck von  $\text{CO}_2$  im Meerwasser an drei verschiedenen Messstationen in grün, gelb und blau (BATS, ALOHA, ESTOC) und der Partialdruck in der Luft gemessen an der ALOHA Messstation (schwarz)

Quelle: IPCC 2013b, S. 310.

Das vom Meerwasser aufgenommene  $\text{CO}_2$  steht wiederum im Gleichgewicht mit Hydrogencarbonaten und Carbonaten. Bei deren Bildung werden Protonen freigesetzt, was zu einer Senkung des pH-Wertes, also einer Versauerung des Meerwassers, führt. In den letzten Jahrzehnten ist der pH-Wert der Meere kontinuierlich gesunken, d. h. die Versauerung der Meere nimmt zu.

Abbildung 5 zeigt die Messung des pH-Wertes an drei unterschiedlichen Messstationen. Trotz der jahreszeitlichen Schwankungen ist eine klare Tendenz hin zu einem niedrigeren pH-Wert zu erkennen.

Die Herabsetzung des pH-Wertes hat ungünstige Auswirkungen auf das Ökosystem Meer. Viele Meereslebewesen, wie bestimmte Planktongruppen, Muscheln, Schnecken und Korallen, benötigen für den Aufbau ihrer Stütz- und Schalenstrukturen Kalk, den sie aus dem Meerwasser gewinnen. Saures Wasser behindert die Kalkbildung und entzieht den genannten Organismen so die Lebensgrundlage.

Die Schädigung der auf Kalk angewiesenen Meeresorganismen wirkt sich auf die gesamte Nahrungskette im Meer und damit die gesamte Lebenswelt in den Ozeanen aus. Meereslebewesen bilden die Haupteisweißquelle für viele Millionen Menschen.<sup>4</sup> Eine weitere ungebremste Versauerung der Ozeane, die unter Umständen die gesamte Nahrungskette im Meer stört, hätte deshalb unvorhersehbare Folgen.<sup>5</sup>

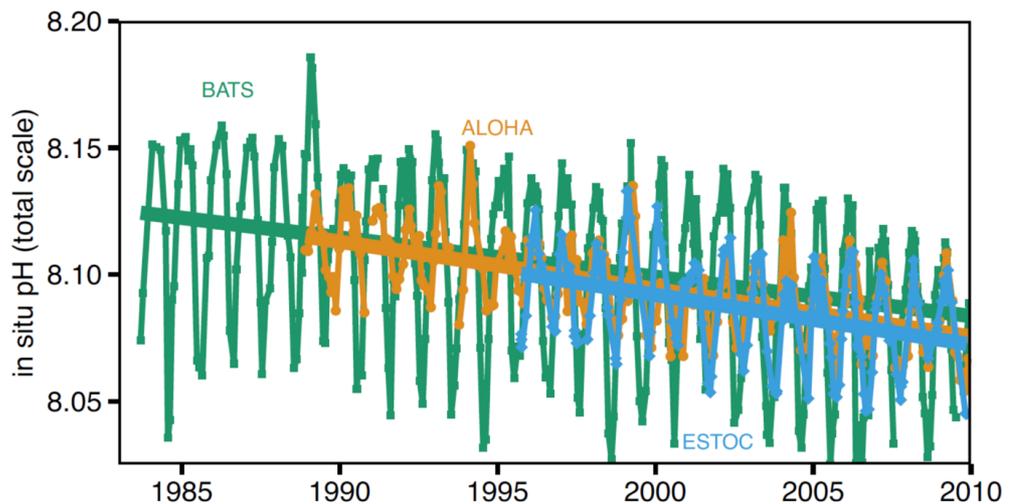


Abbildung 5: pH-Wert der Meere an drei verschiedenen Messtationen (BATS, ALOHA, ESTOC)

Quelle: IPCC 2013b, S. 310.

Die CO<sub>2</sub> Speicherkapazität der Ozeane ist temperaturabhängig: sie verringert sich mit der Erhöhung der Wassertemperatur. Durch die Klimaerwärmung kann somit weniger CO<sub>2</sub> in den Weltmeeren gespeichert werden. Dadurch steigt die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre schneller an, was den Treibhauseffekt weiter verstärkt.

Mit der Erwärmung des Klimas steigt auch der Meeresspiegel an. Denn durch die höheren Lufttemperaturen schmelzen Gletscher sowie Teile der großen Eisschilde und das Schmelzwasser fließt ins Meer ab. Vor allem aber hat das erwärmte Meerwasser eine geringere Dichte und dehnt sich dadurch aus. Der mittlere globale Meeresspiegel stieg im Zeitraum 1901 bis 2010 um etwa 19 cm an (vgl. Abbildung 6).

