

## Fünfter Sachstandsbericht des IPCC Teilbericht 1 (Wissenschaftliche Grundlagen)

Der Weltklimarat IPCC veröffentlicht in den Jahren 2013 und 2014 den Fünften Sachstandsbericht (AR5). Der AR5 besteht aus den Beiträgen der drei IPCC-Arbeitsgruppen und einem übergreifenden Synthesebericht. Der nun veröffentlichte Teilbericht 1 widmet sich den naturwissenschaftlichen Grundlagen des Klimawandels.

### Zusammenfassung

Der Bericht bestätigt eindeutig, dass sich das Klima ändert und dass dies auf menschlichen Einflüssen beruht. Im neuen Sachstandsbericht (AR5) sind die Belege für den aktuellen Klimawandel und seine Ursachen noch umfassender und sicherer als im vorigen Bericht von 2007. Die Abschätzungen der zukünftigen Entwicklung sind sehr viel fundierter.

Im gesamten Klimasystem finden seit Mitte des letzten Jahrhunderts vielfältige Veränderungen statt. In dieser Form sind viele dieser Veränderungen in den zurückliegenden Jahrzehnten bis Jahrtausenden noch nie aufgetreten. Nicht nur die Temperatur der unteren Atmosphäre steigt, auch die Ozeane erwärmen sich, Gletscher tauen, Permafrostböden werden wärmer, Eisschilde verlieren an Masse, der Meeresspiegel steigt weiter an.

Umfassendere Beobachtungen, erweiterte Modelle und ein tiefergehendes Verständnis der Zusammenhänge zeigen: Die Aktivitäten des Menschen sind mit großer Sicherheit die Hauptursache des aktuellen Klimawandels. Natürliche Faktoren wie Schwankungen der Sonnenaktivität oder Vulkanausbrüche haben auf die langfristige Erwärmung gegenwärtig nur einen geringen Einfluss.

Hauptursache der Erwärmung ist die Freisetzung von Treibhausgasen, insbesondere von Kohlendioxid. Dessen Konzentration ist in der Atmosphäre heute so hoch, wie noch nie zuvor in den zurückliegenden 800 000 Jahren. Blicke die derzeitige Emissionsrate unverändert, dann wäre schon Mitte dieses Jahrhunderts so viel Kohlendioxid in die Atmosphäre emittiert, dass die globale Mitteltemperatur über 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau ansteigen würde.

Ein ungebremsster Ausstoß von Treibhausgasen könnte das Klimasystem derart verändern, wie dies in den vergangenen hunderttausenden Jahren nicht vorgekommen ist. Vielfältige und deutliche Veränderungen wären zu erwarten, wie etwa bei Niederschlägen, Eis und Schnee, einigen Extremwetterereignissen, Meeresspiegelanstieg und Versauerung der Ozeane. Alle Regionen der Erde wären betroffen. Bisher beobachtete Veränderungen würden verstärkt. Viele der Änderungen im Klimasystem blieben über Jahrhunderte bestehen, auch wenn keine Treibhausgase mehr freigesetzt würden.

Soll die globale Erwärmung auf einem bestimmten Niveau begrenzt werden, so sind dafür erhebliche Minderungen der Treibhausgasemissionen notwendig. Die Forschungsergebnisse zeigen, dass bei einem Szenario mit sehr ambitioniertem Klimaschutz - und auf der Basis der aktuellsten Simulationen des Klimasystems - die Möglichkeit besteht, die globale Erwärmung unterhalb von 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen.

Erstmalig wird ein Grenzwert für den Gesamteintrag von CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre seit Beginn der Industrialisierung quantifiziert, bei dessen Überschreiten die Einhaltung bestimmter Temperaturobergrenzen, wie z. B. der 2 °C-Obergrenze, schwierig würde: Bei CO<sub>2</sub>-Emissionen von bis zu etwa 1000 Gigatonnen Kohlenstoff könnte die 2 °C-Obergrenze mit mehr als 66 % Wahrscheinlichkeit eingehalten werden. Wegen des zusätzlichen Effekts von weiteren Treibhausgasen müssten die weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen allerdings noch deutlich unter dieser Marke liegen.

