

Hessisches Landesamt
für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Fachzentrum Klimawandel und Anpassung

HESSEN



Klimawandel in der Zukunft

Klimawandel in Hessen

Vollständig überarbeitet
und aktualisiert: 2018



Impressum

Reihe: Klimawandel in Hessen

Redaktion: Dr. H. Hübener (HLNUG), Dr. F. Kreienkamp (DWD)

Layout: C. Zarda

Herausgeber, © und Vertrieb:

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Fachzentrum Klimawandel und Anpassung
Rheingaustraße 186
65203 Wiesbaden

Telefon: 0611 6939-111

Telefax: 0611 6939-113

E-Mail: vertrieb@hlnug.hessen.de

www.hlnug.de

Stand: September 2018

Überarbeitete und aktualisierte Fassung

Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.



*Prof. Dr. Thomas Schmid
Präsident des
Hessischen Landesamtes für
Naturschutz, Umwelt und Geologie*

Vorwort

Den Klimawandel hat es schon immer gegeben. Aber noch nie hat menschliches Handeln das Klima so schnell und so deutlich beeinflusst wie in den letzten Jahrzehnten. Durch klimafreundliches Leben und Wirtschaften können wir den Klimawandel in der Zukunft beeinflussen, aber ganz vermeiden können wir ihn nicht mehr. Und die aktuelle Entwicklung der weltweiten Emissionen klimaschädlicher Gase gibt Anlass zu Befürchtungen einer sehr starken Erwärmung in der Zukunft, wenn es uns nicht gelingt, sehr bald und sehr wirkungsvoll umzusteuern.

Viele hessische Bürgerinnen und Bürger haben dazu Fragen: Was kommt mit dem Klimawandel auf uns zu? Was können wir noch verhindern und was nicht? Woher weiß man überhaupt, wie das Klima der Zukunft werden wird und wie belastbar ist dieses Wissen?

In dieser Broschüre erläutern wir, wie der Blick in die Zukunft – die sogenannte Klimaprojektion – erzeugt wird. Wir beleuchten die Frage der Verlässlichkeit der Klimaprojektionsdaten und geben eine Vorstellung davon, was das Klima der Zukunft für Hessen bringt.

Weitergehende Informationen bietet das HLNUG über seine Internetseiten, über zusätzliche Informationsmaterialien und über Auskunft der Expertinnen und Experten im Fachzentrum Klimawandel und Anpassung an.



Je mehr Kohle, Öl und Erdgas – also fossile Brennstoffe – wir nutzen, desto mehr heizen wir der Atmosphäre ein. Egal ob zur Energieproduktion, zur Fortbewegung oder zum Heizen: Wir verbrauchen derzeit große Mengen dieser Stoffe und emittieren dadurch klimawirksame Treibhausgase (THG), vor allem Kohlendioxid (CO_2). Neben CO_2 tragen noch weitere THG zum Klimawandel bei, z. B. Methan und Lachgas, die überwiegend in der Landwirtschaft entstehen. Und je mehr Treibhausgase wir heute und in Zukunft freisetzen, desto stärker verändern wir unser Klima. Unser heutiges Verhalten bestimmt also das Klima der Zukunft.

Der Klimawandel hat auch in Hessen vielfältige Folgen: z. B. für den Wasserhaushalt, für die Land- und Forstwirtschaft und für die menschliche Gesundheit. Wenn Sie mehr über die Folgen des Klimawandels in Hessen erfahren möchten, können Sie weitere Broschüren aus der Reihe „Klimawandel in Hessen“ im Internet oder per Post vom HLNUG erhalten.



Szenarien für die Zukunft

Um das Klima der Zukunft zu erforschen, wurden von Ökonomen und Sozialwissenschaftlern mögliche **Szenarien** entworfen. Diese berücksichtigen z. B. die globale Bevölkerungsentwicklung, den Energieverbrauch und die Energieerzeugung, die Mobilität, die Ernährung, die Transporte und das Konsumverhalten.

Die Zukunftsszenarien wurden bis zum Jahr 2011 auf Basis von Treibhausgas-Emissionen erstellt. Die aktuellen Szenarien stellen dagegen repräsentative Konzentrationspfade dar (engl.: Representative Concentration Pathways, kurz RCP).