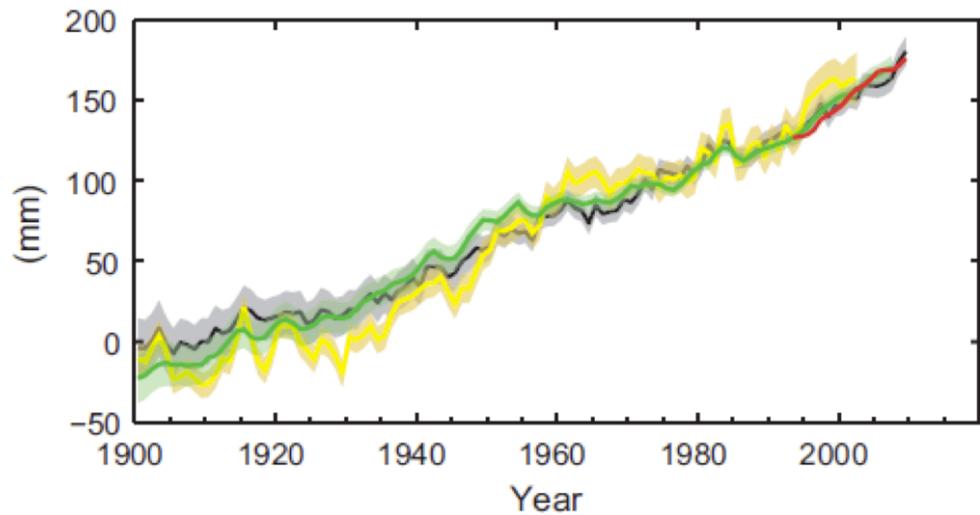


Abbildung 6: Erhöhung des mittleren globalen Meeresspiegels zwischen den Jahren 1900 und 2010

Quelle IPCC 2013, S. 8.

<sup>4</sup> FAO (2012) The state of world fisheries and aquaculture.

<sup>5</sup> <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/kipp-punkte-im-klimasystem>.

## 2.4 LANDNUTZUNGSÄNDERUNG

Der Boden ist ein großer Kohlenstoffspeicher. Etwa 80 % der terrestrischen organischen Kohlenstoffvorräte, die am aktiven Kohlenstoffkreislauf<sup>6</sup> teilnehmen, sind in Böden gebunden, ca. 20 % in der darauf befindlichen Vegetation.

Die Fähigkeit des Bodens zur Speicherung von organischem Kohlenstoff schwankt stark und ist abhängig von der Art des Bodens (Waldboden, Ackerboden, Wiesen, Moore etc.). Wird der Zustand einer Fläche verändert (gerodet, umgebrochen, bebaut usw.), so stellt sich ein neues Gleichgewicht ein. Überschüssige Mengen organischen Kohlenstoffs werden in Form von CO<sub>2</sub> oder Methan in die Umwelt entlassen. Auch kann es durch mikrobielle Prozesse zu Lachgas-Emissionen kommen.

Landnutzungsänderungen haben daher Auswirkungen auf das Klima. So führt die Umwandlung von Ackerland in Weideland oder Wald zu einer Erhöhung der Kohlenstoffspeicher und somit zur Bindung von CO<sub>2</sub>. Der Prozess benötigt jedoch viel Zeit. Die Korrektur einer sich negativ auf den Kohlenstoffspeicher auswirkenden Landnutzungsänderung ist daher zwar möglich, beispielsweise durch Aufforstung oder Brachlegen von Ackerfläche. Zielführender ist jedoch der Erhalt des bestehenden Kohlenstoffspeichervermögens durch Schutz besonders wertvoller natürlicher Flächen und durch eine bodenschonende nachhaltige Landwirtschaft.

<sup>6</sup> Kohlenstoff, der noch nicht in fossile Speicherstätten (Kohle, Erdöl, Erdgas) eingelagert ist, sondern durch biologische und physikalische Prozesse durch Luft, Wasser, Pflanzen, Tiere und Boden zirkuliert.

# 3 DIE GRÖSSTEN VERURSACHER

Es gibt eine Vielzahl von Treibhausgasen, die direkt emittiert werden und einen Einfluss auf den Treibhauseffekt und somit auf das Klima haben. Die wichtigsten Treibhausgase Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Methan ( $\text{CH}_4$ ), Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) und die halogenierten Kohlenwasserstoffe sollen im Folgenden in ihrer relativen Relevanz, ihren Konzentrationsentwicklungen und Emissionsquellen dargestellt werden.