## Beobachtungen zeigen Änderungen im gesamten Klimasystem

Vielfältige Beobachtungsdaten zeigen eindeutig, dass sich das Klima auf der Erde geändert hat. Klimadaten liegen seit Mitte des 19. Jahrhunderts und in ausreichender Vollständigkeit und Qualität seit den 1950er Jahren vor. Einige markante Beispiele der Klimaänderungen sind:

- **Atmosphäre:** Die globale Mitteltemperatur in Bodennähe stieg im Zeitraum von 1880 bis 2012 um 0,85 °C. Jedes der drei vergangenen Jahrzehnte war wärmer als alle vorhergehenden seit 1850. In der Nordhemisphäre war die letzte 30-jährige Periode (von 1983 bis 2012) die wärmste seit 1400 Jahren. Die Arktis hat sich seit Mitte des 20. Jahrhunderts besonders stark erwärmt. Der tatsächliche Erwärmungseffekt durch menschliche Treibhausgasemissionen läge sogar noch über der beobachteten Erwärmung, wenn nicht kühlende Faktoren einen Teil des Temperaturanstiegs kompensiert hätten. Zum Beispiel wirken die meisten Aerosole (kleine, in der Atmosphäre schwebende Teilchen) dem Treibhauseffekt entgegen, indem sie das einfallende Sonnenlicht reflektieren.
- **Verlangsamter Temperaturanstieg:** In den vergangenen 15 Jahren ist die globale Mitteltemperatur weiterhin gestiegen, jedoch war die Geschwindigkeit des Temperaturanstiegs langsamer als in den vorhergehenden Jahrzehnten. IPCC stellt fest, dass man aus diesem Befund nicht auf eine generelle Abschwächung des globalen Klimawandels schließen kann, da solch kurzfristige Veränderungen vor allem auf natürliche und interne Schwankungen im Klimasystem zurückgehen. Die Untersuchungen der Gründe des verlangsamten Temperaturanstiegs sind noch nicht abgeschlossen. AR5 gibt drei Hauptfaktoren an: 1. Kurzfristige interne Schwankungen des Klimasystems, 2. ein Minimum im 11-jährigen Sonnenzyklus und 3. Verstärkung des kühlenden Effekts durch Aerosole aus mehreren kleineren Vulkanausbrüchen.
- **Ozeanerwärmung:** Verbesserte und erweiterte Messsysteme zeigen, dass die Ozeane im Zeitraum 1971 bis 2010 mehr als 90 % der Energie, die dem Klimasystem zusätzlich zugeführt wurde, gespeichert haben. Am stärksten erwärmten sich die Schichten nahe der Wasseroberfläche. In den oberen 75 Metern stieg die Temperatur von 1971 bis 2010 im Mittel um 0,11°C pro Dekade an. Auch im tiefen Ozean unterhalb von 3000 m hat sich das Wasser erwärmt.
- **Meeresspiegel:** Infolge der fortgesetzten Tauprozesse von Gletschern und Eisschilden und der Ausdehnung des erwärmten Ozeanwassers stieg der globale mittlere Meeresspiegel im Zeitraum von 1901 bis 2010 um etwa 19 cm an. Der mittlere Anstieg betrug in dieser Zeit etwa 1,7 mm pro Jahr. In den letzten 20 Jahren war dieser Wert mit ca. 3,2 mm pro Jahr fast doppelt so groß.
- **Ozeanversauerung:** Die atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen sind seit der Industrialisierung um 40 % gestiegen. Ein Drittel des anthropogenen CO<sub>2</sub> wurde von den Ozeanen aufgenommen. Infolgedessen hat der Säuregehalt der Ozeane zugenommen.
- **Eis und Schnee:** Der bisherige Rückgang der Gletscher setzte sich global bis auf wenige Ausnahmen fort und auch die polaren Eiskappen nahmen an Masse ab. Von 2002 bis 2011 ist etwa sechsmal so viel Grönlandeis geschmolzen wie in den zehn Jahren davor. Der antarktische Eisschild verlor im Zeitraum 1992 – 2001 30 Gt pro Jahr an Eismasse, im Zeitraum 2002 bis 2011 waren es mit 147 Gt pro Jahr fast fünfmal so viel. Die mittlere jährliche Ausdehnung des arktischen Meereises hat sich im Zeitraum von 1979 bis 2012 um 3,5 bis 4,1 % pro Dekade verringert. Beim antarktischen Meereis wurde eine leichte Zunahme von 1,2 bis 1,8 % pro Jahrzehnt im Zeitraum 1979 bis 2012 beobachtet. Die Ausdehnung der Schneedecke in der Nordhemisphäre hat sich seit Mitte des 20. Jahrhunderts verringert. Die Permafrostböden der meisten Regionen erwärmten sich.
- **Niederschlag:** Die Entwicklung der Niederschläge erfolgte regional in unterschiedlicher Weise. Zwischen 1950 und 2008 stiegen die Niederschläge in feuchten Regionen der Tropen und in mittleren Breiten der Nordhalbkugel, während sie in trockenen Regionen der Subtropen abnahmen. Für andere Regionen wurden keine eindeutigen Veränderungen nachgewiesen.
- **Wetterextreme:** Bei vielen extremen Wetterereignissen wurden Veränderungen beobachtet. So hat die Zahl der kalten Tage und Nächte abgenommen und die der warmen Tage und Nächte seit Mitte des vergangenen Jahrhunderts zugenommen. In Europa, Asien und Australien traten häufiger Hitzewellen auf. Die Starkregenereignisse in Nordamerika und Europa sind häufiger und intensiver geworden.

