

## Grundlagen Klimawandel und Klimamodelle

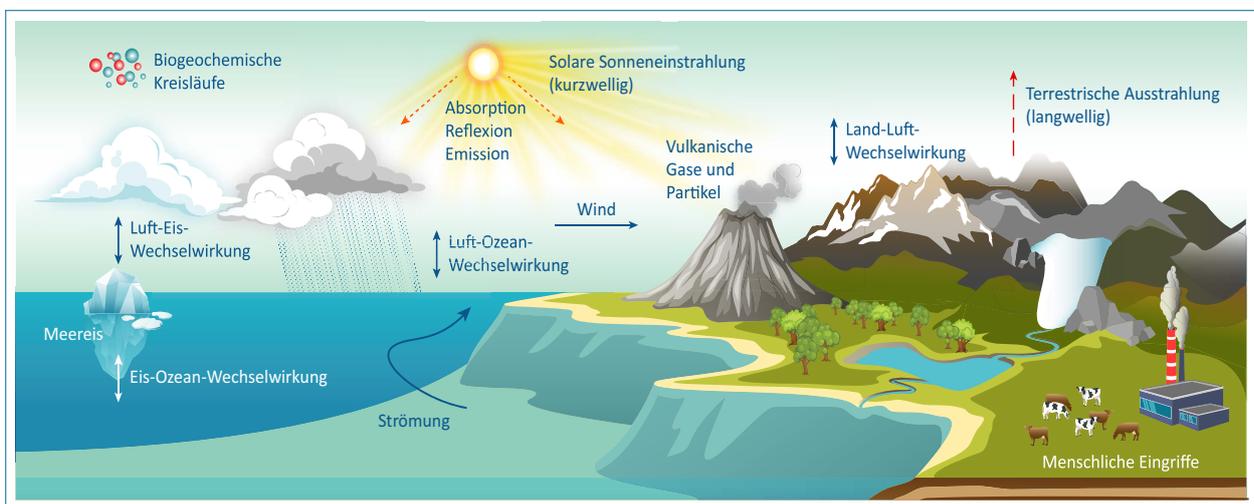
### Klima und Wetter

Der Begriff Wetter bezeichnet den fühlbaren Zustand der Atmosphäre zu einem Zeitpunkt an einem Ort und unterliegt täglichen Schwankungen. Die natürliche innere Variabilität des Wetters, ist auf dessen chaotische Charakteristik zurückzuführen.

Das Klima ist die Zusammenfassung aller Wettererscheinungen an einem Ort über einen langen Zeitraum (in der Regel 30 Jahre). Das Klima wird anhand von Mittel- und Extremwerten, Häufigkeiten und Jährlichkeiten beschrieben. Änderungen im Klima werden aufgrund der langen Zeitskalen erst nach längeren Zeiträumen ersichtlich.

### Klimasystem

Das globale Klimasystem besteht aus fünf Komponenten, die in Wechselwirkung miteinander stehen: Atmosphäre, Ozeane, Landoberfläche, Biosphäre, Kryosphäre (Eis & Schnee).



Wechselwirkungen der Klimakomponenten, Abbildung nach [1]

### Klimamodelle

Klimamodelle basieren auf physikalischen Gesetzen (Impuls-, Masse- und Energieerhalt) und Beobachtungen, mit deren Hilfe das Klimasystem abgebildet und dessen Veränderungen berechnet werden.

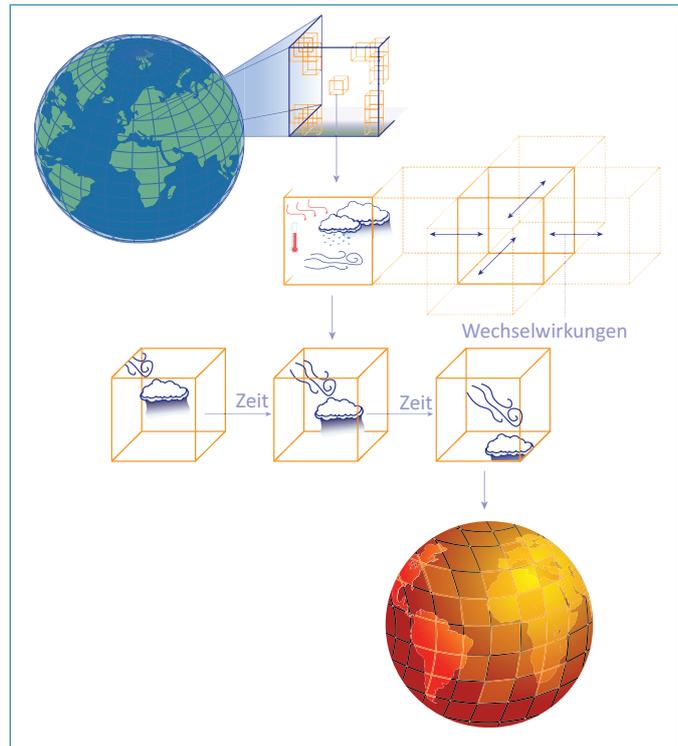
Dabei wird die Erde in horizontale und vertikale Gitter unterteilt, an deren Knotenpunkten die klimatischen Eigenschaften anhand unterschiedlicher Parameter beschrieben und anschließend deren Änderung berechnet wird.

Je höher die Auflösung des Gitters, umso besser kann das Klima an einem Ort beschrieben werden, umso höher wird allerdings auch die erforderliche Rechenleistung.

Im Laufe der Zeit haben sich Klimamodelle immer weiter verbessert. Die Auflösung wurde verfeinert und die Modelle der unterschiedlichen Klimakomponenten (Atmosphäre, Ozean etc.) wurden miteinander gekoppelt, so dass eine Vielzahl von Wechselwirkungen zwischen den Komponenten berücksichtigt werden können.

Den Modellen müssen die Anfangsbedingungen, welche auf Beobachtungen des historischen Klimas beruhen, sowie Randbedingungen, wie die Entwicklung der Treibhausgaskonzentration in der Luft, vorgegeben werden.

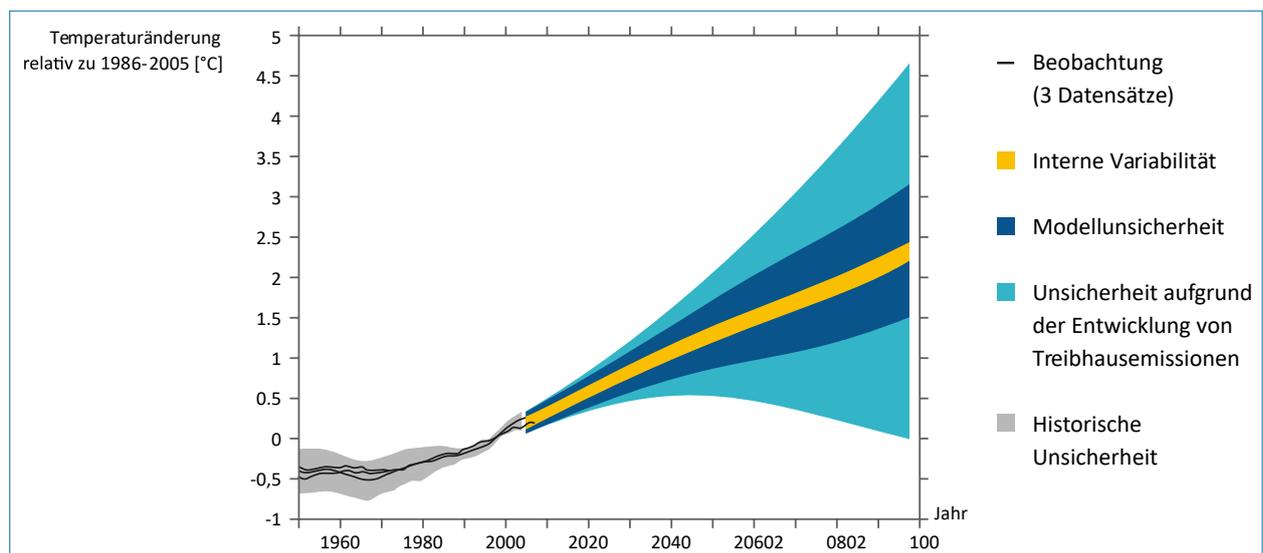
Die auf Basis dieser Anfangs- und Randbedingungen stattfindenden Prozesse innerhalb des Klimasystems werden von den Modellen auf Basis der bekannten physikalischen Gesetze an den einzelnen Gitterpunkten bestimmt.



Die Abbildung skizziert den Aufbau und die Funktionsweise eines Klimamodells, Abbildung nach [2]

## Unsicherheitsquellen bei Klimaprojektionen

Die Projektionen des zukünftigen Klimas weisen Unsicherheiten aufgrund (1) der internen Variabilität, (2) der Modellunsicherheit und (3) der Entwicklung von Treibhausgasemissionen auf.



Einfluss verschiedener Unsicherheitsquellen bei Klimaprojektionen, Abbildung nach [3]

Unsicherheiten aufgrund der internen Variabilität des Klimasystems, welche z.B. aufgrund von Wechselwirkungen in den Komponenten des Klimasystems oder zwischen dessen einzelnen Komponenten bestehen – ein bekanntes Beispiel ist El Niño –, wird begegnet, indem die Anfangsbedingungen der Klimamodelle variiert werden.

Modellunsicherheiten bestehen, weil es unterschiedliche Möglichkeiten gibt, das Klimasystem in den Modellen abzubilden wird. Der Modellunsicherheit wird begegnet, indem unterschiedliche Modelle verschiedener Forschergruppen verwendet werden.

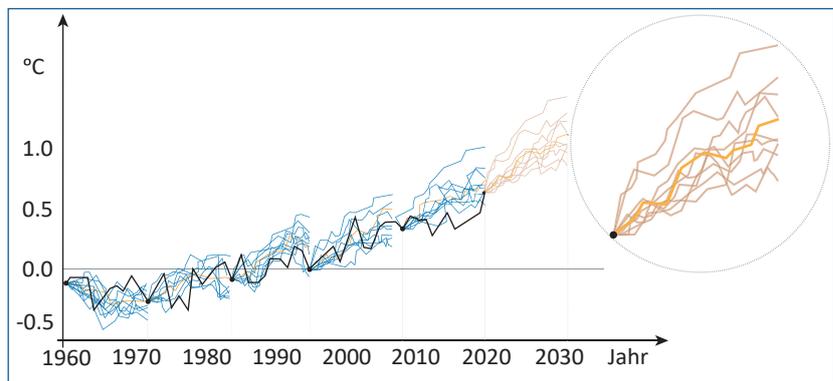
Die größte Unsicherheit basiert jedoch auf der zukünftigen Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen. Die Menge zukünftiger Treibhausgas-Emissionen hängt stark von der zukünftigen globalen Wirtschafts- und Bevölkerungsentwicklung sowie von der Klimapolitik ab. Da hier verschiedene Szenarien denkbar sind, spricht man auch von einer Szenario-Unsicherheit.

Die daraus resultierende Bandbreite möglicher zukünftiger Änderungen stellt Planer von Anpassungsmaßnahmen vor die Herausforderung, geeignete Maßnahmen zu entwickeln und Fehlanpassungen zu vermeiden.

## Ensemble

Verschiedene Simulationen eines Modells mit leicht unterschiedlichen Annahmen, z.B. hinsichtlich der Anfangsbedingungen, um Unsicherheiten bzgl. der genauen Anfangsbedingungen zu erfassen

- Kein Lauf ist wahrscheinlicher als der andere
- Es werden Perzentile (z.B. 15. - 85. und 50.) angegeben
- Spiegelt natürliche Variabilität des Klimas wider



Modellensemble, Abbildung nach [4]

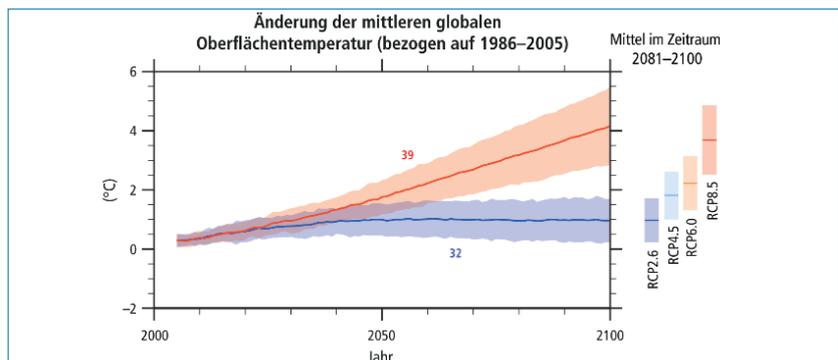
## Multi-Modell-Ensemble

Ensembles verschiedener Klimamodelle von unterschiedlichen Forschergruppen

- Spiegelt die Modell-Unsicherheit wider

Multi-Modell-Ensemble für unterschiedliche Klimaszenarien

- Spiegelt die Szenario-Unsicherheit wider



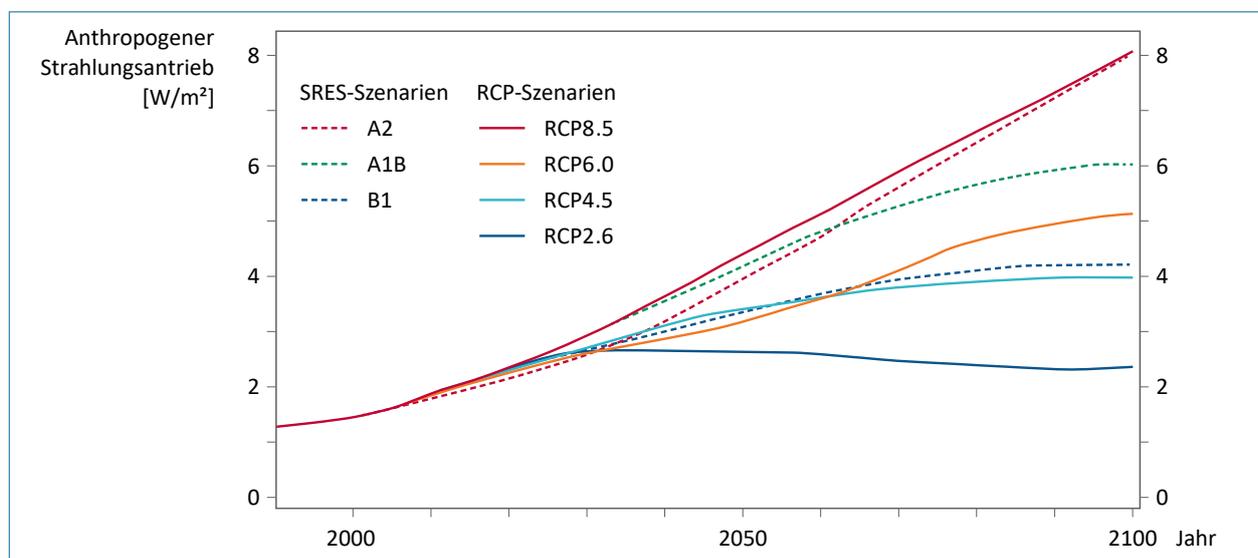
Multi-Modell-Ensemble für zwei verschiedene Klimaszenarien. Die korallene bzw. violette Linie gibt jeweils ein Multi-Modell-Ensemble wieder, die Nummer zeigt die Anzahl der Modelle an. [5]

## Klimaszenarien

Für Aussagen über die zukünftige Entwicklung des Klimas benötigt man realistische Szenarien der zukünftigen Erwärmung.

Im dritten und vierten IPCC-Sachstandsbericht wurden die sogenannten SRES-Szenarien (Special Report on Emissions Scenarios, englisch für Sonderbericht über Emissions-Szenarien) genutzt, welche auf unterschiedlichen Treibhausgas-Emissionsszenarien beruhen, aus denen die durch den Menschen verursachte Erwärmung mithilfe von Klimamodellen abgeleitet wurde.

Im fünften IPCC-Sachstandsbericht wurden die sogenannten RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathways, englisch für repräsentative Konzentrationspfade) verwendet. Sie definieren, mit welchem zusätzlichen Strahlungsantrieb - der zusätzliche Strahlungsantrieb beschreibt die durch den Menschen verursachte Erwärmung - zu rechnen ist. Aus diesen Klimaszenarien können dann bestimmte Emissionsszenarien abgeleitet werden, d.h. ihnen liegen keine direkten Emissionsszenarien zugrunde. Die RCP-Szenarien wurden aus mehreren Gründen eingeführt. Ein Vorteil ist, dass hiermit beispielsweise Landnutzungsänderungen berücksichtigt werden können.



Anthropogener Strahlungsantrieb der RCP- und SRES-Szenarien, Abbildung nach [3]

Die RCP-Szenarien basieren auf den Ergebnissen verschiedener Forschergruppen, wurden jedoch nicht vom IPCC entwickelt. Jedes RCP-Szenario ist repräsentativ für eine Vielzahl von Szenarien. Die RCP-Szenarien werden in ein Szenario mit nur sehr geringem Zuwachs des Strahlungsantriebs (RCP2.6), zwei Szenarien mit moderatem Anstieg des Strahlungsantriebs (RCP4.5 und RCP6.0), bis hin zu einem Szenario mit starkem Zuwachs des Strahlungsantriebs (RCP8.5) eingeteilt – die Zahl steht dabei jeweils für den Zuwachs des anthropogenen Strahlungsantriebs in  $[W/m^2]$  im Jahr 2100 im Vergleich zum vorindustriellen Wert.

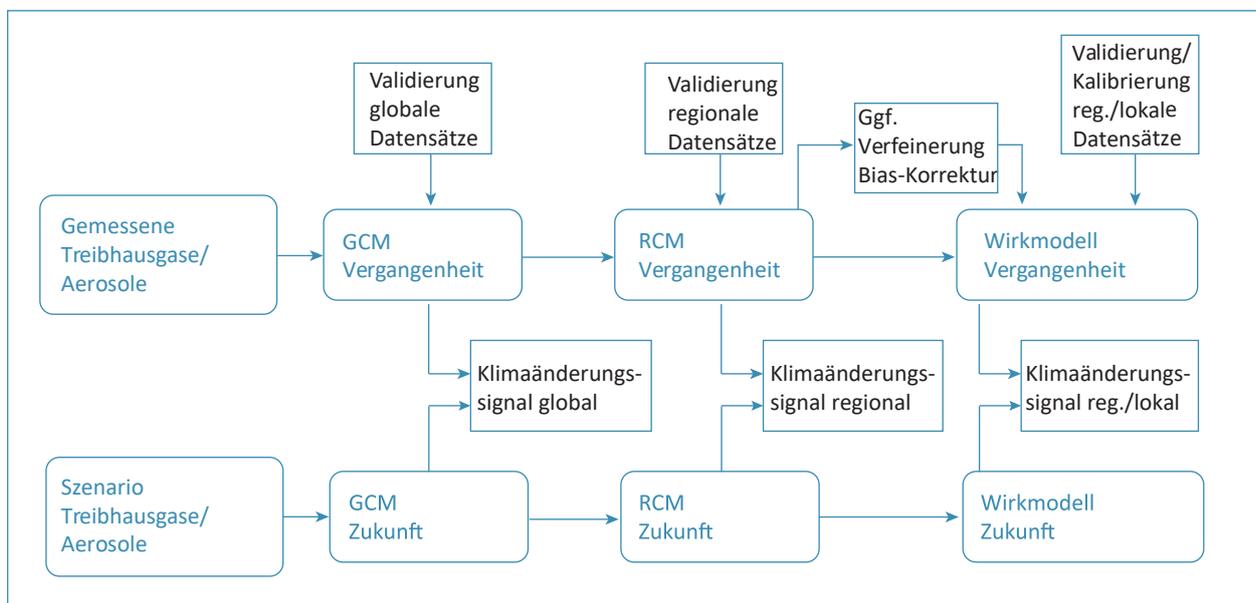
Van Vuuren et al. [6] beschreiben in ihrer Veröffentlichung den Entwicklungsprozess der RCP-Szenarien, wonach das Eintreffen des RCP2.6-Szenarios bedeutet, dass die globalen Treibhausgas-Emissionen bis zum Jahr 2080 netto auf null heruntergefahren werden müssen; außerdem werden dabei Technologien zur Reduzierung der  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre berücksichtigt, so dass im Jahr 2100 eine Treibhausgas-Konzentration von 400 ppm  $CO_2$ -Äquivalent vorliegt. Die vorindustrielle  $CO_2$ -Konzentration lag bei rund 280 ppm [3]. Aktuell liegt die  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre hingegen bereits bei rund 415 ppm [7]. Mit dem RCP2.6-Szenario würde das Klimaschutz Übereinkommen von Paris, d.h. das 2°-Ziel, eingehalten werden. Das Eintreffen des RCP8.5-Szenarios bedeutet, dass kaum Maßnahmen zur Verringerung der Treibhausgas-Emissionen umgesetzt werden, so dass die Treibhausgas-Konzentration 2100 bei rund 1.370 ppm  $CO_2$ -Äquivalent liegt.

Van Vuuren et al. [6] stellten fest, dass 20 Veröffentlichungen das RCP2.6-Szenario als realistisch ansehen. Hingegen in 118 Veröffentlichungen das RCP4.5-Szenario und in 10 Veröffentlichungen das RCP6.0-Szenario als realistisch angesehen wird. In 40 Veröffentlichungen wird davon ausgegangen, dass die zukünftige Entwicklung dem RCP8.5-Szenario entspricht. Aktuelle Stimmen sagen allerdings, dass das RCP8.5-Szenario eher als Worst-Case-Szenario anzusehen ist, da in vielen Ländern der Welt bereits deutliche Maßnahmen zum Klimaschutz ergriffen werden[8].

Im aktuell in Bearbeitung befindlichen sechsten IPCC-Sachstandsbericht werden die SSP-Szenarien (Shared Socioeconomic Pathways, englisch für gemeinsame sozioökonomische Entwicklungspfade) zugrunde gelegt. Die neuen Szenarien wurden eingeführt, um das innerhalb der SRES- bzw. RCP-Szenarien zugrunde gelegte Vorgehen - Treibhausgasemissionsszenarien bzw. anthropogener Strahlungsantrieb - zu kombinieren.

## Modellkette

Globale Klimamodelle decken das Klimasystem des gesamten Globus ab, benötigen jedoch eine relativ große Rechenleistung. Regionale Klimamodelle decken hingegen nur einen Teil des Globus ab und bieten daher den Vorteil einer vergleichsweise höheren Auflösung mit vertretbarem Rechenaufwand. Die Ergebnisse der globalen Modelle dienen den regionalen Modellen an ihren Rändern als Eingangsgrößen.



Modellkette vom Emissionsszenario zum Wirkmodell, Abbildung nach [9]

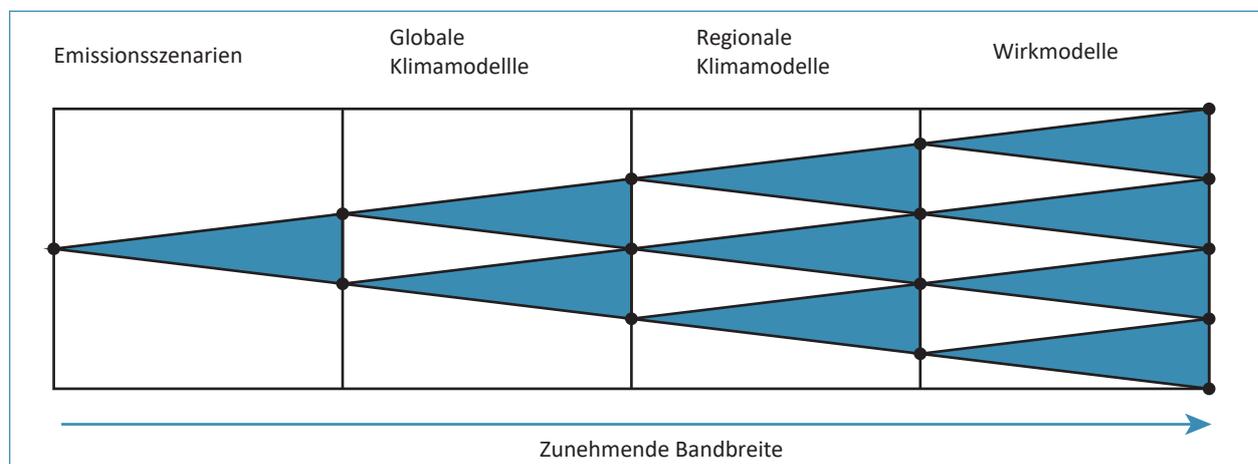
Weltweit werden verschiedene globale Modelle (häufig auch globales Zirkulations-Modell, englisch: GCM) und regionale Modelle (häufig auch regionales Zirkulations-Modell, englisch: RCM) von unterschiedlichen Forschergruppen betrieben. In Deutschland betreibt das Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) in Hamburg zwei globale Modelle (MPI-ESM, ICON-ESM) und ein regionales Modell (REMO), der Deutsche Wetterdienst (DWD) und andere betreiben ebenfalls ein regionales Modell (CCLM).

Streng genommen sind die globalen Zirkulations-Modelle die Vorläufer der neuesten Generation von Klimamodellen, den sogenannten Erdsystem-Modellen (ESM). Im Gegensatz zu den GCMs können ESMs die Rückkopplungen zwischen den einzelnen Klimakomponenten z.B. im Kohlenstoffkreislauf oder den Eisschilden berücksichtigen. Die ESMs wurden bereits im fünften IPCC-Sachstandsbericht berücksichtigt. Globale sowie regionale Klimamodelle werden anhand von Beobachtungsdaten überprüft (validiert) um anschließend basierend auf Treibhausgas-Szenarien mögliche zukünftige Änderungssignale zu projizieren. Die Ergebnisse verschiedener Forschergruppen weltweit

werden im Rahmen des Coupled Model Intercomparison Projects (CMIP) des World Climate Research Programms (WCRP) koordiniert und ausgewertet und dienen den IPCC-Sachstandsberichten als Grundlage.

Klimamodelle erlauben zunächst nur Aussagen über klimatische Änderungen. Für Aussagen über die Auswirkungen der klimatischen Änderungen werden sogenannte Wirkmodelle (auch Impaktmodelle) mit den Ergebnissen der Klimaprojektionen betrieben, um beispielsweise Aussagen über die Änderung des Abflusses oder der Wellenhöhe zu treffen. Klimamodelle können dazu neigen, die Beobachtungsdaten systematisch zu über- oder unterschätzen (BIAS). Diese Abweichungen können sich über lange Zeiträume zu relevanten Abweichungen addieren. Daher kann es ggf. notwendig sein, diesen systematischen Fehler anhand von Beobachtungsdaten zu korrigieren (BIAS-Korrektur). Alternativ können relative Änderungen betrachtet werden, die den systematischen Fehler gleichermaßen in der Vergangenheit wie auch in der Zukunft beinhalten. Die Güte der Ergebnisse von Wirkmodellen wird ebenso wie bei den Klimamodellen anhand von Beobachtungsdaten validiert.

Grundsätzlich pflanzen sich die Unsicherheiten in der Modellkette Globalmodell-Regionalmodell-Wirkmodell fort. Damit anhand der Wirkmodelle ein aussagekräftiges Bild über mögliche zukünftige Änderungen gezeichnet werden kann, sind die jeweiligen Klimaszenarien differenziert zu betrachten und dabei jeweils die Bandbreite der Ensembles zu berücksichtigen. Wegen des sich aus der Vielzahl an Modellläufen ergebenden hohen Rechenaufwands, stellt eine Anwendung von Wirkmodellen für die Ableitung konkreter Anpassungsmaßnahmen eine große Herausforderung dar [9].



Zunahme der Bandbreite an möglichen Auswirkungen innerhalb der Modellkette, Abbildung nach [9]

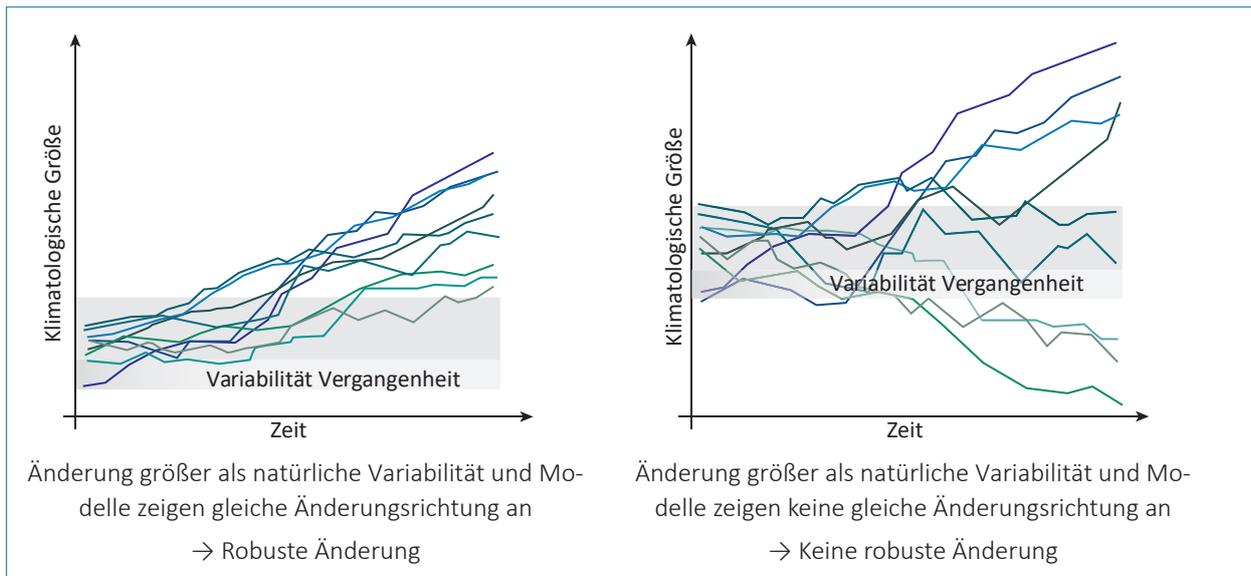
## Änderungssignal

Das Änderungssignal, d.h. die Größe der zukünftig zu erwartenden Änderung klimatischer Parameter ist Ausgangspunkt für die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen. Neben der Unsicherheit aufgrund unterschiedlicher Klimaszenarien und der Bandbreite möglicher Änderungssignale innerhalb der Modellkette besteht die Möglichkeit, dass das Klimasignal keine robuste Änderung zeigt.

Ein robustes Änderungssignal setzt voraus, dass die Änderung signifikant ist, d.h. dass das Änderungssignal größer ist als die bisher zu beobachtende natürliche Variabilität. Liegt das Änderungssignal innerhalb der natürlichen Schwankungsbreite ist es somit nicht klar als durch den Klimawandel verursachtes Signal zu detektieren.

Zusätzlich zur Signifikanz müssen die Signale unterschiedlicher Modellläufe bzw. Modell-Ensembles in die gleiche Änderungsrichtung, d.h. Zu- oder Abnahme, zeigen. Eine solch einheitliche Änderungsrichtung innerhalb eines Ensembles ist nicht automatisch gegeben.

Sind beide Voraussetzungen gegeben, d.h. Signifikanz und gleiche Änderungsrichtung, kann eine Änderung als robust angesehen werden.

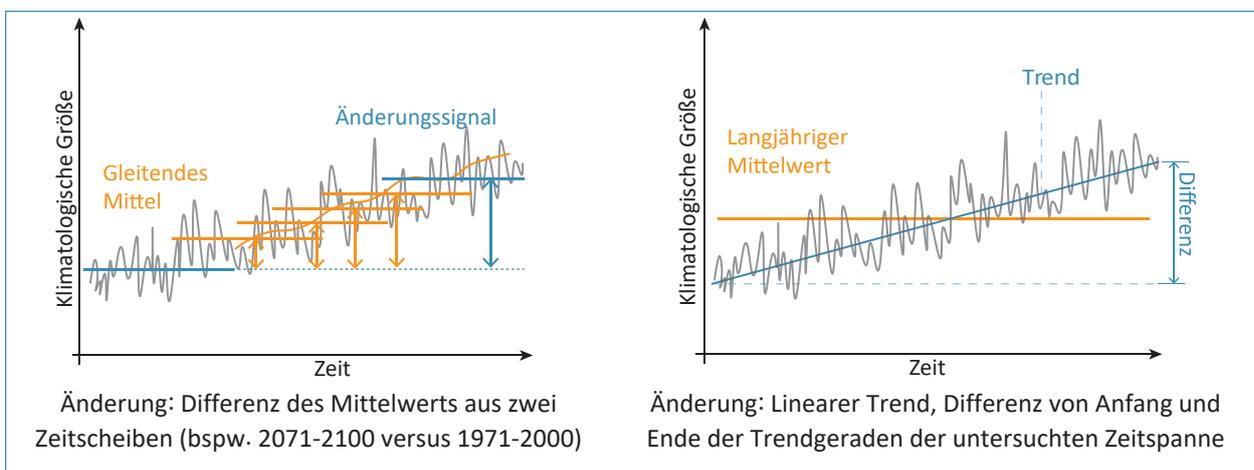


Änderungssignal einer klimatischen Größe. Links: Robuste Änderung, rechts: Keine robuste Änderung. Abbildung nach [10]

Die Größe des Änderungssignals wird häufig als Differenz des Mittelwerts aus zwei Zeitscheiben (beispielsweise 2071-2100 versus 1971-2000) beschrieben, wobei Zeitscheiben über einen Zeitraum von 30 Jahren eine Klimaperiode abdecken. Einzelne Jahre können nicht miteinander verglichen werden, da sie keine Informationen über die langfristigen Änderungen des Klimasignals enthalten.

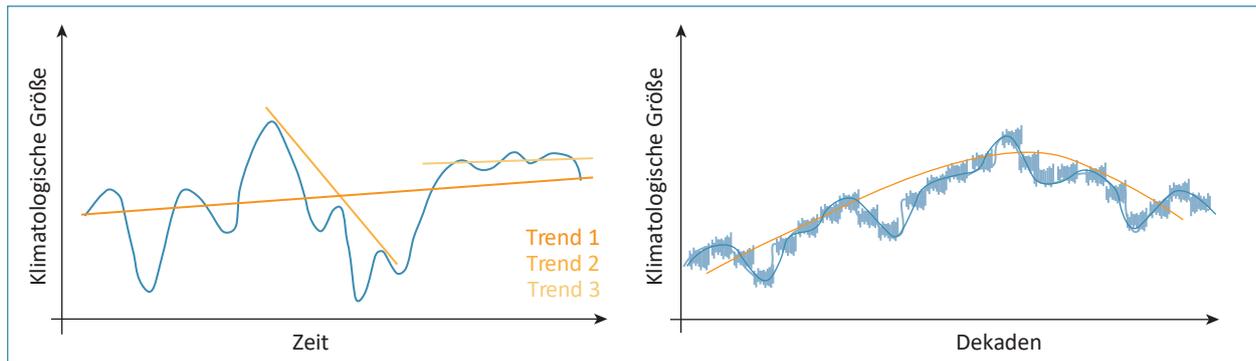
Anhand des gleitenden Mittelwerts über eine Klimaperiode, wird eine fortschreitende Veränderung aufgezeigt.

Alternativ kann zur Bestimmung der Größe des Änderungssignals die Differenz von Anfang und Ende einer Trendgeraden (linearer Trend) der untersuchten Zeitspanne heran gezogen werden.



Änderungssignal einer klimatischen Größe. Links: Differenz aus zwei Zeitscheiben, rechts: Linearer Trend. Abbildung nach [10]

Bei der Untersuchung von Trends ist sowohl bei Beobachtungsdaten, d.h. historischen Daten, als auch bei Klimaprojektionen Vorsicht hinsichtlich der Repräsentativität des untersuchten Trends geboten. Klimaprojektionen umfassen jedoch per se längere Zeiträume, so dass die Aussage vor allem für kurze historische Zeiträume relevant ist, es sei denn, der Parameter zeigt eine ausgeprägte dekadische Variabilität, dann sind in jedem Fall (historisch/ zukünftig) lange Zeiträume essentiell!



Links: Je nach Beobachtungszeitraum finden sich verschiedene Trends innerhalb der Zeitreihe. Rechts: Die Zeitreihe weist eine dekadische Variabilität auf. Abbildung nach [11]

### Weiterführende Informationen

#### Grundlagen des Klimawandels

DWD – Klima und Umwelt, [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaumwelt\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaumwelt_node.html)

Hamburger Bildungsserver, <https://bildungsserver.hamburg.de/klimawandel>

Klimafakten, <https://www.klimafakten.de>

Klimanavigator, <https://klimanavigator.eu>

Deutsches Klima Konsortium - Zukunft der Meeresspiegel, [https://www.deutsches-klima-konsortium.de/fileadmin/user\\_upload/pdfs/Publikationen\\_DKK/dkk-kdm-meeresspiegelbroschuere-web.pdf](https://www.deutsches-klima-konsortium.de/fileadmin/user_upload/pdfs/Publikationen_DKK/dkk-kdm-meeresspiegelbroschuere-web.pdf).

International Panel on Climate Change (IPCC, international), <https://www.ipcc.ch>

#### Klimamodelle

DWD – Klimaprojektionen und Klimavorhersagen – Wie entstehen Aussagen über das zukünftige Klima?, [https://www.dwd.de/SharedDocs/broschueren/DE/klima/broschuere\\_klimaforschung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.dwd.de/SharedDocs/broschueren/DE/klima/broschuere_klimaforschung.pdf?__blob=publicationFile&v=5)

Hamburger Bildungsserver - Klimamodelle, <https://bildungsserver.hamburg.de/klimamodelle>

Max-Planck-Gesellschaft - Klimamodelle, <https://www.mpg.de/7050041/klimamodelle>

DWD – Klimaszenarien (Zukunft), [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimaszenarien/klimaszenarien\\_homenode.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimaszenarien/klimaszenarien_homenode.html)

Hamburger Bildungsserver – Klimaszenarien, <https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimaszenarien>

### Autoren

Hochschule Wismar  
Professur für Wasserbau und Hydromechanik  
Prof. Dr.-Ing. Bärbel Koppe  
[baerbel.koppe@hs-wismar.de](mailto:baerbel.koppe@hs-wismar.de)

Hochschule Bremen  
Institut für Wasserbau  
Dipl.-Ing. Lena Lankenau

Stand: April 2021

| 8

## Referenzen

- [1] [https://worldoceanreview.com/wp-content/uploads/2010/10/k1\\_kompo\\_klimasystem.jpg](https://worldoceanreview.com/wp-content/uploads/2010/10/k1_kompo_klimasystem.jpg)
- [2] <https://www.spektrum.de/news/wie-ein-klimamodell-entsteht/1781331>
- [3] IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. International Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- [4] [https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimavorhersagen/hilfe/klimamodelle/start/\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimavorhersagen/hilfe/klimamodelle/start/_node.html)
- [5] IPCC (2014): Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen. Unter Mitarbeit von Hauptautoren, R.K. Pachauri und L.A. Meyer. International Panel on Climate Change, Genf, Schweiz. Bonn, 2016: Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle.
- [6] van Vuuren, D. P.; Edmonds, J.; Kainuma, M.; Riahi, K.; Thomson, A.; Hibbard, K. et al. (2011): The representative concentration pathways. An overview. In: Climatic Change 109 (1-2), S. 5–31. DOI: 10.1007/s10584-011-0148-z.
- [7] <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>
- [8] Hausfather, Z.; Peters, G. P. (2020): Emissions - the ‚business as usual‘ story is misleading. In: Nature 577 (7792), S. 618–620. DOI: 10.1038/d41586-020-00177-3.
- [9] Linke, C. et al. (2020): Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgesprächs "Interpretation regionaler Klimamodelldaten". Potsdam. Online verfügbar unter <https://lfu.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/Leitlinien-Klimamodelldaten.pdf>.
- [10] Bayerisches Landesamt für Umwelt, Klima, <https://www.lfu.bayern.de/klima/index.htm>
- [11] [https://www.schulprojekt-klimawandel.de/imperia/md/content/csc/j/csc\\_jt2014\\_jacob.pdf](https://www.schulprojekt-klimawandel.de/imperia/md/content/csc/j/csc_jt2014_jacob.pdf)