Den drei Gasen Kohlendioxid, Methan und Lachgas ist gemeinsam, dass ihre Konzentrationen in der Atmosphäre seit der Industrialisierung stark zugenommen haben (vgl. Abbildung 7). Für die halogenierten Kohlenwasserstoffe ist das Bild differenzierter.

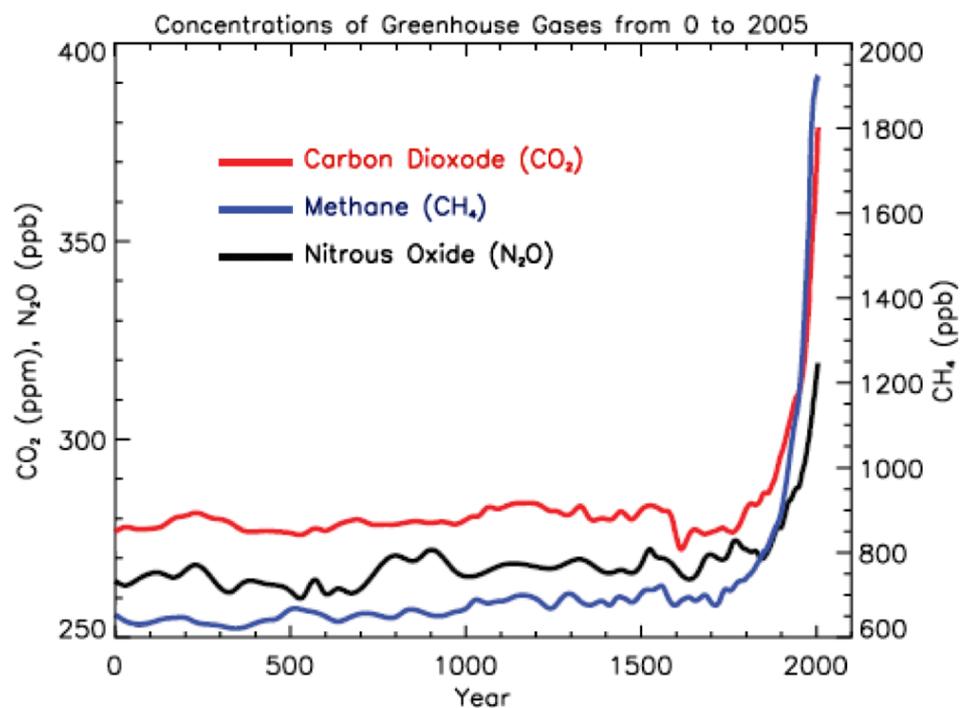


Abbildung 7: Konzentrationen der drei Treibhausgase  $\text{CO}_2$ , Methan und Lachgas (Nitrous Oxide) in den vergangenen zweitausend Jahren

Einheiten ppm = parts per million, ein Teil von 1.000.000; ppb = parts per billion, ein Teil von 1.000.000.000; Quelle: IPCC2007b, S. 135.

So hat sich im Zeitraum zwischen 1750 (Beginn der Industrialisierung) und 2011 die Konzentration von  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre von 278 ppm auf 390,5 ppm erhöht, die von Methan von 722 ppb auf 1803 ppb und die von Lachgas ist von 270 ppb auf 324 ppb gestiegen (IPCC 2013b, S. 11, 167, 168 & 467).

## 3.1 KOHLENDIOXID

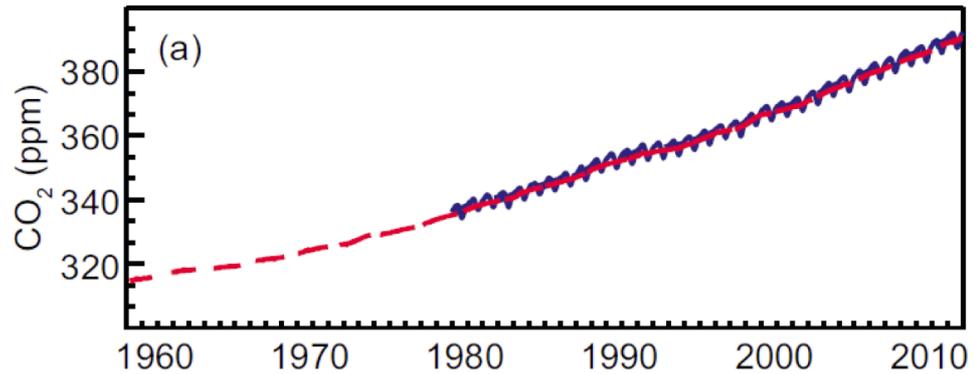


Abbildung 8: Atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentrationen im Zeitraum von 1960 und bis 2010 als Trockenluftmengenanteilen in ppm = parts per million (dt. Teile pro Millionen), rot = monatliche Messungen (Durchschnitt) auf Hawaii und am Südpol ; blau = wöchentliche Auswertung;  
Quelle: IPCC 2013b, S. 167.