## Aktivitäten der Menschen Hauptursache des Klimawandels

- Es ist extrem wahrscheinlich, dass der menschliche Einfluss die Hauptursache der Erwärmung seit Mitte des vergangenen Jahrhunderts ist.
- Der Einfluss des Menschen auf das Klima wurde in der Temperaturentwicklung von Atmosphäre und Ozean und bei vielen weiteren Änderungen wie z. B. des Wasserkreislaufs, der Eisschmelze, des Schneerückgangs, der Änderung bei einigen Wetterextremen oder der Ozeanversauerung nachgewiesen.
- Der Umfang der Nachweise weitreichender vom Menschen verursachter Änderungen ist seit dem letzten Sachstandsbericht gewachsen.
- Die Hauptursache der globalen Erwärmung ist die Freisetzung von Treibhausgasen wie CO<sub>2</sub>. Seit 1750 sind die atmosphärischen Konzentrationen der Treibhausgase CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O jeweils um 40 %, 150 % und 20 % gestiegen. Die Aktivitäten des Menschen führen dazu, dass die aktuellen Konzentrationen dieser Gase diejenigen der zurückliegenden 800.000 Jahre übersteigen und ihre mittleren Zuwachsraten in den letzten 22.000 Jahren noch nie so hoch waren wie heute.
- Insgesamt sind von 1750 bis 2011 durch menschliche Aktivitäten (hauptsächlich durch den Einsatz fossiler Brennstoffe und Landnutzungsänderungen) CO<sub>2</sub>-Mengen in Höhe von 545 Gigatonnen Kohlenstoff freigesetzt worden. Davon blieb weniger als die Hälfte (240 Gigatonnen Kohlenstoff) in der Atmosphäre und trug zum menschengemachten Treibhauseffekt bei. Der Rest wurde etwa jeweils zur Hälfte vom Ozean (155 Gigatonnen Kohlenstoff) und von Böden und Pflanzen (150 Gigatonnen Kohlenstoff) aufgenommen.
- Die sogenannte Klimasensitivität gibt an, um wie viel die globale Mitteltemperatur in Bodennähe bei Verdopplung der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen langfristig ansteigen würde. Die Klimasensitivität wird aus direkten Beobachtungen, erdgeschichtlichen Untersuchungen und Modellsimulationen abgeschätzt. Im vorherigen IPCC-Bericht von 2007 wurde eine Spannbreite von 2 bis 4,5 °C mit einem wahrscheinlichsten Wert von 3 °C angegeben. Der AR5 nennt nun eine Spannbreite von 1,5 bis 4,5 °C. Neue wissenschaftliche Erkenntnisse seit dem AR4 haben dazu geführt, dass die Autoren den unteren Wert der Bandbreite wieder niedriger angeben und zu dem Wert der älteren IPCC-Sachstandsberichte zurückkehren. Die Annahmen für den oberen Wert der Erwärmung bleiben jedoch unverändert. Das bedeutet, dass nach wie vor die Notwendigkeit zur starken und zügigen Minderung der Treibhausgasemissionen besteht, um die globale Erwärmung auf 2°C gegenüber vorindustriellem Niveau zu begrenzen. Der niedrigere untere Wert bedeutet, dass eine geringfügig größere Chance zur Einhaltung der 2 °C-Obergrenze bestehen könnte.