Es gibt die Szenarien RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 und RCP8.5. Die Zahlen beziehen sich auf die Stärke der Klimawirkung am Ende dieses Jahrhunderts. Je größer die Zahl ist, desto stärker ist die Wirkung auf das Klimasystem: z. B. wird beim RCP2.6 am Ende des Jahrhunderts der Klimawandel so sein, als

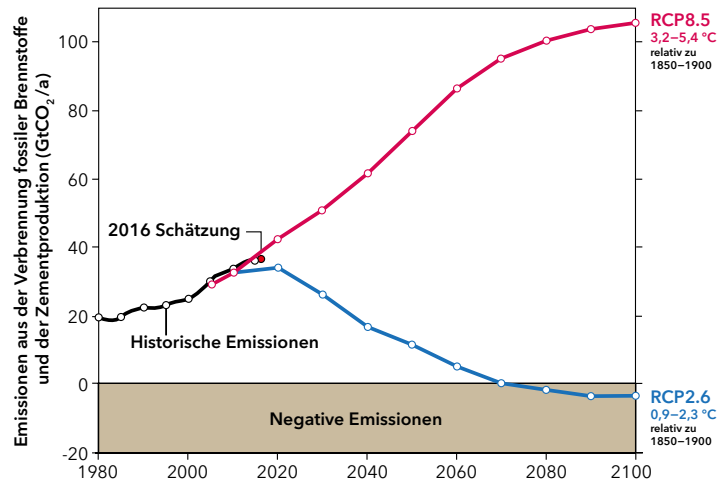
würde die Sonne auf jeden m^2 der Erde zusätzlich $2,6 \text{ W/m}^2$ einstrahlen, bei RCP8.5 sogar $8,5 \text{ W/m}^2$.

Wenn wir so weiter machen wie bisher, müssen wir mit einem sehr starken Klimawandel rechnen, der ungefähr dem höchsten Szenario (**RCP8.5**) entspricht. Wir nennen dieses Szenario daher in dieser Broschüre das „**Weiter-wie-bis-her-Szenario**“.



Die Weltgemeinschaft hat bei der Weltklimakonferenz in Paris im Dezember 2015 das Ziel formuliert, die Erderwärmung auf maximal 2° über dem Niveau der vorindustriellen Zeit (ca. 1850) zu begrenzen. Dazu müssten die Treibhausgas(THG)-Emissionen der Industrie-

länder, also auch die von Deutschland, bis 2050 um 90 % im Vergleich zu 1990 reduziert werden, und die THG-Emissionen der anderen Länder dürften nicht zu stark ansteigen. Um das 2 °C-Ziel einzuhalten, müssten wir dem niedrigsten Szenario folgen, dem Szenario **RCP2.6**. Wir nennen dieses Szenario daher in dieser Broschüre das „**Klimaschutz-Szenario**“.



Die derzeitige Entwicklung der THG-Konzentrationen liegt jedoch am oberen Rand der in den Szenarien angenommenen Verläufe. Wir bewegen uns also momentan eher auf das „Weiterwie-bisher-Szenario“ zu.

Entwicklung der beobachteten CO₂-Emissionen (schwarz) sowie der beiden Zukunftsszenarien „Weiterwie-bisher“ (rot) und „Klimaschutz“ (blau). Für das Klimaschutz-Szenario müssten am Ende des Jahrhunderts sogar THG aus der Atmosphäre entfernt werden („negative Emissionen“).

Eigene Darstellung nach: http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/archive/2016/GCP_CarbonBudget_2016.pdf

Wie berechnet man das Klima der Zukunft?

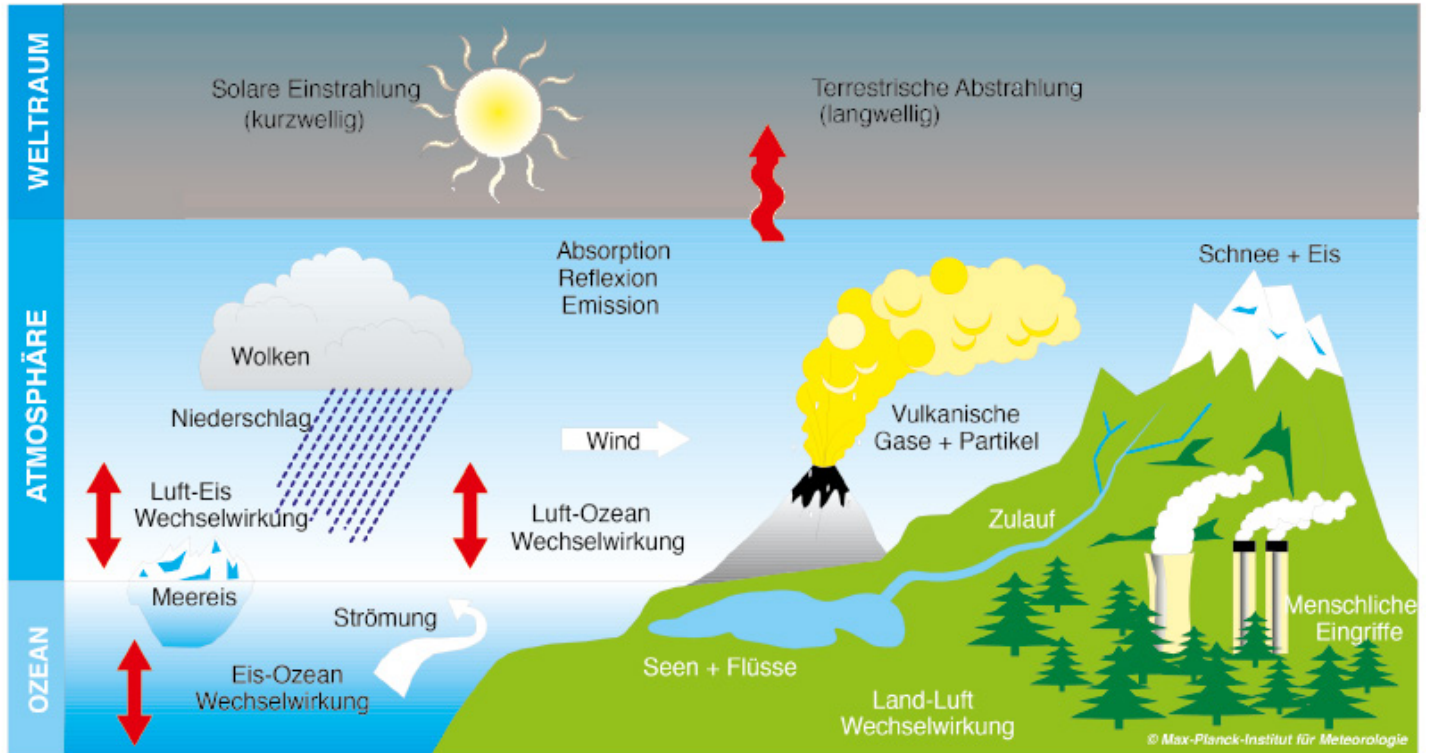
Neben dem CO_2 -Gehalt der Atmosphäre werden auch die Konzentrationen weiterer Treibhausgase (z. B. Methan, Lachgas) berücksichtigt, indem sie entsprechend ihrer Klimawirksamkeit in einen äquivalenten Wert für CO_2 umgerechnet und hinzuaddiert werden. Mit der resultierenden Entwicklung der THG-Konzentration in der Luft werden dann Klimamodelle gespeist.



Ein globales Klimamodell ist ein Computerprogramm, das das Klimasystem der Erde (also Luft, Erdboden, Ozeane, Eisflächen usw.) mit physikalischen Gleichungen beschreibt. So werden Temperatur, Wind, Sonnenschein und weitere Eigenschaften des Klimas simuliert. Vorgänge, die zu komplex oder zu klein sind, um im Detail simuliert zu werden (z. B. einzelne Wolken oder Regen), werden nur näherungsweise beschrieben. Was sich in allen genannten Größen bei steigenden (oder fallenden) THG-Konzentrationen verändert, wird vom Modell simuliert.

Natürlich kann ein Computermodell das komplexe System des Klimas nicht exakt simulieren, sondern Vieles muss vereinfacht werden. Trotzdem bilden diese Modelle im Allgemeinen das heutige Klima und das Klima der Vergangenheit (z. B. der letzten Eiszeit oder Warmzeit) ab. Ist dies der Fall, dann können wir erwarten, dass die Modelle auch das Klima der Zukunft plausibel simulieren.

Das Klimasystem der Erde



Quelle: Hamburger Bildungsserver.



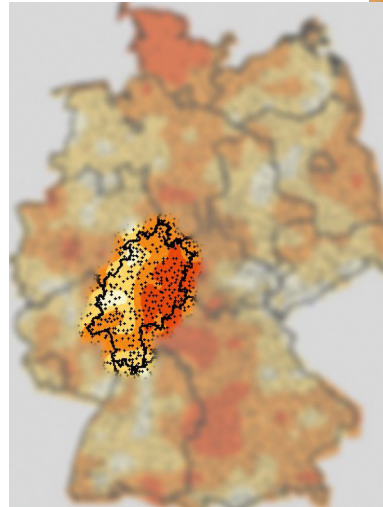
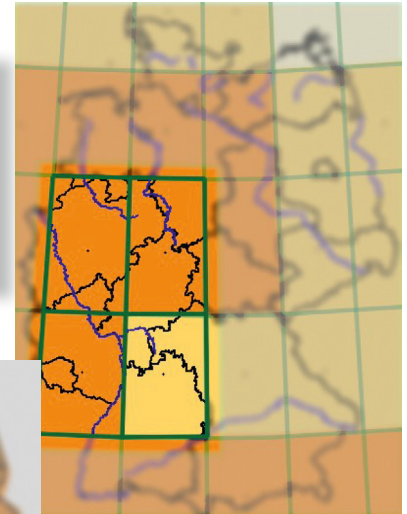
Max-Planck-Institut
für Meteorologie

Von der globalen Skala nach Hessen

Die beschriebenen **globalen Klimamodelle** simulieren das Klima der Erde in Gitterboxen mit einer Seitenlänge von ca. 100 bis 300 km. Das ist natürlich viel zu grob, um das Klima von Hessen darzustellen. Deshalb werden sogenannte **regionale Klimamodelle** eingesetzt. Diese berechnen die Klimaänderung nur für einen Ausschnitt der Erde, dafür aber mit höherer Auflösung.

In den **dynamischen** regionalen Klimamodellen wird die gleiche Methodik verwendet wie in den globalen Modellen, jedoch nur für einen Ausschnitt des Globus. In den **statistischen** regionalen Klimamodellen wird der statistische Zusammenhang zwischen Beobachtungen an Wetter- oder Klimastationen mit der globalen Zirkulation der Atmosphäre ausgewertet. Dieser Zusammenhang wird in die Zukunft übertragen und liefert Ergebnisse für die Punkte, an denen die Beobachtungsstationen stehen.

Beispiel für eine Auflösung eines globalen Klimamodells: Für jedes Kästchen gibt es einen Wert für z. B. Niederschlag. Dieser ist ein Mittelwert über das ganze Kästchen.



Beispiel für eine Auflösung eines statistischen regionalen Klimamodells: Für jeden Punkt gibt es einen Wert (hier: Niederschlag), dazwischen wird interpoliert.

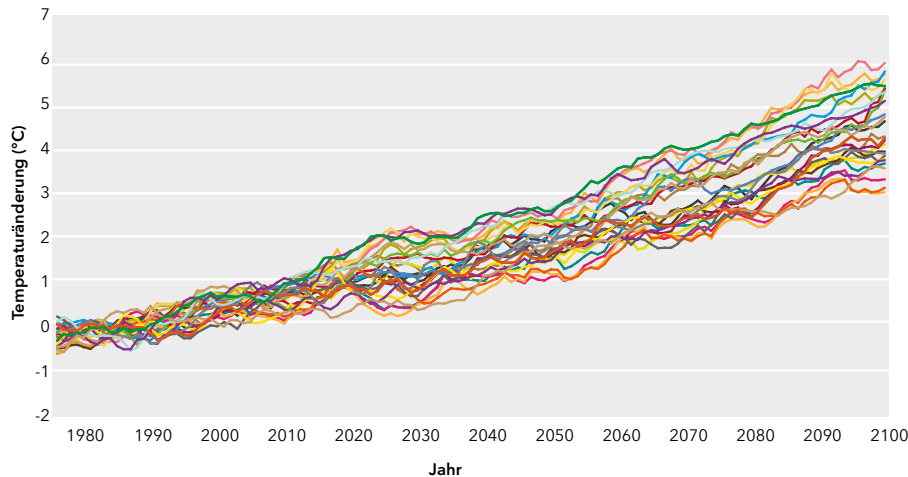
Modell-Ensemble

Da kein – globales oder regionales – Modell perfekt ist und alle Modelle unterschiedliche Stärken und Schwächen haben, werden in der Klimawissenschaft üblicherweise Ergebnisse von möglichst vielen verschiedenen Klimamodellen betrachtet (sog. Ensemble von Modellen). Alle Simulationsergebnisse für die Zukunft von Modellen, die das Klima der Gegenwart und der Vergangenheit

plausibel darstellen, gelten daher als gleich wahrscheinliche und mögliche Entwicklungen des Klimas in der Zukunft.

Die Abbildung zeigt die Änderung der Jahresmitteltemperatur in Hessen für das Weiter-wie-bisher-Szenario. Im Mittel simulieren die Modelle für dieses Szenario einen Temperaturanstieg von ca.

3,9 °C für den Zeitraum 2071–2100 im Vergleich zur Referenzperiode (1971–2000). Die Bandbreite der Erwärmung in den einzelnen Modellen reicht dabei von +2,6 °C bis +5,1 °C.

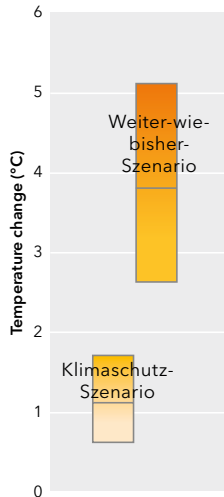


Quelle: Projekt ReKliEs-De, HLNUG

Temperaturänderung in Hessen

Von der vorindustriellen Zeit bis heute (Referenzzeitraum 1971–2000) ist die Mitteltemperatur in Hessen bereits um ca. 0,9 °C angestiegen.

In der Graphik links ist die Änderung der Jahresmitteltemperatur bis zum Ende dieses Jahrhunderts (2071–2100) im Vergleich zum Ende des letzten Jahrhunderts (1971–2000) dargestellt.