Auch wenn CO<sub>2</sub> im Vergleich zu vielen anderen Gasen ein weniger starkes Treibhauspotenzial hat, ist es durch die großen in der Atmosphäre enthaltenen Mengen maßgeblich für den Treibhauseffekt verantwortlich. Die anthropogene Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration (vgl. Abbildung 8) dominiert daher die öffentliche Diskussion über den Klimawandel.

CO<sub>2</sub> entsteht insbesondere bei Verbrennungsprozessen von fossilen und biogenen Rohstoffen, wird aber auch bei Stoffwechselprozessen freigesetzt. Die fossilen und biogenen Rohstoffe enthalten Kohlenstoffverbindungen, bei deren Verstoffwechslung oder Verbrennung Energie entsteht. Vereinfacht dargestellt verbindet sich bei deren Abbau oder Verbrennung der enthaltene Kohlenstoff mit Sauerstoff unter Freisetzung von Energie.

Unter den fossilen Energieträgern verursacht die Verbrennung von Kohle die höchsten CO<sub>2</sub> Emissionen pro zur Verfügung gestellter Energiemenge: Obschon Kohle im Jahr 2011 „nur“ 28,8 % der weltweit genutzten Primärenergie lieferte, entfielen 44 % der CO<sub>2</sub> Emissionen aus der Energieerzeugung auf Kohle.<sup>7</sup>

Neben der Verbrennung fossiler Energieträger führt Landnutzungsänderung zu einer beträchtlichen anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emission. Durch Änderung der Landnutzung kann das Vermögen des Bodens, Kohlenstoff in Form von organischer Substanz zu speichern, vermindert werden. Dieser wird bei der Zersetzung in Form von CO<sub>2</sub> oder Methan frei gesetzt. Auch wird bei einer Landnutzungsänderung in der Regel die bestehende Pflanzendecke entfernt (z. B. Rodung von Regenwäldern). Diese Pflanzen werden verbrannt, verrotten vor Ort oder werden in kurzlebige Produkte eingebunden. Hierdurch entstehen ebenfalls CO<sub>2</sub> Emissionen.

<sup>7</sup> IEA 2013 Key world energy statistics.

## 3.2 METHAN

Methan entsteht durch biologische sowie geologische Prozesse. Biologisch entsteht es bei der mikrobiellen Zersetzung von Biomasse unter sauerstoffarmen (anaeroben) Bedingungen. Diese Bedingungen herrschen natürlicherweise u. a. in Mooren und Feuchtgebieten,

aber auch in Teilen der Ozeane vor.

Methan ist der wesentliche Bestandteil von Erdgas und kommt zudem assoziiert mit Öl und Kohle vor. Die Förderung, der Transport und die Nutzung von Erdgas, aber auch die Förderung von Erdöl und Kohle geht mit Verlusten von Methan an die Atmosphäre einher.

Der Mensch schafft zudem Bedingungen, unter denen Methanproduktion durch den Stoffwechsel der Mikroorganismen ablaufen kann. Dies geschieht z. B. in Biogasanlagen (Vergärung von Biomasse wie Mais, Speiseabfälle, Gülle) oder in Faultürmen (Klärschlamm). Auch Mülldeponien, in denen auch organische Substanzen eingebracht wurden, bieten Bedingungen zur Methanbildung.

Landwirtschaft und Viehzucht ist eine weitere Methanquelle. Insbesondere im Reisanbau herrschen zeitweise anaerobe Bedingungen, die zu Methanemissionen führen. Methanproduktion erfolgt natürlicherweise auch im Verdauungstrakt von Wiederkäuern.

Für Methan besteht ein positiver Rückkopplungsmechanismus: Durch die Erwärmung des Klimas taut der zuvor dauerhaft gefrorene Permafrostboden in hohen Breiten auf. Die durch die erhöhten Bodentemperaturen nun mögliche mikrobielle Zersetzung der Kohlenstoffvorräte der Permafrostböden setzt verstärkt Methan frei, das wiederum als Treibhausgas zur Erhöhung der Lufttemperatur beiträgt.