## Projektionen zeigen zukünftige mögliche Änderungen im Klimasystem

Ein anhaltender ungebremster Ausstoß von Treibhausgasen würde zu einer weiteren Erwärmung und zu Veränderungen in allen Komponenten des Klimasystems führen. (Bisher beobachtete Veränderungen würden dabei verstärkt.) Es würden in allen Regionen der Erde, über Land und in den Ozeanen, im Wasserkreislauf, in der Kryosphäre, beim Meeresspiegel, bei einigen Extremereignissen und bei der Ozeanversauerung Änderungen stattfinden. Die zu erwartenden Änderungen sind in Art und Größe ähnlich denen, die im AR4 projiziert wurden. Für den Meeresspiegelanstieg liegen die neuen Projektionen höher. Viele Veränderungen würden über Jahrhunderte andauern, auch wenn die Treibhausgasemissionen längst zurückgegangen sind.

- **Weitere Erwärmung:** Ausgehend von einem Szenario mit sehr ambitionierter Klimapolitik zeigen die Simulationen, dass der mittlere Temperaturanstieg gegen Ende dieses Jahrhunderts gegenüber der vorindustriellen Zeit auf 0.9 bis 2.3 °C begrenzt werden könnte. Dabei gehen die Autoren des IPCC davon aus, dass die Erwärmung wahrscheinlich unter 2 °C bleiben wird. Die Simulationen unter den Voraussetzungen dreier weiterer Szenarien mit weniger oder unwesentlichen Emissionsreduktionen zeigen Temperaturanstiege zwischen 1.7 und 5.4 °C. Dabei ist bei allen drei Szenarien von Erhöhungen von mehr als 1.5 °C auszugehen, bei zwei Szenarien sind es mindestens 2 °C. Bei dem Szenario mit fast ungebremsten Emissionen sind Temperaturanstiege von mehr als 5,4 °C ge-

gen Ende dieses Jahrhunderts möglich. Mit Ausnahme des Szenarios mit sehr ambitioniertem Klimaschutz würde sich in allen Szenarien die Erwärmung nach Ende des 21. Jahrhunderts fortsetzen. Zusammenfassend gibt der AR5 für den mittleren Temperaturanstieg gegenüber vorindustriellen Bedingungen gegen Ende dieses Jahrhunderts eine Bandbreite von 0.9 bis 5.4 °C an. Im AR4 waren es 1.1 bis 6.4 °C. Die neuen Berechnungen bestätigen im Wesentlichen die Resultate des AR4. Die Differenzen sind auf Unterschiede in den zugrundeliegenden Szenarien und leicht geänderte Bezugszeiträumen zurückzuführen.