Bei Einhaltung des globalen 2 °C-Zieles (Klimaschutz-Szenario) würde Hessen im Jahresmittel im Vergleich zur Referenzperiode 1971–2000 um ca. 1,1 °C wärmer (Bandbreite: 0,6 bis 1,7 °C). Im Weiter-wie-

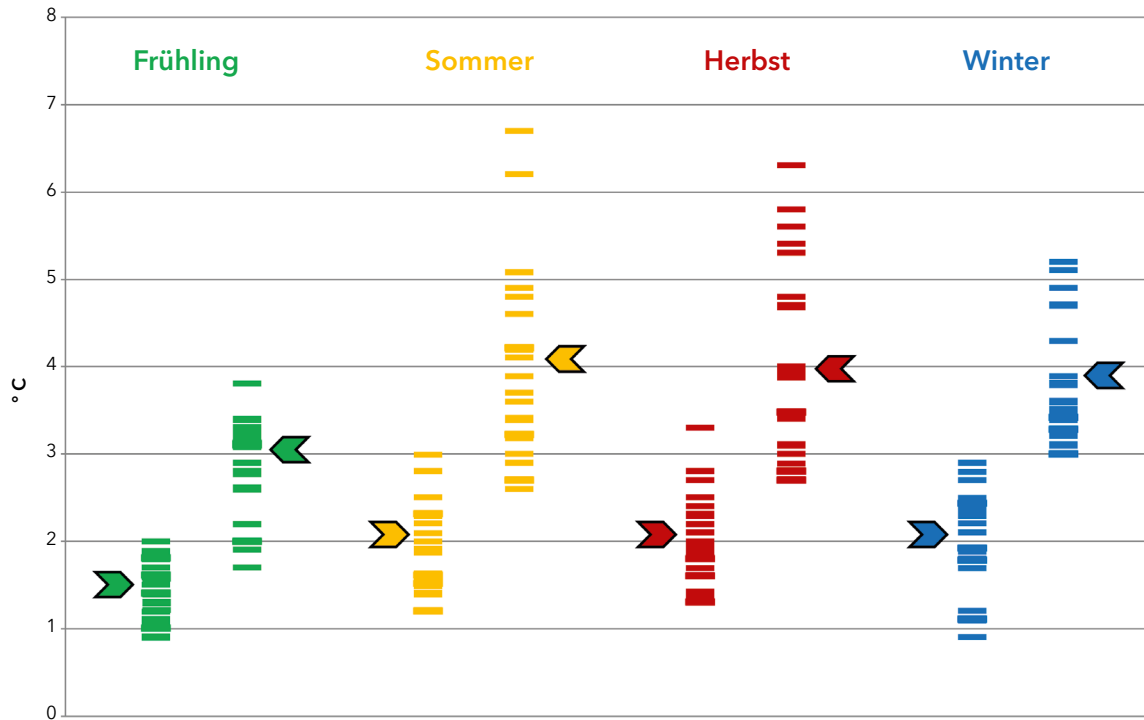
Simulierte Änderung der Jahresmitteltemperatur in °C bis zum Ende dieses Jahrhunderts (2071–2100) im Mittel über ganz Hessen im Vergleich zu 1971–2000. Links: Klimaschutz-Szenario (12 Modellkombinationen), rechts: Weiter-wie-bisher-Szenario (27 Modellkombinationen). Die Höhe der Balken zeigt die Bandbreite der verschiedenen Modellergebnisse, die Linie zeigt den Mittelwert.

bisher-Szenario läge die Erwärmung bei ca. 3,9 °C (Bandbreite: 2,6 bis 5,1 °C) gegenüber dem Zeitraum 1971–2000.

Auch wenn die Temperaturzunahme je nach Modell unterschiedlich stark ausfällt, bleibt die eindeutige Grundaussage bestehen, dass die Temperatur weiter ansteigen wird und zwar umso stärker, je mehr Treibhausgase wir emittieren.

Die Graphik rechts zeigt die Erwärmung in den Jahreszeiten für das Weiter-wie-bisher-Szenario, jeweils für die Mitte des Jahrhunderts (2031–2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071–2100) im Vergleich zur Gegenwart (Referenzperiode 1971–2000) für alle 27 ausgewerteten Modellkombinationen. Die Erwärmung ist in allen Jahreszeiten am Ende des Jahrhunderts stärker als in der Mitte des Jahrhunderts. Zudem findet der geringste Temperaturanstieg im Frühling statt, was darauf schließen lässt, dass auch in der Zukunft immer noch relativ kühle Frühjahre und Spätfröste eintreten können.

Temperaturänderung in den Jahreszeiten



Änderung der jahreszeitlichen Mitteltemperatur in Hessen (°C), 27 Modellkombinationen, Weiter-wie-bis-her-Szenario, links: 2031-2060, rechts: 2071-2100 jeweils im Vergleich zu 1971-2000. Pfeil: Mittelwert

Zunahme von heißen Tagen, Abnahme von kalten Tagen

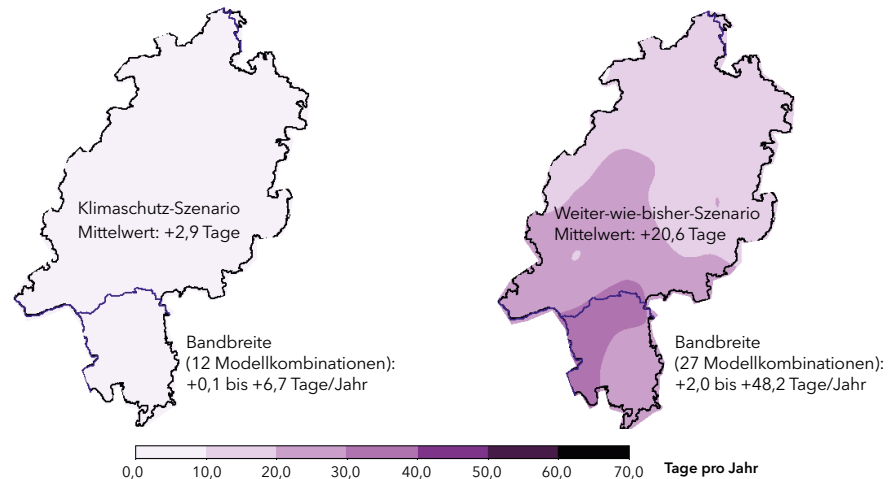
Heiße Tage, d.h. Tage, an denen die Tageshöchsttemperatur bei 30 °C oder darüber liegt, traten im Zeitraum 1971 bis 2000 im Mittel über ganz Hessen an 6,1 Tagen pro Jahr auf. In dem besonders heißen Sommer 2003 lag die Anzahl der heißen Tage bei knapp 23 Tagen, also 17 Tage über dem Durchschnitt des Zeitraumes 1971-2000.

Selbst für das Klimaschutz-Szenario müssen wir bis Ende des Jahrhunderts mit einer Zunahme der heißen Tage um ca. 3 Tage pro Jahr rechnen (die Bandbreite der Modellsimulationen reicht von kaum einer Änderung bis zu einer Verdoppelung des Wertes aus der Referenzperiode 1971-2000).

Zunahme der Anzahl heißer Tage ($T_{max} > 30\text{ °C}$) 2071-2100 im Vergleich zu 1971-2000.

Für das Weiter-wie-bisher-Szenario müssen wir bis 2071-2100 mit über 20 zusätzlichen heißen Tagen pro Jahr rechnen (im Extremfall könnten es sogar 48 zusätzliche heiße Tage pro Jahr werden!).

Falls das Weiter-wie-bisher-Szenario eintritt, würde spätestens gegen Ende dieses Jahrhunderts ein Sommer wie 2003 bei uns als normal oder sogar als eher kühl bewertet werden.



Wie unter solchen Bedingungen ein besonders heißer Sommer aussehen könnte, wissen wir heute noch nicht. Die bisherigen Erfahrungen aus den extrem warmen Sommern 2003 und 2018 lassen uns nur eine Vorstellung davon gewinnen, wie es im Mittel werden könnte, nicht aber davon, wie es im Extremfall wird.

Auf der anderen Seite können wir davon ausgehen, dass die Zahl der besonders kalten Tage abnehmen wird. Sowohl die Frosttage (Tages**tiefst**temperatur unter 0 °C) als auch die Eistage (Tages**höchst**temperatur unter 0 °C) werden abnehmen; im Weiter-wie-bisher-Szenario deutlich stärker als im Klimaschutz-Szenario. Allerdings wird es in beiden hier verwendeten Szenarios und auch bis zum Ende des Jahrhunderts immer noch hin und wieder einen besonders kalten Herbst oder Winter geben oder einen Frühling, in dem noch Spätfrost eintreten kann.



Niederschlagsverschiebung vom Sommer in den Winter

Der Niederschlag kann sich von Ort zu Ort und von einem Tag zum anderen sehr stark unterscheiden. Daher simulieren die Modelle den Niederschlag nicht so realistisch, und die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der verschiedenen Modelle (bzw. Kombinationen aus globalem und regionalem Modell) sind teilweise erheblich.

Alle Modelle zeigen jedoch im **Klimaschutz-Szenario** nur sehr geringe Änderungen von maximal $\pm 15\%$, sowohl im Sommer als auch im Winter. Diese Änderungen sind noch im Rahmen der Jahr-zu-Jahr-Schwankungen des Niederschlags, die wir auch heutzutage erleben. Unsere Natur, Landwirtschaft und Infrastruktur können sich daran anpassen.



Schon unter heutigem Klima können extrem trockene Sommer auftreten wie z. B. 2018. Trockengefallener Altrhein bei Lampertheim, Sommer 2018.



Im **Weiter-wie-bisher-Szenario** werden dagegen deutlich größere Veränderungen simuliert.

Unter diesem Szenario simulieren alle Modellkombinationen im Winter eine Niederschlagszunahme. Diese kann weniger als 10 % oder über 40 % betragen. Da der Niederschlag wegen der Erwärmung häufiger als Regen und seltener als Schnee fallen wird, nimmt im Winter die Hochwassergefahr zu.

Für den Sommer simulieren dagegen die meisten Modellkombinationen eine Niederschlagsabnahme. Eine Modellkombination zeigt als Extremfall sogar eine Abnahme des Niederschlages um mehr als die Hälfte (-55 %). Aber auch geringe Niederschlagszunahmen von bis zu 15 % werden von einigen Modellkombinationen simuliert.

Im Winter verursacht der Klimawandel eine Zunahme des Niederschlages.

Mehr Tage mit starkem Niederschlag?

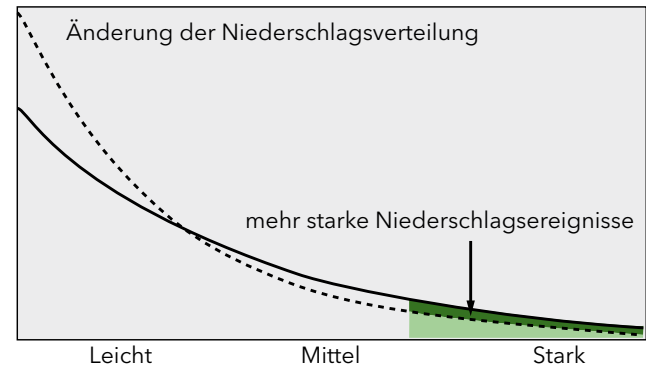
Niederschlagsereignisse, bei denen z. T. mehr als 50 mm Niederschlag pro Tag fallen können, sind sehr selten und treten meist nur lokal an einzelnen Orten auf. Für eine sinnvolle Statistik braucht man aber möglichst viele Einzelwerte, damit die Ergebnisse belastbar sind. Daher wird hier die Anzahl von Starkregentagen mit 20 mm Niederschlag pro Tag oder mehr ausgewertet.

Im Mittel über ganz Hessen kamen im Referenzzeitraum 1971–2000 solche Tage nur 4,3 mal pro Jahr vor, in den Mittelgebirgsregionen etwas häufiger, in den Niederungen seltener. Allerdings treten solche Starkregen nicht jedes Jahr auf. Es kann Jahre ganz ohne Starkregeneignisse geben, in anderen Jahren können dafür 10 solcher Ereignisse eintreten.

Für das **Weiter-wie-bisher-Szenario** simulieren alle 27 Modellkombinationen eine Zunahme der Starkregentage. Die Zahl der Tage mit 20 mm Niederschlag oder mehr nimmt im Mittel über alle Simulationen um 1,7 Tage pro Jahr zu. Die Band-

breite dieser Ergebnisse beträgt +0,6 bis +3,4 zusätzliche Starkregentage pro Jahr.

Im **Klimaschutz-Szenario** ändert sich die Anzahl der Starkregentage im Mittel über alle zwölf Modellkombinationen nur minimal: Sie nimmt um +0,3 Tage pro Jahr zu. Die Bandbreite beträgt hier von -0,1 bis zu +1,0 Tage pro Jahr.



Eigene Darstellung nach IPCC, 2013

Schema der Änderung des Niederschlages: Gestrichelte Linie = heutige Verteilung; durchgezogene Linie = zukünftige Verteilung. Durch den Klimawandel erwarten wir weniger leichte Niederschlagsereignisse und mehr intensive Niederschlagsereignisse.



Auch wenn diese Änderungen gering erscheinen, kann doch ein einziges Starkregenereignis schon großen Schaden anrichten. Selbst eine geringe Zunahme solcher Tage ist daher problematisch.

Sonne, Wind und Wolken

Bei der Simulation der Verteilung von Sonne und Bewölkung sind die Ergebnisse der verschiedenen Modellkombinationen unterschiedlich. Einige simulieren eine Abnahme der Bewölkung und damit eine Zunahme der Sonnenscheindauer, andere simulieren eine Zunahme der Bewölkung und Abnahme der Sonnenstunden.

Diese Änderungen sind selbst im Weiterwie-bisher-Szenario relativ klein. Die heutigen Jahr-zu-Jahr-Schwankungen zwischen eher sonnenreichen und eher wolkenreichen Jahren sind wesentlich größer als die simulierten Änderungen durch den Klimawandel.

Auch die mittlere Windgeschwindigkeit ändert sich in den Simulationen für die Zukunft nur wenig und uneinheitlich zwischen den verschiedenen Modellkombinationen. Über die Häufigkeit und Stärke von Stürmen ist durch die mittlere Windgeschwindigkeit noch nichts ausgesagt. Stürme sind besonders schwierig zu modellieren, daher kann dazu heute noch keine gesicherte Aussage gemacht werden.



Alle gezeigten Klimaänderungen sind nicht als Vorhersagen zu verstehen, sondern als mögliche Folgen, falls sich die Konzentrationen der Treibhausgase (THG) so entwickeln wie in den zugrunde gelegten Szenarien angenommen.

Das Klimasystem reagiert sehr langsam auf die Veränderung der THG-Konzentrationen in der Atmosphäre: Es dauert Jahrzehnte, bis die dadurch verursachten Klimaänderungen vollständig eingetreten sind. Die Klimaänderungen, die durch die in den letzten Jahrzehnten emittierten THG verursacht wurden, lassen sich nicht mehr vermeiden. Sollte die Weltgemeinschaft den Pfad zum Klimaschutz-Szenario einschlagen, so können viele der hier beschriebenen Folgen noch vermieden werden. Die Chancen dazu schwinden jedoch rapide. Derzeit (2018) bewegt sich die Welt eher auf das Weiter-wie-bisher-Szenario zu.

Alle Klimamodelle stellen die Wirklichkeit nur in einem gewissen Maß dar. Für Temperatur und Niederschlag lässt sich heute eine recht gute Schätzung des zu erwartenden Klimawandels ableiten. Für Stürme, Wind und Wolken sind die Aussagen noch unsicher.

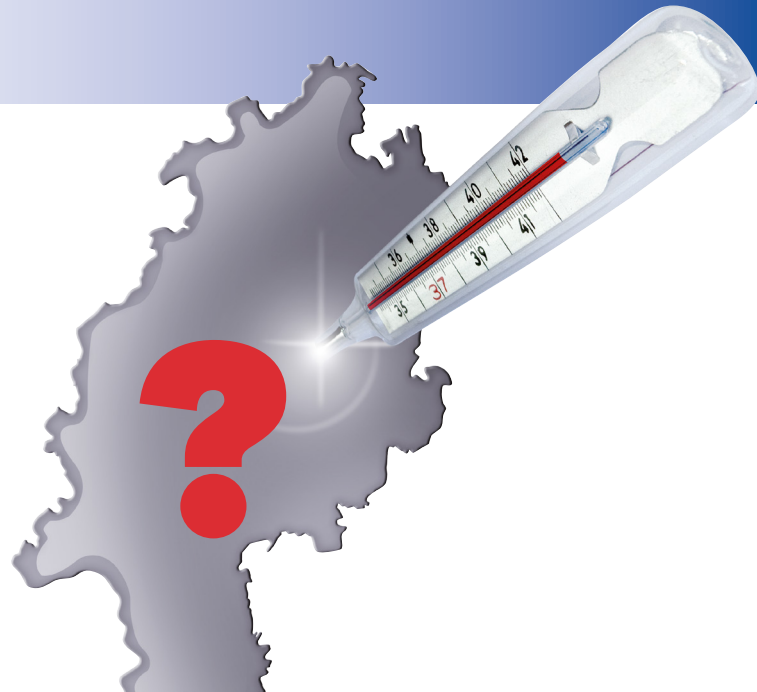


Fazit

In Hessen müssen wir uns in der Zukunft auf steigende mittlere Temperaturen einstellen. Wird das Klimaschutz-Szenario eingehalten, steigen die Temperaturen im Mittel nur um ca. 1,1 °C an, beim Weiter-wie-bisher-Szenario sind es dagegen ca. 3,9 °C. Insbesondere ist mit einer Zunahme von besonders heißen Tagen mit Temperaturen über 30 °C zu rechnen. Trotzdem können aber auch in Zukunft noch gelegentlich kalte Perioden im Winter oder Frühling eintreten, z. B. Spätfröste.

Der Niederschlag wird sich tendenziell vom Sommer in den Winter verlagern und im Winter häufiger als Regen statt als Schnee fallen.

Veränderungen der mittleren Windgeschwindigkeit sowie von Sonnenschein und Bewölkung werden vermutlich gering ausfallen. Diese Aussagen sind aber noch relativ unsicher und werden weiter erforscht.



Weitere Informationen zum Klimawandel und seinen Folgen in Hessen finden Sie auf unseren Internetseiten:

www.klimawandel.hlnug.de
und
www.atlas.umwelt.hessen.de

In der Reihe Klimawandel in Hessen sind bisher folgende Infobroschüren erschienen:

- Beobachteter Klimawandel
- Klimawandel in der Zukunft
- Extreme Wetterereignisse in Hessen
- Klimawandel und Wasser
- Folgen des Klimawandels für die menschliche Gesundheit
- Land- und Forstwirtschaft im Klimawandel
- Auswirkungen des Klimawandels beobachten - Klimafolgenmonitoring
- Wusstest Du schon ...? Das Klima ändert sich!
- Die hessischen Böden im Klimawandel

In Vorbereitung:

- Natur und Landschaft im Klimawandel



Hessisches Landesamt für
Naturschutz, Umwelt und Geologie
Für eine lebenswerte Zukunft