Ferner liegt Methan in sehr großer Menge auf dem Meeresgrund bei niedrigen Temperaturen und hohem Druck als sog. Methanhydrat gebunden vor. Methanhydrat ist gefrorenes Wasser, in dessen Kristallstruktur Methan eingebunden ist. Langfristig könnte sich durch die Klimaerwärmung auch das Meerwasser in großen Tiefen der Ozeane erwärmen, was zu einer Freisetzung von Methan in den Ozean und partieller Ausgasung an die Atmosphäre führen würde.

### 3.3 LACHGAS

In die Atmosphäre frei gesetztes Lachgas (Distickstoffmonoxid,  $N_2O$ ) hat sowohl natürliche als auch anthropogene Quellen.

Natürliche Quellen sind die Ozeane, feuchte Wälder, Grasland und Böden in tropischen Regionen. Hierbei bildet sich das  $N_2O$  durch biologische Umwandlungsschritte des natürlichen Stickstoffkreislaufes (Nitrifikation und Denitrifikation). Auch entsteht  $N_2O$  durch Blitzeinschlag.

Anthropogene Quellen sind die Landwirtschaft, Verbrennungsprozesse (Kraftwerke & Fahrzeuge) und chemischen Synthesen. Bei der Herstellung von Kunstdünger wird nicht reaktiver Luftstickstoff in eine reaktive Stickstoffverbindung umgewandelt. Im Laufe der Umsetzungsprozesse in der Landwirtschaft (im Boden, bei der Tierhaltung, Ausbringung von Wirtschaftsdünger) entsteht daraus dann u. a. Lachgas. Chemische Synthesen, bei denen in denen  $N_2O$  als Nebenprodukt auftritt, sind die Herstellung von Salpeter- und Adipinsäure.

### 3.4 HALOGENIERTE KOHLENWASSERSTOFFE

Kohlenwasserstoffe, bei denen ein oder mehrere Wasserstoffatome eines Kohlenwasserstoffes durch ein Halogenatom (Fluor, Chlor, Brom, Iod) ersetzt ist, bilden die Gruppe der halogenierten Kohlenwasserstoffe.

Halogenierte Kohlenwasserstoffe werden als Industriechemikalien für die verschiedensten Anwendungen benötigt (z. B. als Lösemittel, Kältemittel, Isolationsmittel). In den 1980er Jahren zeigte sich eine ozonschädigende Wirkung der bis dahin viel eingesetzten Chlorfluorkohlenwasserstoffe (CFKW). Als Ersatzstoffe kamen zunächst Fluorchlorkohlenwasserstoffe (H-FCKW) und zunehmend Fluorkohlenwasserstoffe (FKW) zum Einsatz. Auch wenn diese Ersatzstoffe die Ozonschicht weniger oder gar nicht schädigen, zeichnen sie sich durch z. T. sehr großes Treibhauspotenzial aus.<sup>8</sup>

<sup>8</sup> Dies gilt insbesondere für die derzeit noch viel verwendeten Fluorkohlenwasserstoffe. Folgerichtig ist die Diskussion um die ozonschädigende Wirkung von Chemikalien mit der Wirkung als Treibhausgas zu verknüpfen.

## 4 PERSPEKTIVEN

Eine weitere Erwärmung der Erde scheint unausweichlich. Wie stark diese ausfallen wird, hängt jedoch davon ab, ob und in welchem Maße es der Menschheit gelingt, die Emissionen von Treibhausgasen zu reduzieren. Szenarien des IPCC zeigen, dass selbst bei massiver Förderung nicht-fossiler Energieträger angesichts steigender Weltbevölkerung und ökonomischer Entwicklungen die Treibhausgasemissionen noch bis zur Mitte des Jahrhunderts steigen werden, dann aber absinken (AR4, Figure 3.1).<sup>9</sup>

Der Bericht des IPCC illustriert in aller Deutlichkeit, welche alarmierende Folgen die weitere Emission von Treibhausgasen voraussichtlich hat. So ist mit Erderwärmungen, Änderung der Niederschlagsmengen, Erhöhung der Meeresspiegel und vielen weiteren deutlichen Klimaänderungen zu rechnen. Er quantifiziert die absehbaren Folgen der Emissionen und legt so offen, dass die Menschheit Gefahr läuft, sich durch die anthropogen ausgelöste Klimaänderung ihre Lebensgrundlage zu entziehen.

<sup>9</sup> Gelingt die Umstellung auf erneuerbare Energiequellen nicht, lägen die Emissionen auch am Ende des Jahrhunderts noch über denen zu Beginn des Jahrhunderts.

# 5 BEWERTUNG UND REDUKTION DER EMISSIONEN

## 5.1 ÖKOBILANZ UND PRODUCT CARBON FOOTPRINT

Wie oben erläutert, stehen wirtschaftliche Prozesse wie die Herstellung von Produkten, Transporte oder Verbrauch an Elektrizität in direktem oder indirektem Zusammenhang mit Faktoren der Klimaänderung, insbesondere mit der Emission von Treibhausgasen. Eine der grundlegenden Bemühungen der ökologischen Produktgestaltung ist die Verringerung u. a. dieser Emissionen im Verlauf des Produktlebensweges. Die strukturelle quantitative Erfassung der relevanten Emissionsquellen sowie deren Bewertung zeigen Optimierungsoptionen auf. Als Bewertungsinstrumente dafür bieten sich beispielsweise die Ökobilanz oder der *Product Carbon Footprint* an.

In der ökobilanziellen Analyse wird die Einwirkung anthropogen verursachter Emissionen auf das Klima mit Hilfe des jeweiligen Treibhauspotenzials (*Global Warming Potential*, GWP) in der Wirkungskategorie Klimawandel erfasst und ausgewertet (s. Themenpapier B2.1 Die Ökobilanz).

Eine weitere Bewertungsmethode ist der *Product Carbon Footprint* (PCF) (s. Themenpapier B2.2 Eindimensionale Methoden), also der klimarelevante Fußabdruck eines Produktes.

Sofern die Menge der Treibhausgase bezogen auf ein Produkt ermittelt wird, was im Rahmen des Produktdesign die häufigste Anwendung sein dürfte, handelt es sich bei den Bewertungsergebnissen GWP und PCF um jeweils dieselbe Kennzahl. Sie drückt die Klimawirkung eines Produktes aus.

Der Unterschied einer Ökobilanz und eines *Product Carbon Footprints* (bezogen auf ein Produkt) besteht vereinfacht zusammengefasst darin, dass beim *Product Carbon Footprint* ausschließlich die Klimawirkung ermittelt wird, während die Klimawirkung bei der Ökobilanz nur eine der analysierten Umweltwirkungen darstellt.

---

Beispiel

Ökobilanzergebnisse<sup>10</sup> für 1 kg High Density Polyethylene (HDPE):<sup>11</sup>

**Klimawandel (GWP): 1,96 kg CO<sub>2</sub>-äqu**

Versauerungspotenzial (AP): 6,39 g SO<sub>2</sub>-äqu

Eutrophierungspotenzial (EP): 0,43 g PO<sub>4</sub>-äqu

Ozonbildungspotenzial (POCP): 1,23 g Ethen-äqu

*Product Carbon Footprint* für 1 kg High Density Polyethylene (HDPE):

**PCF: 1,96 kg CO<sub>2</sub>-äqu**

---

<sup>10</sup> Diese üblicherweise verwendeten Abkürzungen beziehen sich jeweils auf die englische Bezeichnung der Kategorien: Global Warming Potential (GWP), Acidification Potential (AP), Eutrophication Potential (EP) und Photochemical Ozone Creation Potential (POCP).

<sup>11</sup> PlasticsEurope, Ecoprofile 2008.

## 5.2 EMISSIONSHANDEL UND KYOTO-MECHANISMEN

Im Kyoto-Protokoll einigten sich eine Reihe von Staaten<sup>12</sup> darauf, ihre Treibhausgasemissionen zu verringern (vgl. [www.unfccc.int](http://www.unfccc.int), UN 1998). Im Protokoll werden diese Staaten im Annex B aufgelistet, weshalb diese Staatengruppe in diesem Zusammenhang meist „Annex B-Staaten“ genannt werden. In diesem Protokoll setzten sich die industrialisierten Länder unter anderem auch quantitative Ziele zur Reduktion der Treibhausgasemissionen, die sowohl mit statischen als auch mit flexiblen Mechanismen umgesetzt werden sollen.

Als statische Maßnahme sind nationale Reduktionsmaßnahmen zu nennen, welche durch Emissionsgrenzwerte etc. die Emissionen im eigenen Land reduzieren sollen.

Darüber hinaus bieten aber auch flexible Instrumente (Kyoto-Mechanismen) die Möglichkeit, Gutschriften für Reduktionen in anderen Ländern zu erhalten. Dies ist möglich, da Treibhausgase global wirken. Für ihre Schädlichkeit ist es gleichgültig, wo auf der Welt sie emittiert werden. Umgekehrt wirkt eine Reduktion der Treibhausgase ebenfalls global – gleichgültig, wo die Einsparung stattfindet.

Grundlage der flexiblen Mechanismen ist der Gedanke des „Cap and Trade“. Das bedeutet, es wird die zulässige Menge der Treibhausgasemissionen der Vertragspartner für die nächsten Jahre errechnet und unter den verschiedenen Ländern bzw. Unternehmen entsprechend in Form von Emissionsrechten (Zertifikaten) aufgeteilt („Cap“). Diese Emissionsrechte können zwischen Ländern untereinander bzw. zwischen Unternehmen untereinander gehandelt werden („Trade“).

Der Auswahl dieses Instrumentes liegt unter anderem folgender marktwirtschaftlicher Gedanke zugrunde: Es sollen nicht nur Emissionen reduziert werden, die Reduktion soll auch ökonomisch effizient erreicht werden.

Die Vergabe dieser Zertifikate ist die Grundlage dreier wesentlicher Mechanismen (1) des Internationalen Emissionshandels (zwischen Annex B-Staaten), (2) der *Joint Implementation* (JI) und (3) des *Clean Development Mechanismus* (CDM).

Der internationale Emissionshandel ermöglicht den Handel mit sog. Emissionsrechten zwischen den Ländern. Reduziert ein Land seine Emissionen über das Maß der vereinbarten Ziele hinaus, kann es die verbliebenen Emissionsrechte an ein anderes Land veräußern. Neben diesem Handel zwischen den Vertragspartnern des Kyoto-Protokolls gibt es auch den EU-Emissionshandel. Die von der EU herausgegebenen Emissionsrechte werden direkt an große Unternehmen einiger ausgewählter Branchen verteilt, die diese dann untereinander über die zuständige Emissionshandelsstelle handeln können.

Problematisch war und ist bei diesem im Prinzip äußerst effektiven System, dass zu Beginn zu viele Emissionszertifikate ausgegeben wurden. Dadurch hatten sowohl Länder als auch Unternehmen mehr Emissionsrechte, als sie benötigten, wodurch das Marktsteuerungsmittel der Knappheit nicht erzeugt werden konnte. Emissionsrechte werden daher so billig gehandelt, dass es weitaus günstiger ist, Zertifikate zu kaufen als Emissionen zu mindern.

Da es gleichgültig ist, wo auf der Welt die Emissionen reduziert werden, ist es sinnvoll, zunächst dort zu reduzieren, wo mit wenigen und günstigen Maßnahmen der größtmögliche Effekt erzielt werden kann.

Neben diesem direkten Handel mit Zertifikaten gibt es daher zwei weitere Mechanismen, mit denen man Reduktionsziele auslagern kann. Eins ist das Prinzip der *Joint Implementation* (JI, Gemeinsame Projektumsetzung). Indem ein Land Reduktionsmaßnahmen in einem anderen Land finanziert, kann der Investorstaat Emissionsrechte für seine heimischen Schadstoffproduzenten erwerben. Dieser Handel ist jedoch nur zwischen Annex B-Staaten gestattet. Insgesamt bleibt dabei die Obergrenze der gesamten Emissionsrechte aller Annex B-Staaten gleich.

Ähnlich funktioniert das Prinzip des *Clean Development Mechanism* (CDM, Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung). Hierbei werden, genau wie beim JI, die Treibhausgasemissionen in einem anderen Land reduziert – in diesem Fall jedoch in einem Nicht-Annex B-Staat. Durch die Emissionsreduktion in einem sogenannten Drittland erwirbt der Investorstaat zusätzliche und neue Emissionsrechte, wodurch sich die Gesamtmenge der vorhandenen Emissionsrechte erhöht.

Sowohl JI als CDM haben neben der Emissionsreduktion wichtige weitere Funktionen. Zum einen werden ärmeren Staaten dadurch Kapitalmittel für Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasen zur Verfügung gestellt. Zum anderen findet ein Technologietransfer statt, der eine weitere Verbreitung von Umweltschutztechniken in diesem Land befördert.

Zum Einstieg in dieses Thema siehe Umweltbundesamt, Deutsche Emissionshandelsstelle DEHSt, <http://www.dehst.de>.

<sup>12</sup> 191 Staaten und die Europäische Union.

## 5.3 KOMPENSATION VON EMISSIONEN

Neben dem Emissionshandel und den Mechanismen zur Reduktion der nationalen Treibhausgasemissionen gibt es auch die Möglichkeit, freiwillig Projekte zur Emissionsreduktion zu unterstützen. Hiermit können Privatpersonen und Unternehmen ihre Klimabilanz „ausgleichen“.

Das Prinzip lehnt sich an JI und CDM an. An die von privaten Unternehmen / Organisationen initiierten Projekte werden häufig (auf freiwilliger Basis) auch die strengen Richtlinien des Kyoto-Protokolls angelegt. Um die Einhaltung dieser Richtlinien auch für diesen freiwilligen Markt zu gewährleisten, gibt es Zertifizierungen, die Projekte mit besonderer Güte auszeichnen (z. B. The Gold Standard<sup>13</sup>). Ob ein Anbieter diesen Anforderungen gerecht wird, ist jeweils zu recherchieren. Als Organisation mit hohem Anspruch kann „Atmosfair“ genannt werden.

Emissionskompensationen erleichtern das Gewissen und der positive Effekt ist unbestreitbar gegeben. Damit diese Optionen jedoch nicht als Ablasshandel missbraucht werden, ist es sinnvoll, sie auf unvermeidbare Emissionen zu beschränken. Vorrangige Maßnahme sollte die Vermeidung und Verminderung von Emissionen sein.

<sup>13</sup> <http://www.cdmgoldstandard.org/>.

## 6 FAZIT

Unter Wissenschaftlern weltweit herrscht Konsens, dass eine deutliche Klimaänderung stattfindet. Ebenso unstrittig ist, dass diese anthropogen verursacht ist. Der wichtigste Faktor für die zunehmende Erwärmung ist die Emissionen von Treibhausgasen – allen voran Kohlendioxid, aber auch Methan, Lachgas und halogenierte Kohlenwasserstoffe. Die prognostizierten Klimaänderungen haben große Tragweite: sie gefährden den Frieden und die Lebensgrundlage der Menschen in vielen Regionen der Erde.

Nur wenn ambitionierte Gegenmaßnahmen zu massiven Minderungen der Treibhausgasemissionen führen, lassen sich die Klimaänderungen begrenzen. Instrumente zur Quantifizierung der Treibhausgasemissionen liegen vor. Somit lassen sich für beliebige anthropogene Prozesse und Produkte die potenziellen Auswirkungen auf das Klima abschätzen und bewerten. Dies ermöglicht es den Stakeholdern – etwa Hersteller, Verbände, Behörden – geeignete Ziele festzulegen und den Zielerreichungsgrad zu ermitteln.

# 7 WEITERFÜHRENDE QUELLEN

Seite des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit über Klimaschutz über Klimaschutz:

<http://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/>

Deutsche Übersetzung der Kernbotschaften des 5. Sachstandberichtes des IPCC

[http://www.de-ipcc.de/\\_media/IPCC\\_AR5\\_WGI\\_Kernbotschaften\\_20131008.pdf](http://www.de-ipcc.de/_media/IPCC_AR5_WGI_Kernbotschaften_20131008.pdf)

IPCC Assessment Report „Climate Change 2013: The Physical Science Basis“

<http://www.climatechange2013.org/report/>

# LITERATUR

**IPCC 2007:** Intergovernmental Panel on Climate Change (Hg.) (2007): Climate Change 2007, Synthesis Report, online verfügbar unter [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf), zuletzt geprüft am 13.01.2014.

**IPCC 2007b:** Intergovernmental Panel on Climate Change (Hg.) (2007): Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007, online verfügbar unter <https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter2.pdf>, zuletzt geprüft am 12.02.2015.

**IPCC 2013:** Intergovernmental Panel on Climate Change (Hg.) (2013); Climate Change 2013, The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, online verfügbar unter: [http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGI AR5 SPM brochure.pdf](http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGI_AR5_SPM_brochure.pdf), zuletzt geprüft am 12.02.2015.

**IPCC 2013b:** Intergovernmental Panel on Climate Change (Hg.) (2013); Climate Change 2013, The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, online verfügbar unter <http://www.climatechange2013.org/report/>, zuletzt geprüft am 12.02.2015.

**UN 1998:** United Nations (Hg.) (1998); Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, online verfügbar unter <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>, zuletzt geprüft am 15.01.2014.



## Impressum

Erstellt im Auftrag des Umweltbundesamtes  
im Rahmen des UFOPLAN-Vorhabens FKZ 371295303

durch

Ökopol – Institut für Ökologie und Politik GmbH, Nernstweg 32–34, 22765 Hamburg  
Tel.: +49 (0)40/39 100 2-0; Fax.: +49 (0)40/39 100 2-33; Internet: [www.oekopol.de](http://www.oekopol.de)