- **Extreme:** Es gilt als fast sicher, dass mehr heiße und weniger kalte Temperaturextreme auftreten können. Hitzewellen dürften sehr wahrscheinlich häufiger auftreten und länger andauern. Bis zum Ende dieses Jahrhunderts werden Starkniederschläge über den meisten Landgebieten der mittleren Breiten und über den feuchten Tropen sehr wahrscheinlich intensiver und häufiger auftreten.
- **Niederschläge:** Bei zunehmender Erwärmung würden in vielen trockenen Regionen der mittleren und subtropischen Breiten die mittleren Niederschläge weiter abnehmen. In vielen feuchten Regionen der mittleren Breiten sind dagegen unter wärmeren Bedingungen bis zum Jahr 2100 (Szenario mit den höchsten Treibhausgasemissionen) Niederschlagszunahmen zu erwarten.
- **Eis und Schnee:** Je nach Szenario könnten die Gletscher bis zum Ende des 21. Jahrhunderts 15 bis 55 % (niedrigstes Emissionsszenario) oder 35 bis 85 % (höchstes Emissionsszenario) ihres derzeitigen Volumens verlieren. Es ist sehr wahrscheinlich, dass das arktische Meereis weiter zurückgeht. Unter dem Szenario mit den höchsten Emissionen könnte die Arktis sogar schon vor Mitte des 21. Jahrhunderts im September eisfrei sein. In der Nordhemisphäre geht die Schneebedeckung zurück. Es ist fast sicher, dass sich Gegenden mit oberflächennahem Permafrost in höhere nördliche Breiten verlagern.
- **Ozeanerwärmung:** In allen Szenarien wird sich die Erwärmung der Ozeane über Jahrhunderte fortsetzen, selbst wenn die Treibhausgasemissionen konstant bleiben oder gesenkt werden. Die Erwärmung wird von der Wasseroberfläche in den tiefen Ozean vordringen und die ozeanische Zirkulation beeinflussen.
- **Ozeanversauerung:** Die Ozeane werden auch weiterhin CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre aufnehmen, was eine zunehmende Versauerung des Meerwassers bewirkt. Dies behindert die Bildung von Kalkschalen vieler Meereslebewesen und beeinträchtigt die Lebenswelt in den Ozeanen.
- **Meeresspiegel:** Bis Ende des 21. Jahrhunderts sind Anstiege um weitere 26 bis 55 cm zu erwarten, auch wenn beträchtliche Klimaschutzanstrengungen unternommen werden (niedrigstes Emissionsszenario). Ohne Emissionsbeschränkungen wird der Meeresspiegel bis Ende des Jahrhunderts zwischen 45 und 82 cm ansteigen (höchstes Emissionsszenario). Der IPCC schließt nicht aus, dass der Anstieg des Meeresspiegels auch deutlich höher ausfallen könnte. Für den Meeresspiegelanstieg liegen die neuen Projektionen höher als im AR4, weil der Beitrag der polaren Eisschilde besser berücksichtigt ist.
- **Ozeanzirkulation:** Die Atlantische Meridionale Umwälzbewegung (AMOC, Atlantic Meridional Overturning Circulation) – umgangssprachlich oft als „Golfstrom“ bezeichnet – würde bei zunehmender Erwärmung eher schwächer. Der AR5 bestätigt die Aussagen vorheriger IPCC-Berichte und stellt fest, dass abrupte Änderungen oder ein Zusammenbruch im Verlauf des 21. Jahrhunderts sehr unwahrscheinlich sind. Bei fortgesetzter starker Erwärmung des Klimas kann jedoch ein Zusammenbruch der Zirkulation nach dem 21. Jahrhundert nicht ausgeschlossen werden.

### Zuverlässigkeit der Klimamodelle verbessert

Die Resultate des AR5 beruhen auf mehr als doppelt so vielen Klimamodellen und einer viel größeren Anzahl von einzelnen Simulationen als im AR4. Insgesamt 39 komplexe Modelle kamen zum Einsatz. Außerdem wurden die Klimamodelle wesentlich verbessert:

- **Neue Modellgeneration:** Viele gekoppelte Ozean-Atmosphärenmodelle wurden zu Erdsystemmodellen weiterentwickelt, indem zusätzlich Modelle des Kohlenstoffkreislaufs angekoppelt wurden. Damit können nun beispielsweise der Kohlenstoffaustausch zwischen Atmosphäre und Ozean und zwischen Atmosphäre und Biosphäre interaktiv simuliert werden. Das bedeutet unter anderem,

dass die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Atmosphäre direkt vom Modell berechnet werden. Dies ist die Voraussetzung für die Beantwortung der Frage, wie viel Kohlendioxid in die Atmosphäre emittiert werden darf, um ein bestimmtes Ausmaß der globalen Erwärmung (zum Beispiel eine Erwärmung von 2 °C gegenüber vorindustriellen Werten) nicht zu überschreiten.

- **Verbessertes Prozessverständnis:** Die in den Modellen dargestellten Prozesse wurden erweitert und viele Faktoren, die das Klima beeinflussen, können nun umfassender simuliert werden. Dazu zählen z. B. die Wirkungen von Aerosolen und deren Wechselwirkung mit Wolken. Die großräumigen Niederschlagsmuster und die Auswirkungen der Landnutzung werden fundierter modelliert. Ebenso gelingt es nun mehr Modellen, den abnehmenden Trend des arktischen Meereises seit 1979 besser abzubilden. Viele Modelle reproduzieren die beobachteten Änderungen der Wassertemperaturen in den oberen Meeresschichten plausibel. Insbesondere ist das Vertrauen in die Projektionen des Meeresspiegelanstiegs wegen des verbesserten Verständnisses der physikalischen Prozesse gewachsen.
- **Qualität der Modelle:** Klimamodelle simulieren langfristige Klimaänderungen in guter Näherung. Kurzfristige, natürliche, interne Klimaschwankungen, die unter anderem die verlangsamte Temperaturzunahme im letzten Jahrzehnt beeinflusst haben, können durch die Modelle auch nachgebildet werden, jedoch nicht der jeweilige Zeitpunkt ihres Eintretens, denn es handelt sich um zufällige Ereignisse. Erwartungsgemäß sind deshalb die simulierten Temperaturen auf kürzeren Zeitskalen von 10 bis 15 Jahren im Vergleich zum beobachteten Temperaturverlauf zeitweise zu kalt und zeitweise zu warm. Der langfristige Temperaturverlauf wird dagegen treffend wiedergegeben.

## Neue Szenarien

In der Klimawissenschaft dienen Szenarien der Beschreibung von möglichen zukünftigen sozioökonomischen Entwicklungen (z. B. Wirtschaftswachstum, technologische Entwicklung, Innovation, Bevölkerungswachstum, Urbanisierung oder Klimapolitik). Die Szenarien beinhalten künftige Entwicklungen von Treibhausgasen und Aerosolen in der Atmosphäre sowie von anderen Faktoren, die das Klima beeinflussen, wie etwa Landnutzungsänderungen.

In AR5 wurden vier neue Szenarien verwendet, sogenannte repräsentative Konzentrationspfade (Representative Concentration Pathways, RCP). Die RCPs decken die Periode zwischen 1850 bis 2100 ab, mit Erweiterungen auch den Zeitraum bis zum Jahr 2300. Anders als in den Szenarien der beiden vorangegangenen Sachstandsberichte sind nun auch Maßnahmen zur Minderung der Treibhausgase berücksichtigt. Alle drei IPCC-Arbeitsgruppen in AR5 verwenden die RCPs. Damit wird sichergestellt, dass konsistente Informationen zu naturwissenschaftlichen Fragenstellungen sowie zu Aspekten der Anpassung, Folgen, Verwundbarkeit und Klimaschutz für diese vier repräsentativen Szenarien zur Verfügung stehen.

Die drei RCPs mit höheren künftigen Treibhausgaskonzentrationen umschließen die Bandbreite der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen der vorher verwendeten Szenarien. Das niedrigste RCP-Szenario mit sehr ambitionierten Klimaschutzmaßnahmen liegt darunter. Dies muss bei der Beurteilung der Modellergebnisse der Arbeitsgruppe 1, insbesondere beim Vergleich mit den Ergebnissen vorheriger IPCC-Berichte berücksichtigt werden.

IPCC zeigt, dass unter den Bedingungen dieses ambitionierten Szenarios - und auf der Basis des gegenwärtigen Kenntnisstandes der Physik des Klimasystems - die Möglichkeit besteht, die globale Erwärmung unterhalb von 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen.