

Wie kann man das Klima vorhersagen?

Wie funktionieren Klimamodelle?

Was sagen Klimamodelle voraus?

Wie genau sind Klimamodelle?

Motivation / Gesamtfazit

Warum das Thema Klimawandel bei W+W

1/3

- Der Klimawandel ist weltweit in aller Munde. Wissenschaftler versuchen, das Klima zu verstehen und künftige Klimaveränderungen vorherzusagen.
- Die meisten stufen die Folgen dieser Veränderungen als bedrohlich für Mensch und Natur ein und fordern Regierungen auf, entsprechende Gegenmaßnahmen zu ergreifen.
- Die Politiker reagieren mit weltweiten Klimaabkommen mit Selbstverpflichtungen, die hauptsächlich darauf abzielen, den Ausstoß des Treibhausgases CO₂ zu verringern.
- Es gibt aber auch andere Stimmen, die die Aussagen des IPCC (Weltklimarat) kritisieren, den menschengemachten Anteil am Klimawandel anzweifeln oder die Klimamaßnahmen als ungeeignet bzw. schädlich einschätzen.
- Wort und Wissen wird immer wieder gefragt, zu diesem Themenkomplex eine Stellungnahme herauszugeben. Typische Fragen sind:
 - Welche Klimafakten sind unumstößlich und wo fängt die subjektive Interpretation an?
 - Findet Klimawandel über natürliche Klimaschwankungen hinaus statt?
 - Inwieweit ist der Mensch für den aktuell wahrgenommenen Klimawandel verantwortlich?
 - Sind die IPCC-Berichte wissenschaftlich fundiert und objektiv?
 - Wie zuverlässig sind Klimavorhersagen?

Motivation / Gesamtfazit

Warum das Thema Klimawandel bei W+W

2/3

- Zur Beantwortung dieser Fragen hat Wort und Wissen eine Klima-Arbeitsgruppe ins Leben gerufen.
- Diese Arbeitsgruppe, die **W+W KlimaAG**, hat sich der Herausforderung gestellt, auf diese Fragen möglichst neutrale, wissenschaftlich fundierte Antworten zu finden.
- Dies ist in der Tat eine große Herausforderung, da das Thema wissenschaftlich hochkomplex und dazu politisch und emotional sehr geladen ist.
- Das Klima wird von vielen Faktoren beeinflusst, die nichtlinear miteinander interagieren. Dies heißt nicht, dass das Klima nicht verstanden werden kann, aber es hat zur Folge, dass vereinfachte Betrachtungen schnell in die Irre führen können.
- Fast jeder hat zu dem Thema Klimawandel eine Meinung, aber zu oft beruht diese nicht auf wissenschaftlich fundierte Informationen, sondern auf persönliche Überzeugungen, die durch Darstellungen in den Medien gespeist werden.
- Im Internet kann man ungefiltert die unterschiedlichsten Meinungen zum Thema Klimawandel mit Überzeugung dargestellt finden von „Die Welt geht morgen unter“ bis „Es gibt keinen Klimawandel“.
- Ziel und Hoffnung der **W+W KlimaAG** ist es, hier eine solide Orientierungshilfe zu sein.

Motivation / Gesamtfazit

Warum das Thema Klimawandel bei W+W

3/3

- Die **W+W KlimaAG** hat ihre Ergebnisse in mehreren Präsentationen zusammengefasst und stellt diese online zu Verfügung, siehe die Übersicht auf der nächsten Seite.
- Diese Ergebnisse sollen helfen, die eigentlichen Fakten zu erkennen, Falschaussagen zu entlarven und eine möglichst objektive Sicht auf das Thema Klimawandel zu bekommen.
- Allgemeine Begriffserklärungen und Verweise:
 - **Wetter und Klima**
Wetter beschreibt den *momentanen Zustand der Atmosphäre* (z.B. Temperatur, Druck, Dichte, Wind).
Klima ist per Definition der *30-Jahre Durchschnitt* des atmosphärischen Zustandes.
 - **Globales Klima**
Es gibt verschiedene Klimazonen, *das über die Erde gemittelte Klima* wird als **globales Klima** bezeichnet.
 - **Klimaerwärmung**
Genau genommen kann sich das Klima nicht erwärmen, sondern: *Die globale Durchschnittstemperatur der Erdoberfläche nimmt zu und infolgedessen die thermische Energie der Erdatmosphäre.*
In diesem Sinne wird der inzwischen gängige Begriff **Klimaerwärmung** in den Ergebnispräsentationen der **W+W KlimaAG** verwendet.
 - **IPCC AR6** Verweise beziehen sich auf den 6. Sachstandbericht der Arbeitsgruppe 1 des Weltklimarats:
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf

Motivation / Gesamtfazit

Klimawandel findet statt – kein Grund zur Panik

- Das Klima wandelt sich im Laufe der Zeit aufgrund bekannter natürlicher Einflussfaktoren
- Die Vergangenheit zeigt: Die Erde verkraftet erhebliche Klimaschwankungen
- Globaler Temperaturanstieg hat Vor- und Nachteile, Weltuntergangsstimmung ist nicht angebracht
- Der aktuell beobachtete schnelle Klimawandel ist maßgeblich vom Menschen mit verursacht
- Weitere Forschung ist notwendig, z.B. um Wolkenbildung und CO₂-Senken besser zu verstehen
- Es ist sehr fragwürdig, ob der Mensch das Klima kontrollieren und bestimmen kann
- CO₂-Reduktion um jeden Preis ist weder technisch noch wirtschaftlich umsetzbar
- Beidseitige starke Lobbys verzerren wissenschaftliche Ergebnisse und kapern die Klimadebatte
- Folglich ist es unrealistisch zu erwarten, dass Klimaziele politisch umgesetzt werden
- Viel sinnvoller ist es, Industrie und Wirtschaft nachhaltig an Klimaveränderungen anzugleichen
- Verantwortungsvolles Handeln ist angebracht, auch unabhängig vom Klimawandel
- Klimarettung oder Leugnung des Klimawandels wird für viele zur Ersatzreligion
- Christen haben den Auftrag, als Hoffnungsträger auf den einzig wahren Retter hinzuweisen

Ergebnisdokumentation der W+W KlimaAG

Online verfügbar unter www.wort-und-wissen.org/artikel/klimawandel

W+W KlimaAG - Übersichtspräsentation.pdf

W+W KlimaAG - Bekannte Klimafakten.pdf

W+W KlimaAG - Ursachen Klimawandel.pdf

W+W KlimaAG - Unsere Verantwortung.pdf

W+W KlimaAG - Klimamodellierung.pdf

W+W KlimaAG - Temperaturrekonstruktion.pdf

W+W KlimaAG - IPCC, der Weltklimarat.pdf

Inhaltsaufgabe

- Einführung Klimamodellierung
- Erstellung eines Klimamodells
- Erhebung von Klimadaten
- Modellergebnisse und ihre Vorhersagekraft
- Zusammenfassung
- Anhang: Die Navier-Stokes Gleichungen

Inhaltsaufgabe

- Einführung Klimamodellierung
 - Erstellung eines Klimamodells
 - Erhebung von Klimadaten
 - Modellergebnisse und ihre Vorhersagekraft
 - Zusammenfassung
 - Anhang: Die Navier-Stokes Gleichungen

Einführung Klimamodellierung

- Der Begriff "Klima" wird definiert als Langzeitmittelwert (30 Jahre) des Wetters.
- Auf der Erde werden verschiedene Klimazonen unterschieden. Diese werden durch die Einstrahlung der Sonne, Land, Ozeane, Eisflächen sowie Luftbewegungen verursacht.
- Für eine detaillierte Beschreibung von Wetter und Klima siehe die Präsentation „W+W KlimaAG - Bekannte Klimafakten.pdf“.

Klimadefinition und Klimazonen

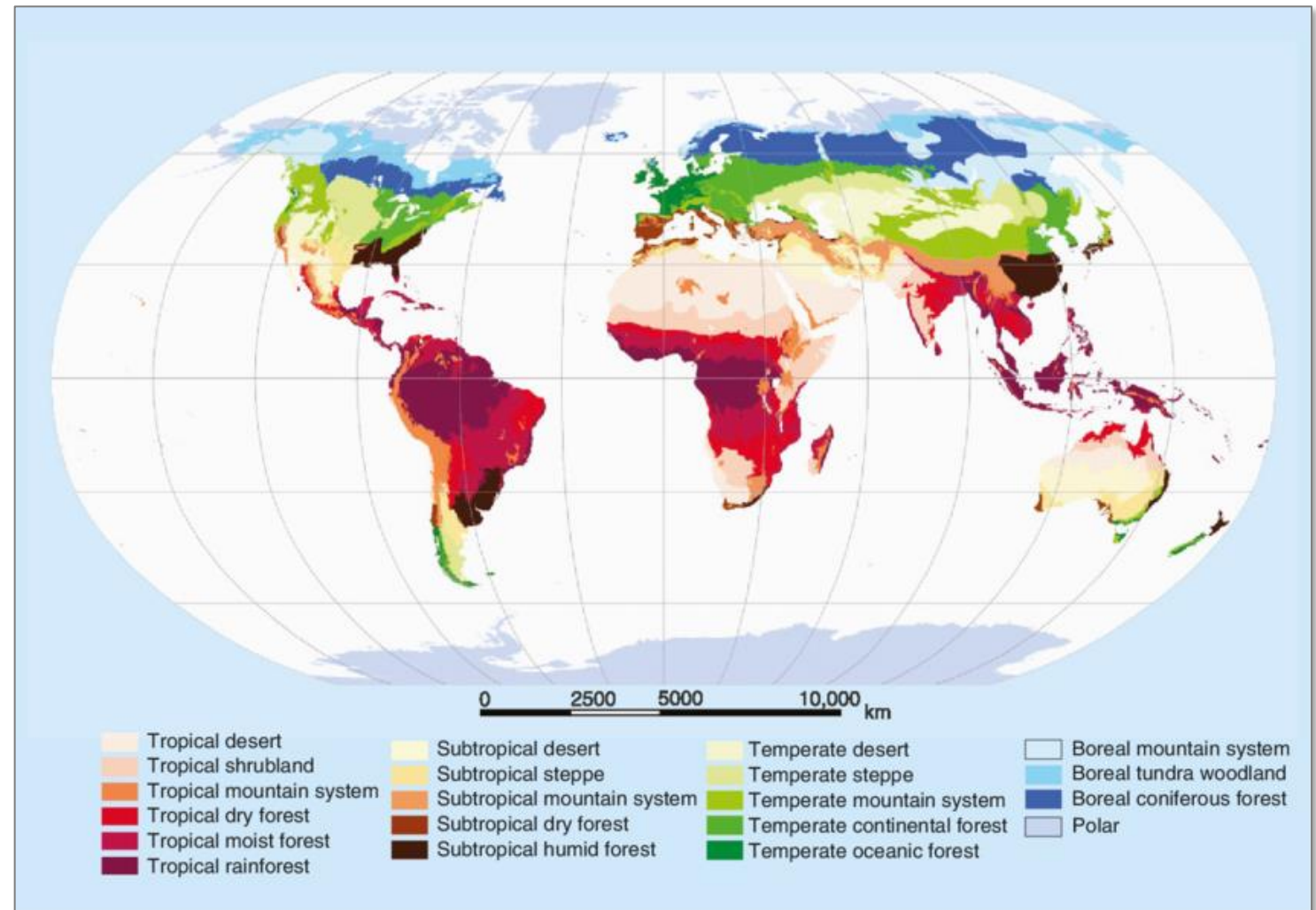


Abbildung: Klimazonen der Erde; © FAO (2012)

Einführung Klimamodellierung

Eine junge Wissenschaftsdisziplin

- Die detaillierte Erforschung und Vorhersage von Wetter und Klima mit Hilfe von Computern sind Kinder des 20. Jahrhunderts.
- Es handelt sich dabei um eine interdisziplinäre Forschung, bei der Erkenntnisse aus Mathematik, Physik, Numerik, Strömungsmechanik, Chemie und Klimatologie benötigt werden.
- Ohne die Entwicklung von leistungsstarken Computern wäre es nicht möglich, die komplexen Strömungsgleichungen, die Wetter und Klima beschreiben, zu lösen.
- Der UN-Weltklimarat IPCC konstatierte in seinem dritten Report von 2001:

In Sachen Klimaforschung und -modellierung sollten wir anerkennen, dass es sich dabei um ein gekoppeltes, nicht-lineares, chaotisches System handelt. Deshalb sind längerfristige Vorhersagen über die Klimaentwicklung nicht möglich. Der Fokus der weiteren Forschung muss deshalb eher darauf liegen, eine große Zahl von Modelllösungen zu generieren, um daraus die Wahrscheinlichkeitsverteilung künftiger Zustände des Klimasystems abzuleiten.

Einführung Klimamodellierung

Erfolge aus der Vergangenheit

- Lewis Fry Richardson (Mathematiker, Physiker, Meteorologe, Psychologe) fertigte im Jahr 1922 die erste Wettervorhersage an.
- Richardson hat die erste Wettervorhersage für einen einzelnen Tag durchgeführt und benötigte dafür drei Monate Berechnungszeit.
- Seine Vorhersage war größtenteils falsch; dennoch wurde damit der Weg in das riesige Forschungsgebiet der Meteorologie geebnet.

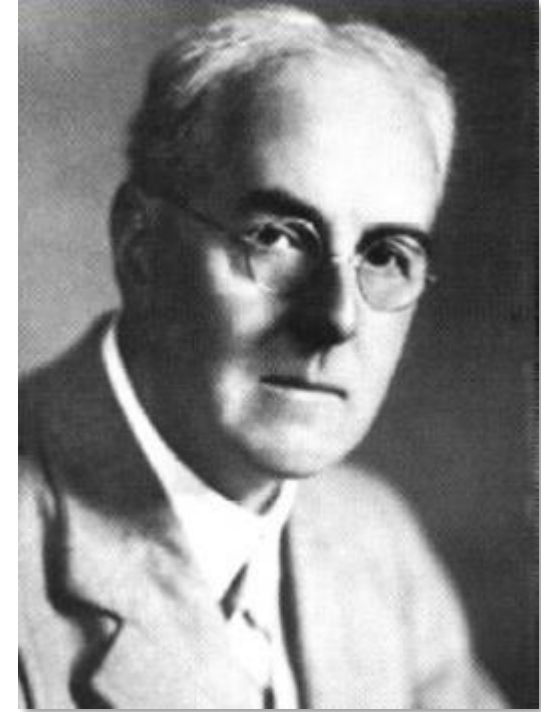


Abbildung: Weather Forecasting Factory, basierend auf der Beschreibung von Richardson (1922)

Einführung Klimamodellierung

Supercomputer sind unabdingbar



Abbildung: Riesige Supercomputer machen Klimamodellierung technisch überhaupt erst möglich @ Wikipedia CC BY 2.0 License

Einführung Klimamodellierung

Grundlagen der Klimamodellierung 1/2

- Klimamodellierung nutzt viele mathematische und physikalische Methoden und Grundlagen, die in der Meteorologie auch für die Wettervorhersage verwendet werden.
- Wetter und Klima werden von der zeitlichen Entwicklung der Erdatmosphäre bestimmt. Dabei spielen viele Faktoren eine Rolle, die wichtigsten sind:
 - Zustand der Atmosphäre (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, chemische Zusammensetzung, Wolken, Winde).
 - Einstrahlung der Sonne, bedingt durch die Sonne selbst, die Erdbahn und die Neigung der Erdachse.
 - Beschaffenheit der Erdoberfläche (Vegetation, Meere und Gewässer, Eisbedeckung, Gebirge).
- Die Dynamik von Klimasystemen wird im Wesentlichen durch die folgenden Prinzipien beherrscht:
 - Erhaltung der Luft- und Wassermasse
 - Impulserhaltung in der Luft in drei Raumrichtungen
 - Energieerhaltung
 - Ideales Gasgesetz, angewandt auf die Luft

Einführung Klimamodellierung

Grundlagen der Klimamodellierung 2/2

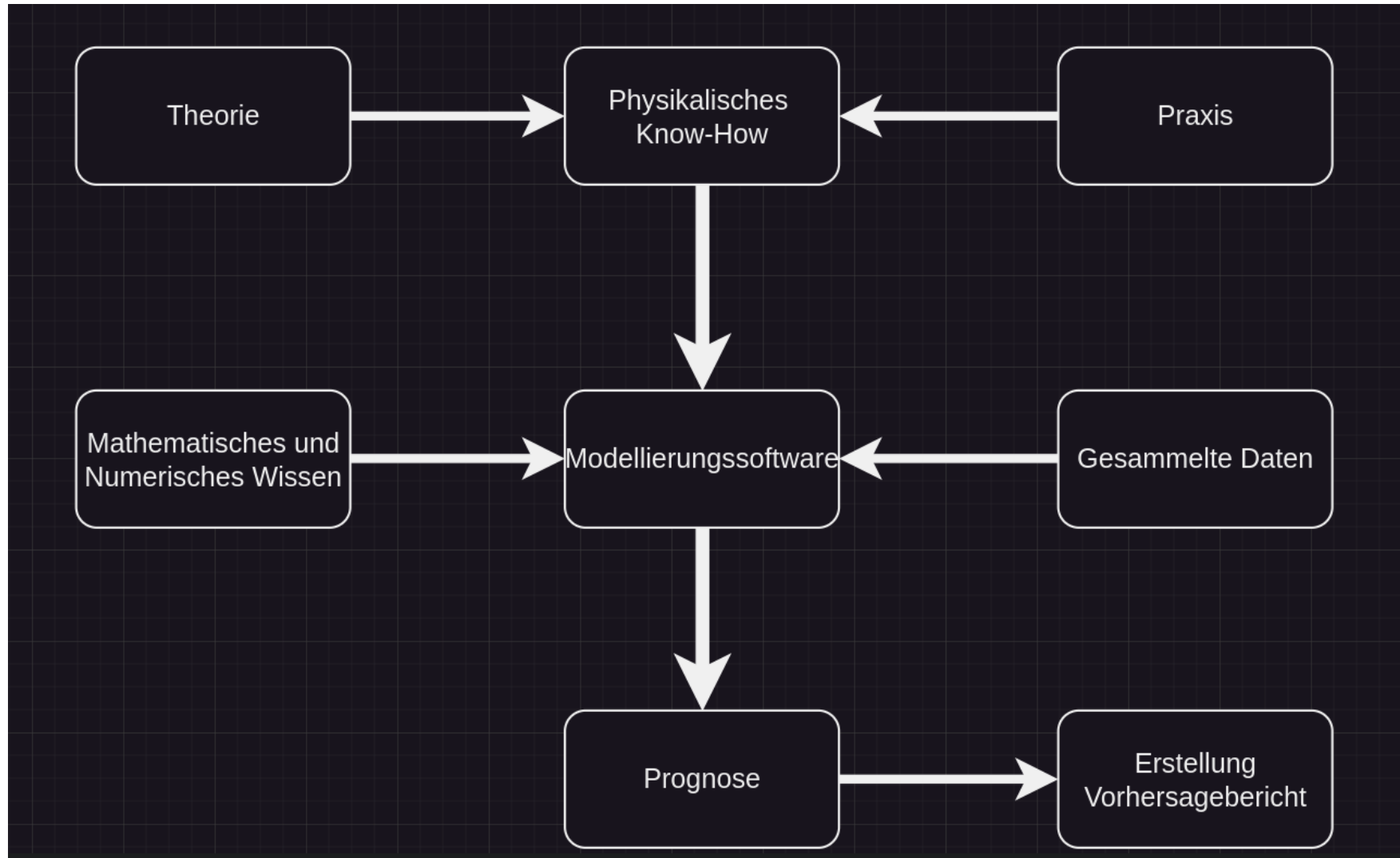


Abbildung: Erstellung und Funktionsweise einer Modellierungssoftware für Klimamodelle (Eigene Darstellung)

Einführung Klimamodellierung

Was passiert aus mathematischer Sicht?

- Aus den Erhaltungssätzen leitet man sieben Gleichungen mit insgesamt sieben Variablen ab:
 - eine Gleichung für Lufttemperatur
 - eine Gleichung für Druck
 - eine Gleichung für Dichte
 - eine Gleichung für den Wasserdampfanteil
 - drei Gleichungen für die Windstärke (wg. drei Raumrichtungen)
- Sind alle aktuellen Bedingungen bekannt, können die künftigen Bedingungen schrittweise mit Hilfe von Strömungsmodellen berechnet werden, wobei das Ergebnis zunehmend ungenau wird.
- In einem Strömungsmodell wird die momentane Veränderung des atmosphärischen Zustands mit Hilfe von Differentialgleichungen beschrieben.
- Diese Differentialgleichungen werden **Navier-Stokes-Gleichungen** genannt nach den beiden Physikern Claude Louis Marie Henri Navier und George Gabriel Stokes, die diese Gleichungen für Strömungsmodelle aufgestellt haben, siehe <https://de.wikipedia.org/wiki/Navier-Stokes-Gleichungen>.
- Die Navier-Stokes-Gleichungen werden in mehr Detail im Anhang erläutert.

Einführung Klimamodellierung

Ablauf einer Klimamodellierung 1/4

- Die Differentialgleichungen werden unter Verwendung gesammelter Daten mithilfe von Computern numerisch gelöst. Dieser Prozess wird im Kapitel „Erstellung eines Klimamodells“ beschrieben.
- Getestet wird das Modell mit Klimadaten aus der Vergangenheit. Mit Hilfe des Modells werden dazu Prognosen, d.h. das Klima für künftige Zeitpunkte berechnet und die Abweichung von den echten Daten wird geprüft. Die Modellparameter werden danach angepasst, um die Vorhersagegenauigkeit zu erhöhen.
- Man unterscheidet zwischen globalen (GCM = Global Climate Models) und regionalen Modellen (RCM = Regional Climate Models).
- Die RCM haben in der Regel feinere räumliche und zeitliche Auflösungen und sind folglich genauer.
- Die GCM hingegen dienen vor allem dem Verständnis weltweiter Klima-Einflussfaktoren; sie werden zum Beispiel vom IPCC genutzt, um den Einfluss einer Zunahme von Treibhausgasen auf das Klima zu studieren.

Einführung Klimamodellierung

Ablauf einer Klimamodellierung 2/4

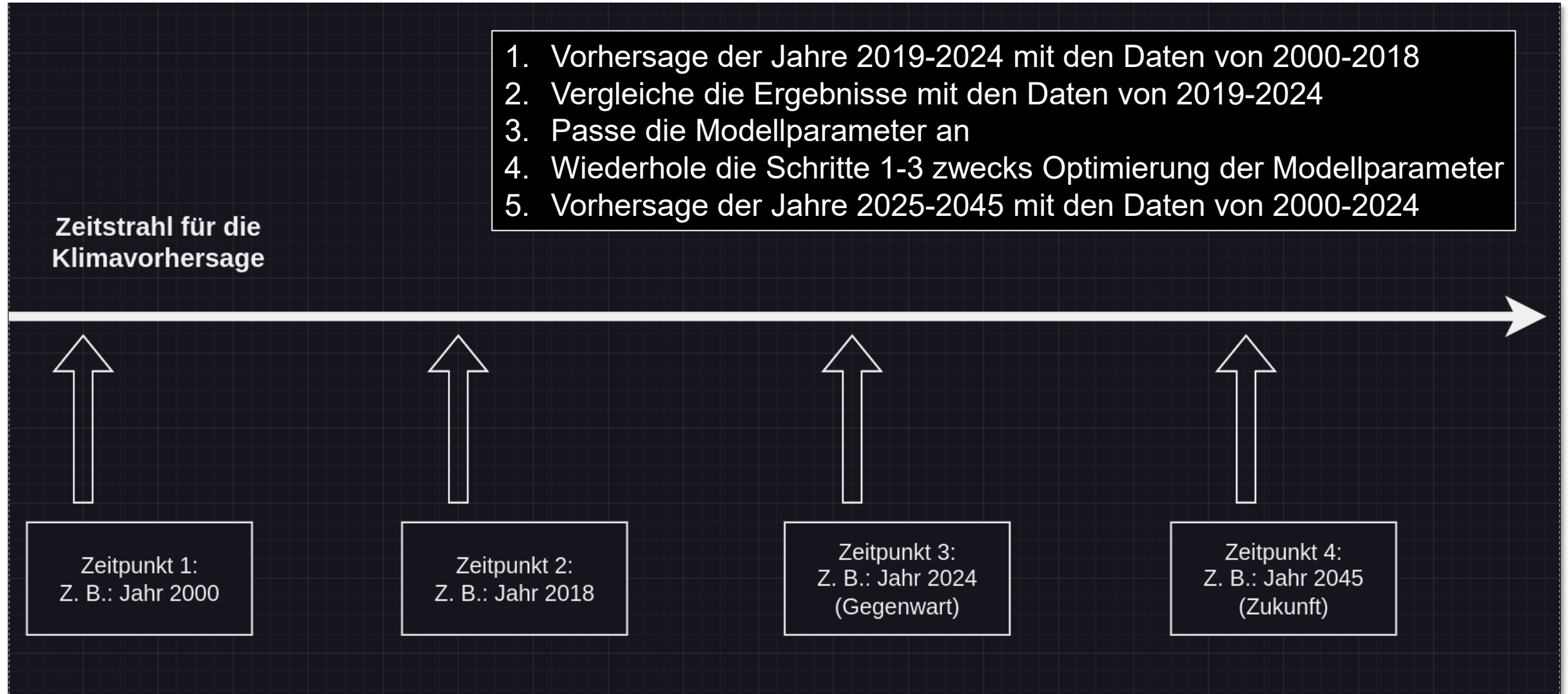


Abbildung: Funktionsweise einer Klimavorhersage (Eigene Darstellung)

Einführung Klimamodellierung

Ablauf einer Klimamodellierung 3/4

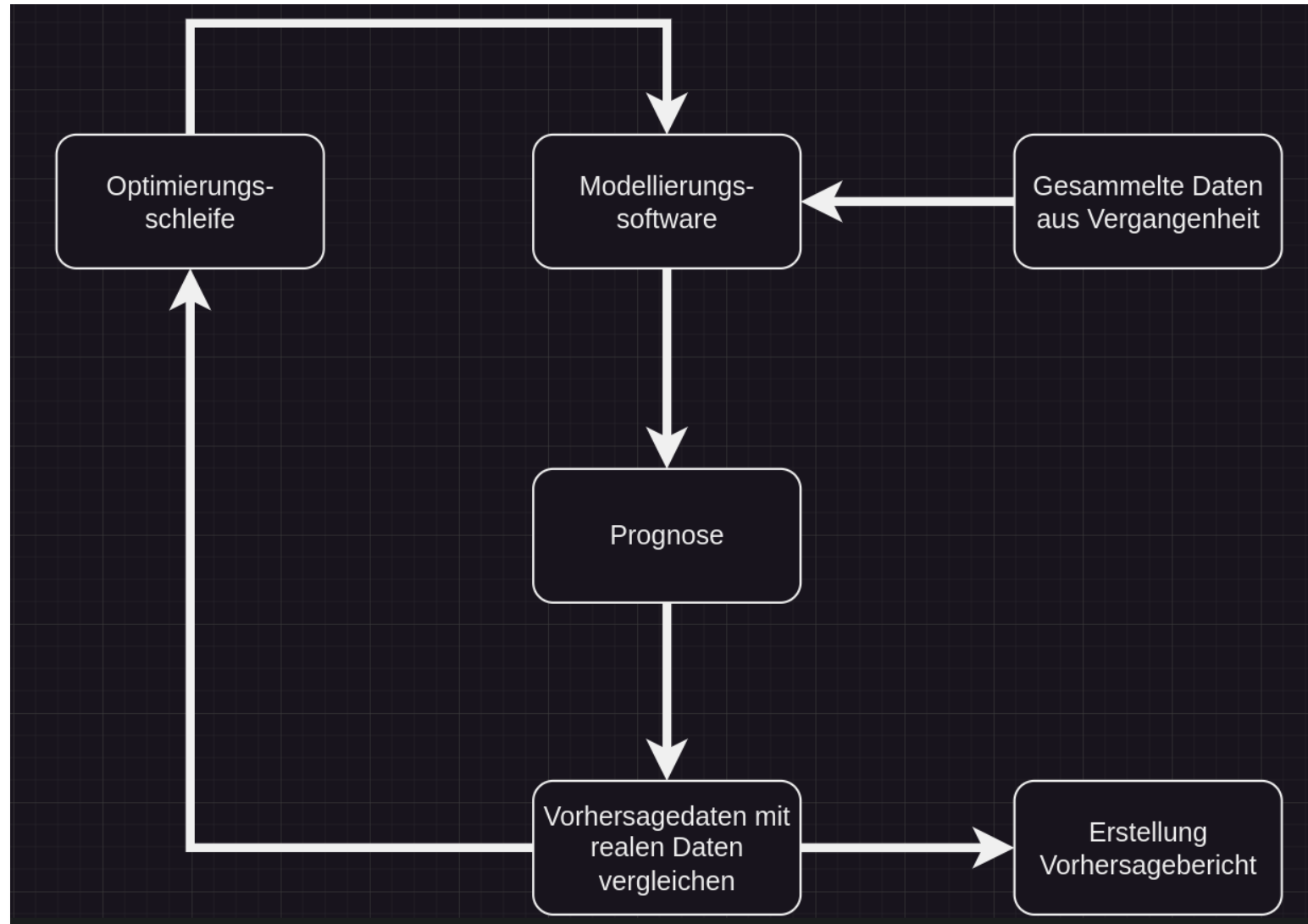


Abbildung: Optimierungsschleife für Klimamodelle (Eigene Darstellung)

Einführung Klimamodellierung

Ablauf einer Klimamodellierung 4/4

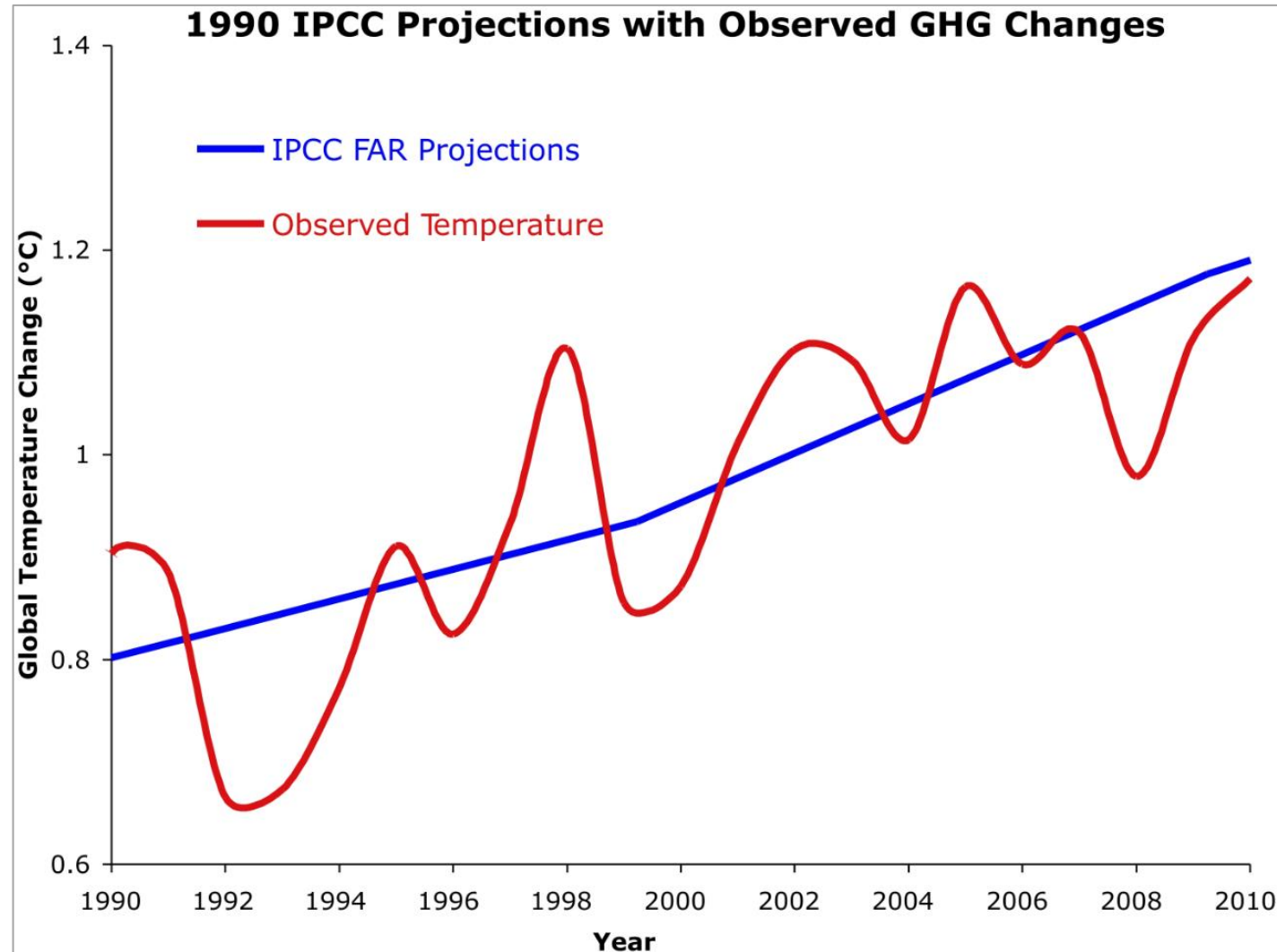


Abbildung: Visuelle Darstellung einer Klimaprognose https://skepticalscience.com/graphics/FAR_Projection_1024.jpg

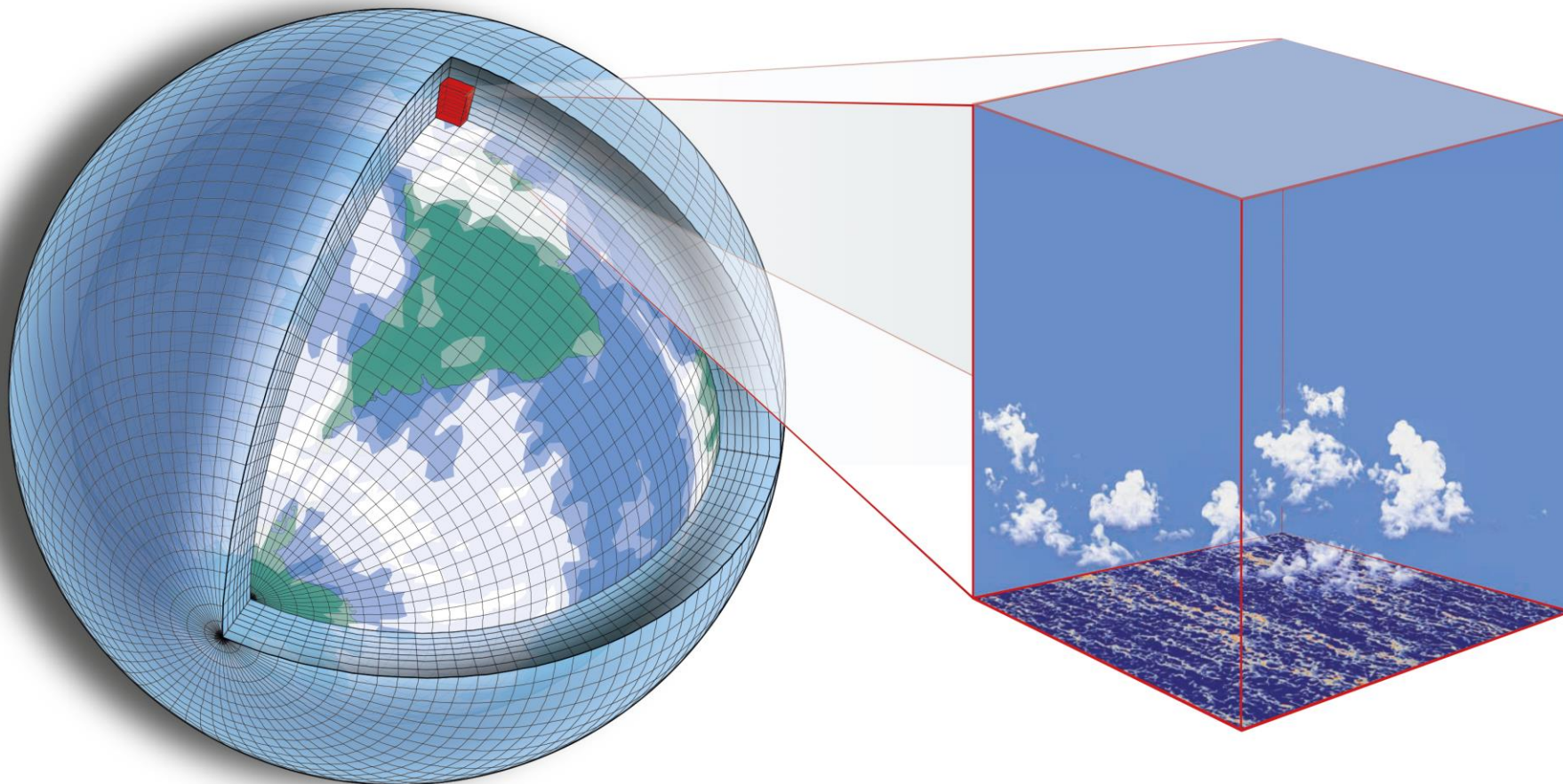
Inhaltsaufgabe

- Einführung Klimamodellierung
- **Erstellung eines Klimamodells**
- Erhebung von Klimadaten
- Modellergebnisse und ihre Vorhersagekraft
- Zusammenfassung
- Anhang: Die Navier-Stokes Gleichungen

Erstellung eines Klimamodells

Zerlegung von Erdoberfläche und Atmosphäre 1/3

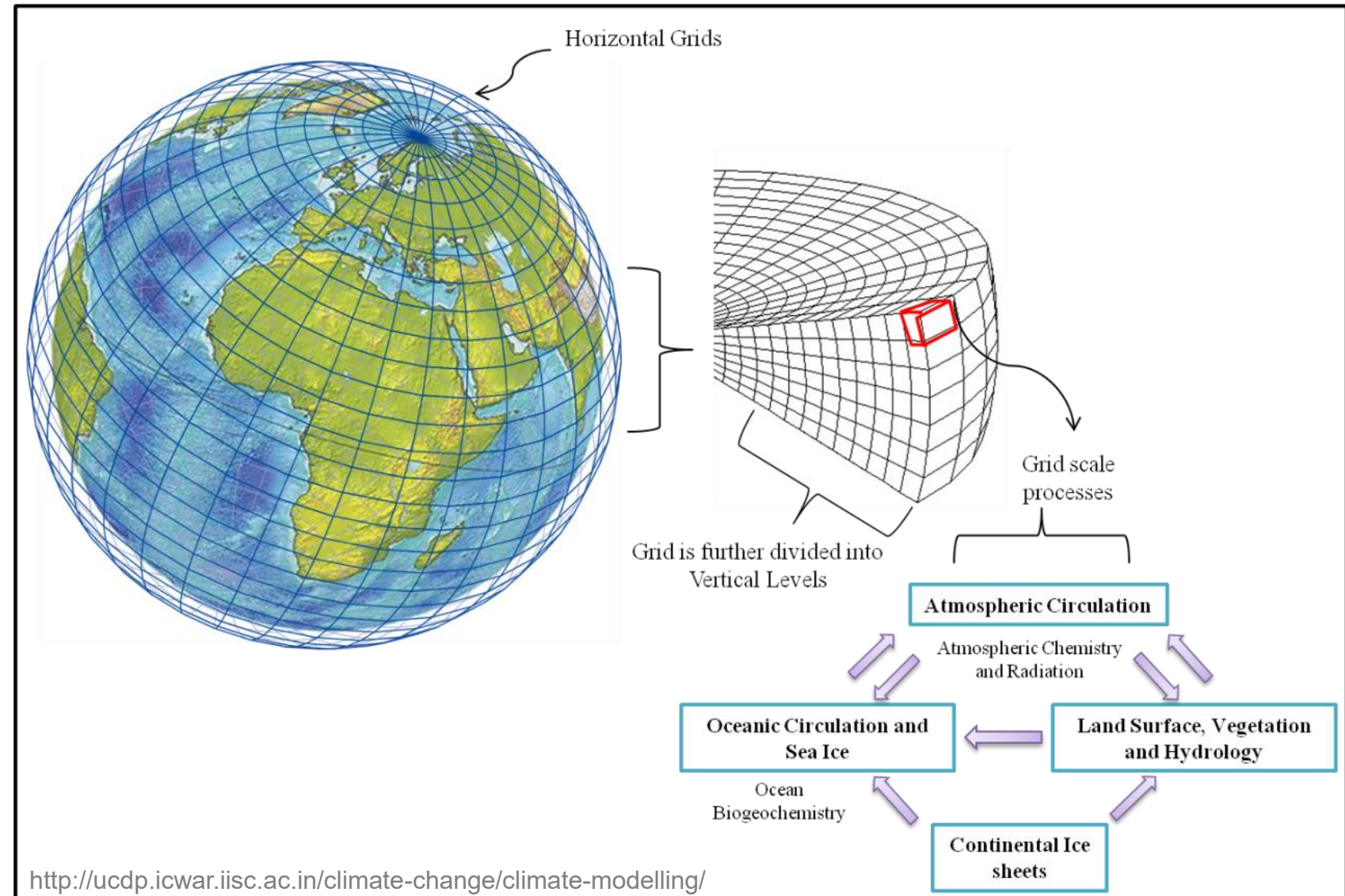
- Um die Komplexität eines weltweiten Klimamodells zu bewältigen, werden Erdoberfläche und Atmosphäre in Gitterboxen zerlegt.



Erstellung eines Klimamodells

Zerlegung von Erdoberfläche und Atmosphäre 2/3

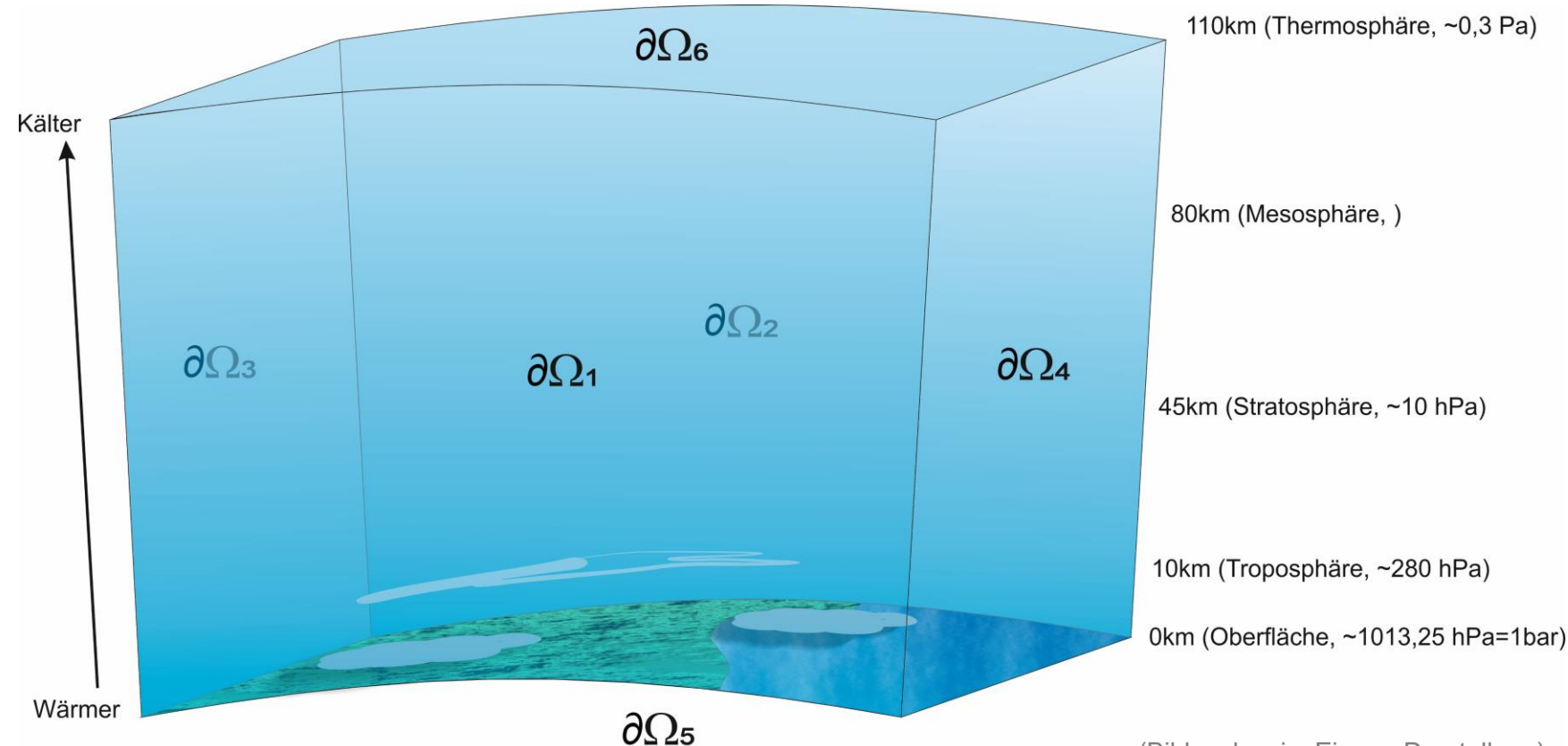
- Die verschiedenen physikalischen Systeme, die das Klima beeinflussen, werden in das Gittermodell hinterlegt, z.B.:
Atmosphärische und Ozeanische Zirkulation, Eisflächen, Landflächen, Vegetation.



Erstellung eines Klimamodells

Zerlegung von Erdoberfläche und Atmosphäre 3/3

- Jede einzelne Gitterbox hat 6 Randflächen.
- Die untere Randfläche der untersten Gitterschicht ist die Erdoberfläche (Grenzübergang Land-Luft), die obere Randfläche der obersten Gitterschicht ist der Weltraum (Grenzübergang Luft-Vakuum).
- Die restlichen Randflächen sind Luft-Luft-Grenzflächen.
- Die Abbildung stellt eine atmosphärische Säule da, die in mehreren Schichten zerlegt wird. In aktuellen Klimamodellen werden bis zu 90 Schichten genutzt. Zwecks Übersichtlichkeit sind die Zwischenschichten nicht eingezeichnet.



(Bildnachweis: Eigene Darstellung)

Erstellung eines Klimamodells Räumliche Auflösung

- Um so besser die räumliche Auflösung, um so genauer sind die Modellergebnisse. Siehe Beispiel rechts für die Erdoberfläche.
- Gittergröße oben: $87,5 \times 87,5 \text{ km}^2$
Gittergröße unten: $30,0 \times 30,0 \text{ km}^2$
- Klar zu erkennen ist, dass die Erdoberfläche im unteren Bild genauer modelliert wird als im oberen Bild.
- Dafür sind aber 8,5-mal mehr Flächengitterzellen erforderlich.
- Dies höhere Genauigkeit erfordert somit eine entsprechend höhere Rechenleistung.

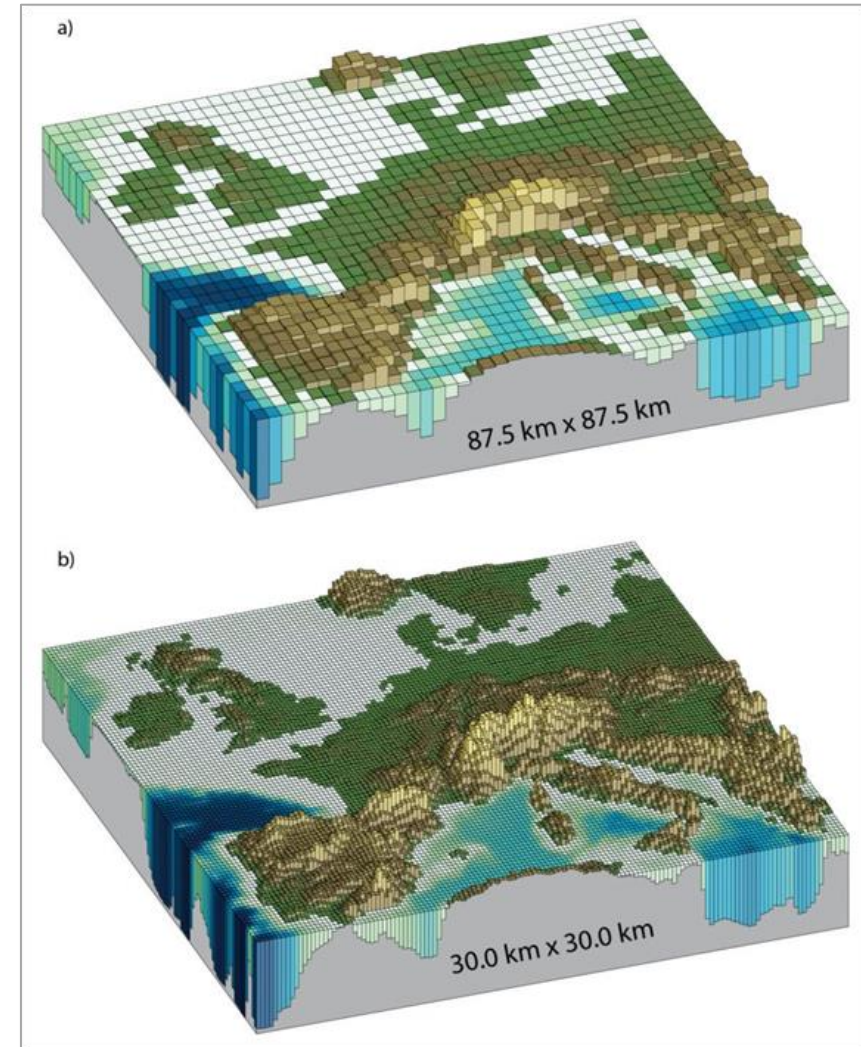


Abbildung: Gitterauflösung in Klimamodellen

<http://ucdp.icwar.iisc.ac.in/climate-change/climate-modelling/>

Erstellung eines Klimamodells

Räumliche Auflösung bei den IPCC-Modellen 1/2

- Die Klimamodellen des Weltklimarats wurden im Laufe der Zeit immer weiter verfeinert. Hier ein Vergleich der ersten vier Sachstandsberichten FAR, SAR, TAR und AR4.

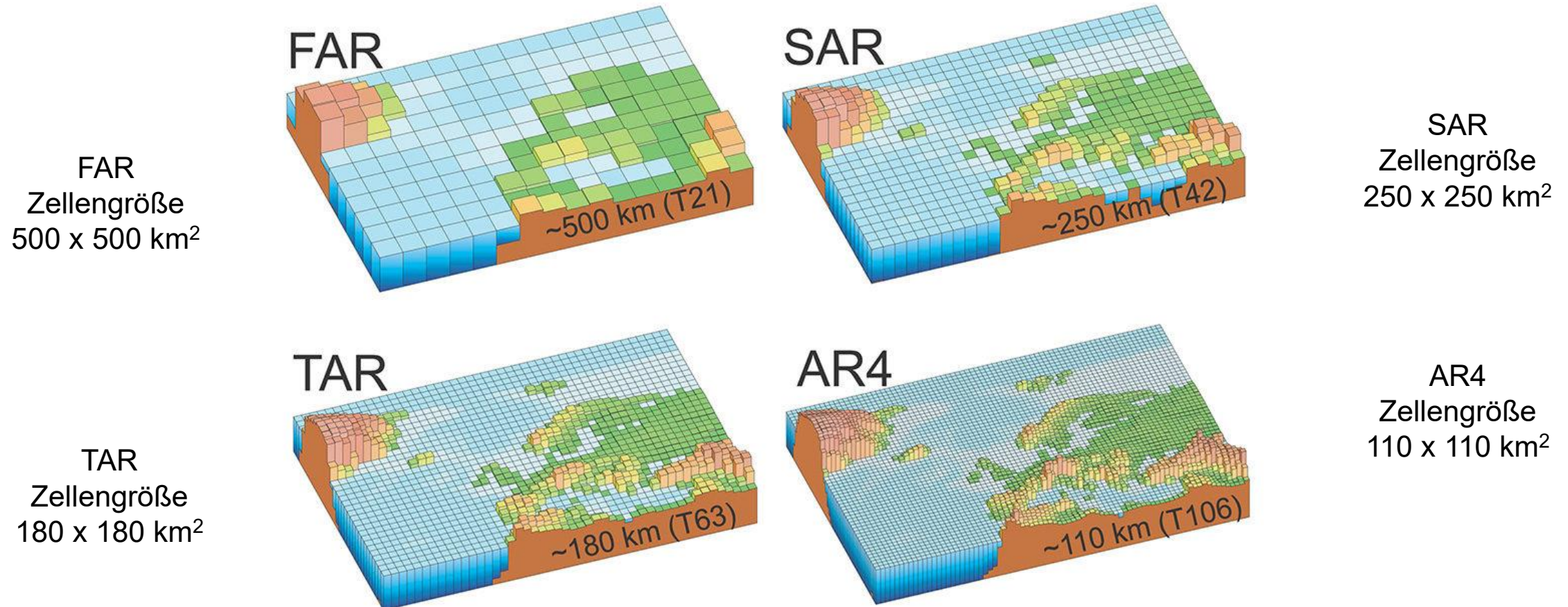


Abbildung: Gitterauflösung in Klimamodellen vom IPCC

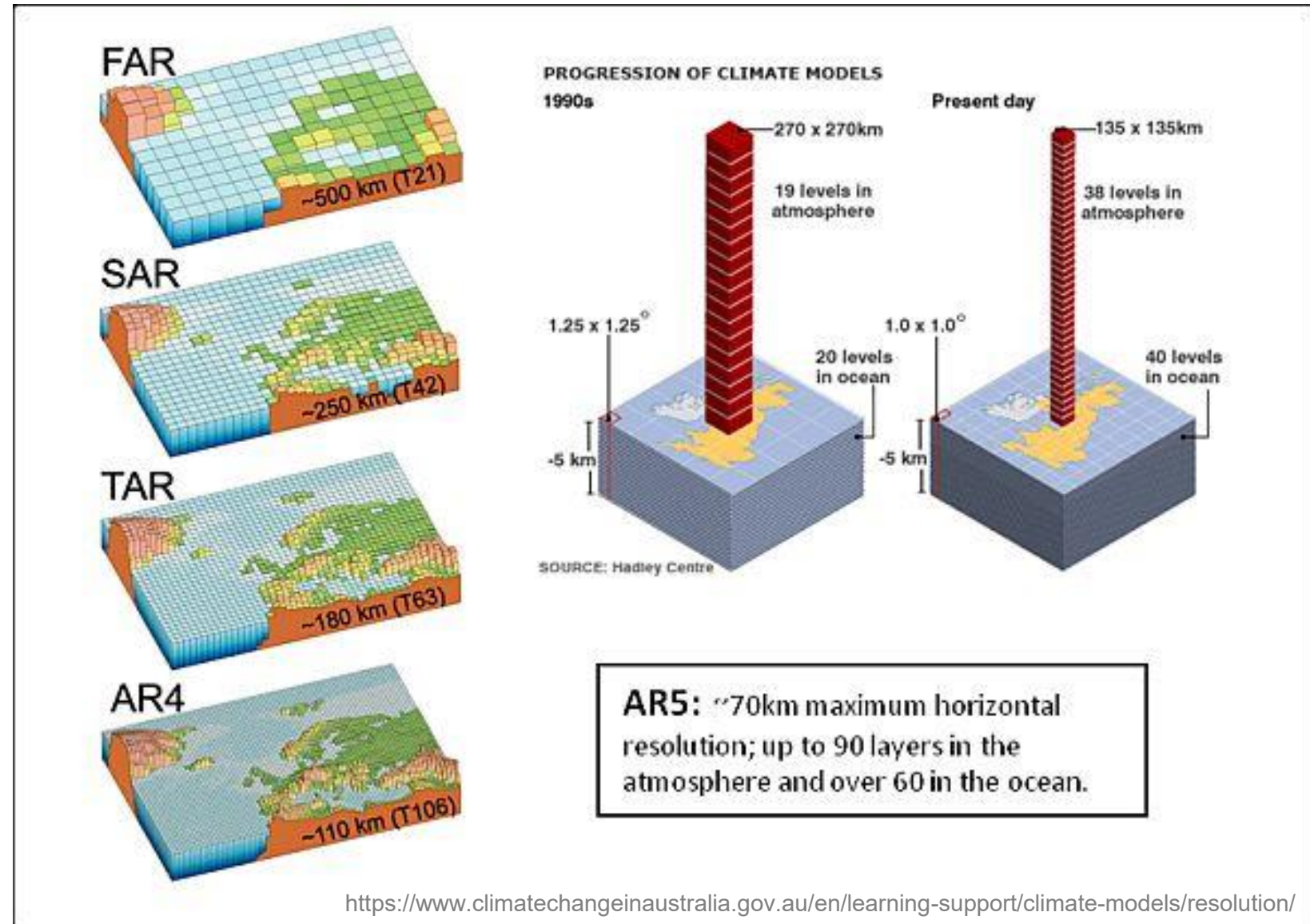
<https://www.carbonbrief.org/wp-content/uploads/2018/01/fig-1-4-1024x653.jpg>

Erstellung eines Klimamodells

- Auch die Atmosphäre wird immer genauer modelliert.
- Im Assessment Report 5 (AR5) hat sich die Gitterzelle auf $70 \times 70 \text{ km}^2$ reduziert.
- Die Atmosphäre wird in AR5 mit 90 Schichten modelliert.
- Die Ozeane werden in AR5 mit über 60 Schichten modelliert.

Abbildung:
Vom IPCC verwendete Modelle
mit Strukturauflösung

Räumliche Auflösung bei den IPCC-Modellen 2/2



Erstellung eines Klimamodells

Modelle bilden die Realität immer besser ab 1/2

- Systeme, die in den 1960-er Jahre separat modelliert wurden, sind inzwischen integraler Bestandteil von den Klimamodellen.
- Beispiele:
 - Vegetation
 - Aerosole
 - Kohlenstoffzyklen
 - Eisschilder

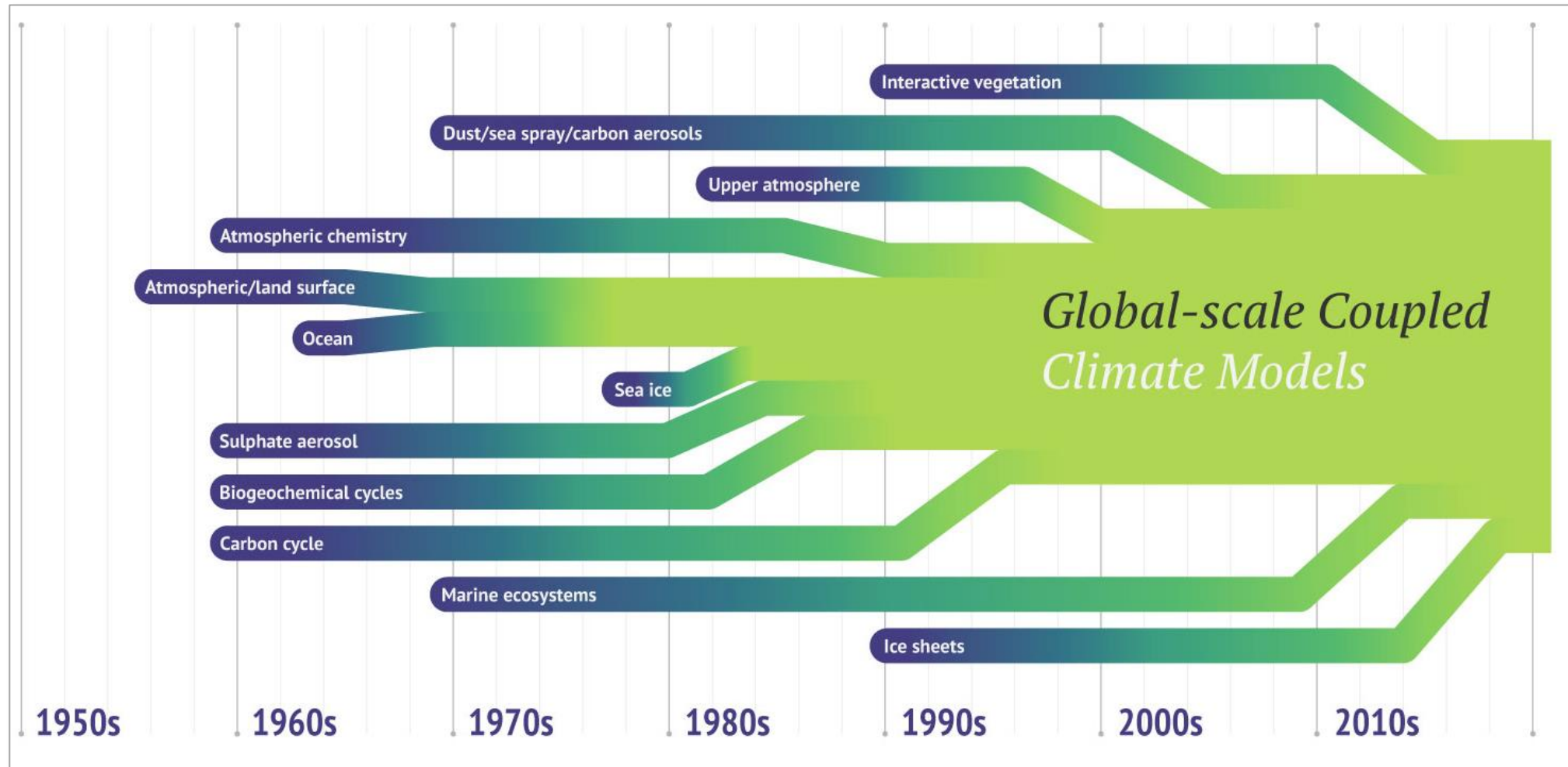


Abbildung: Technische Entwicklung und Kopplung globaler Klimamodelle
Graphic by Rosamund Pearce; based on the work of Dr Gavin Schmidt.

Erstellung eines Klimamodells

- Systeme, die in den 1960-er Jahre separat modelliert wurden, sind inzwischen integraler Bestandteil von den Klimamodellen.
- Beispiele:
 - Vegetation
 - Aerosole
 - Karbonzyklen
 - Eisschilder

Modelle bilden die Realität immer besser ab 2/2

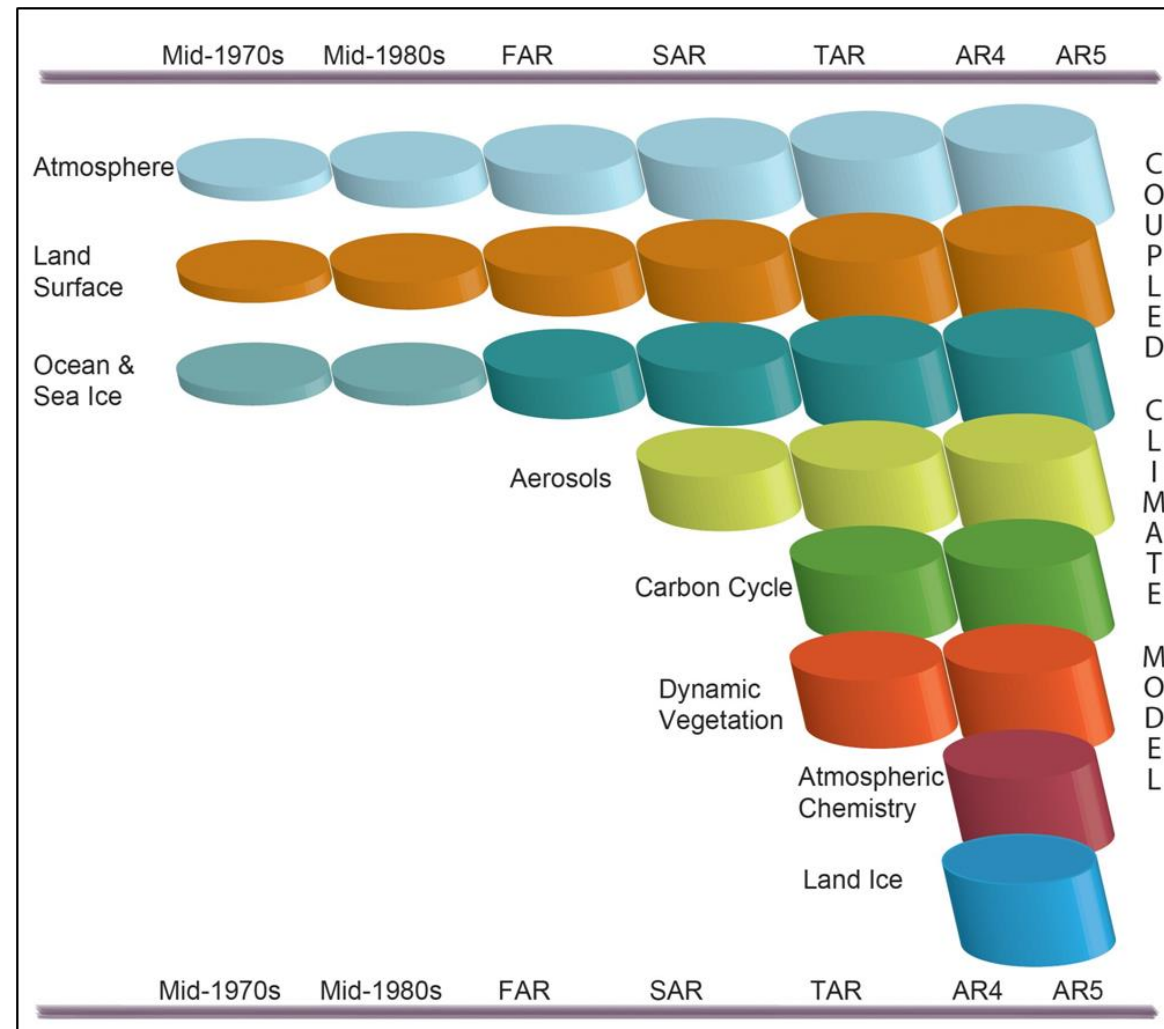


Abbildung: Technische Entwicklung und Kopplung globaler Klimamodelle
<http://ucdp.icwar.iisc.ac.in/wp-content/uploads/2020/09/cc-cm-02.png>

Erstellung eines Klimamodells

Entwicklung der Klimamodelle des IPCC seit 1990

- Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich die Klimamodelle stetig weiterentwickeln.
- Verbesserungen treten in folgenden Bereichen auf:
 - Steigerung der räumlichen Auflösung (es werden immer kleinere Gitterzellen verwendet)
 - Steigerung der zeitlichen Auflösung (der Zustand eines Klimasystems wird für mehr Zeitpunkte berechnet)
 - Steigerung der einbezogenen Systeme (Wasserdampf, Wolken, chemische Zusammensetzung der Atmosphäre, etc.)
 - Steigerung der Rechenleistung
 - besseres Verständnis der Physik, Chemie und Biologie
 - Höhere Messdatenauflösung durch immer mehr Messstationen
- Zusammenfassung der Erstellung eines Klimamodells:
 - Nutze mathematische Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung (Physik, Chemie, Biologie, Mathematik)
 - Erstelle ein Gittermodell der klimarelevanten Systeme (wie z. B. Ozeanen, Atmosphäre, Landflächen, etc.)
 - Führe Berechnungen mit Hochleistungsrechnern (Supercomputern) durch
 - Verbessere die Modelle anhand von Holdout-Daten (Ein Teil der Daten wird nur für Testzwecke benutzt)

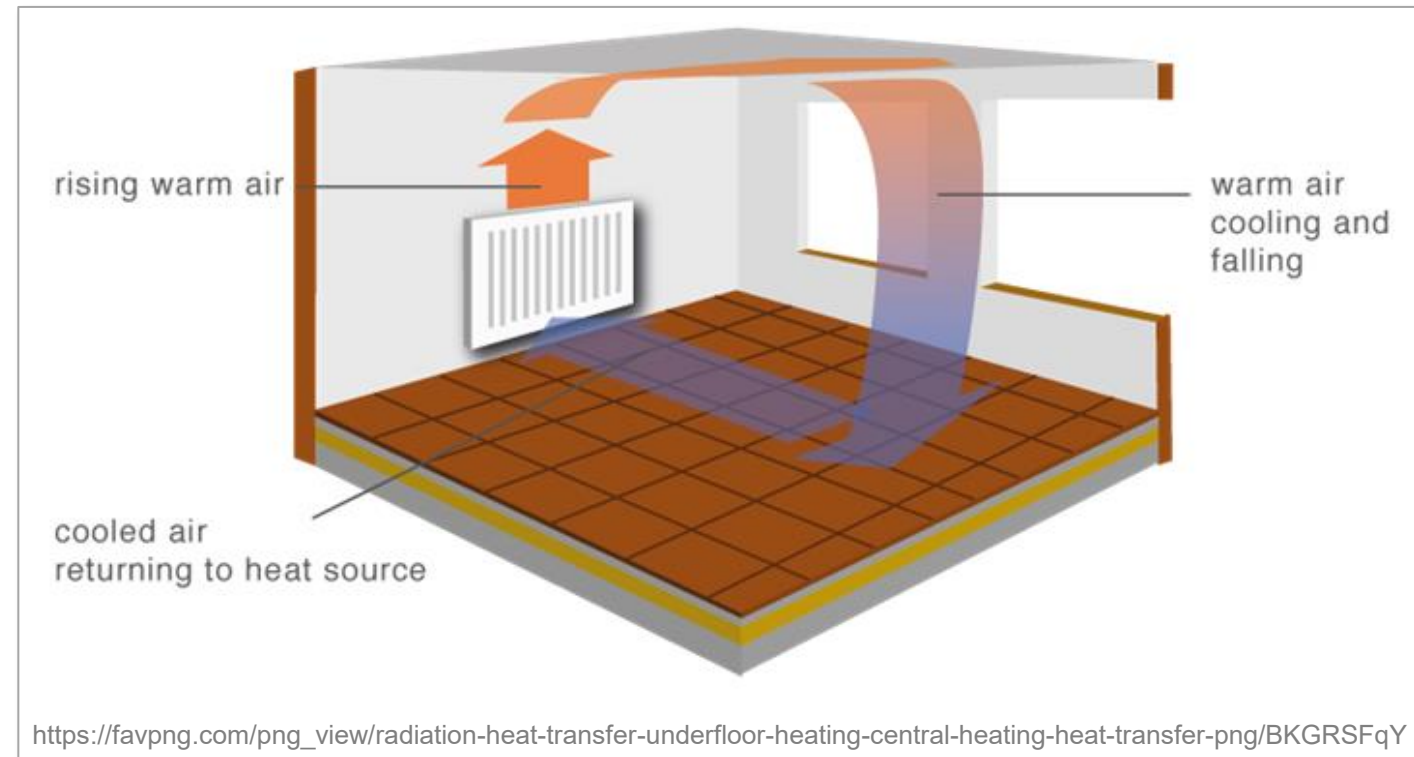
Inhaltsaufgabe

- Einführung Klimamodellierung
- Erstellung eines Klimamodells
- **Erhebung von Klimadaten**
- Modellergebnisse und ihre Vorhersagekraft
- Zusammenfassung
- Anhang: Die Navier-Stokes Gleichungen

Erhebung von Klimadaten

Bedeutung der Sensordichte 1/2

- Klimamodellen benötigen möglichst genaue historische und aktuelle Daten.
- Dazu bedarf es ein weltumfassendes System von Sensoren, d.h. von Messinstrumenten, die den aktuellen atmosphärischen Zustand messen.
- Um so gleichmäßiger die Sensoren über die Erde und in der Atmosphäre verteilt sind und um so mehr es davon gibt (höhere Sensordichte), umso genauer werden auch die Modellergebnisse.
- Dies kann anhand eines Zimmers verdeutlicht werden, siehe Grafik.
- Das Zimmer hat nicht einfach eine Durchschnittstemperatur, sondern ...
 - ... an den Wänden ist es kühler
 - ... an den Fenstern ist es noch kühler
 - ... oben ist es wärmer als unten
 - ... durch den Heizkörper zirkuliert die Luft
- Mehr Sensoren im Zimmer erlauben es, den Luftzustand genauer abzubilden.



Erhebung von Klimadaten

Bedeutung der Sensordichte 2/2

- Je höher die Sensordichte, desto mehr Information
- Korrektur der Klimamodelle ist dadurch besser und genauer
- In gewissen Bereichen ist eine hohe Sensordichte nicht unbedingt notwendig, z.B. bei gleichmäßigen Strömungen, Temperaturverteilungen, etc.
- Aus geopolitischen, wirtschaftlichen oder auch aufwandsmäßigen Gründen gibt es kein gleichmäßig verteiltes Sensornetz.

Erhebung von Klimadaten

Technischer Fortschritt bei der Datensammlung 1/3

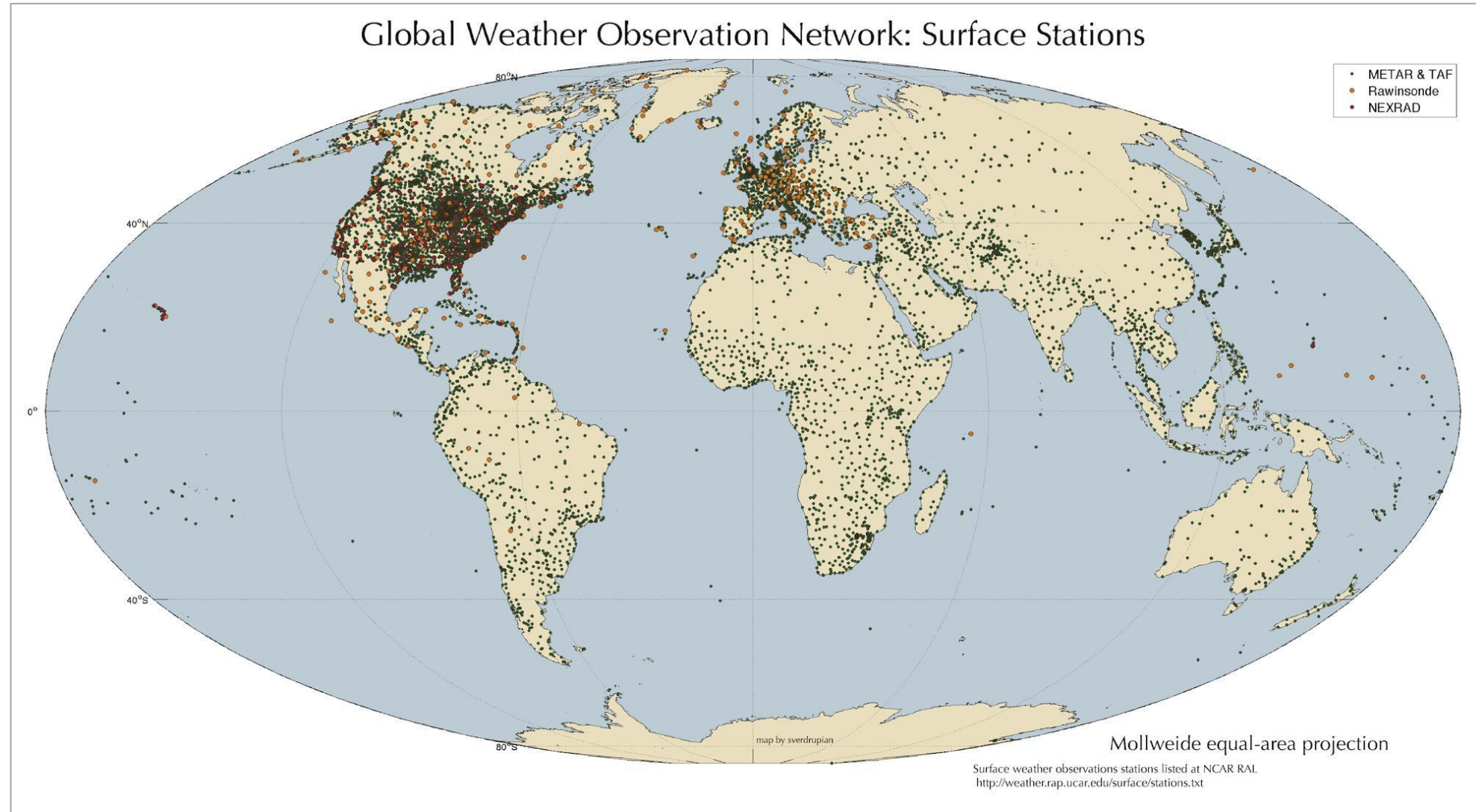
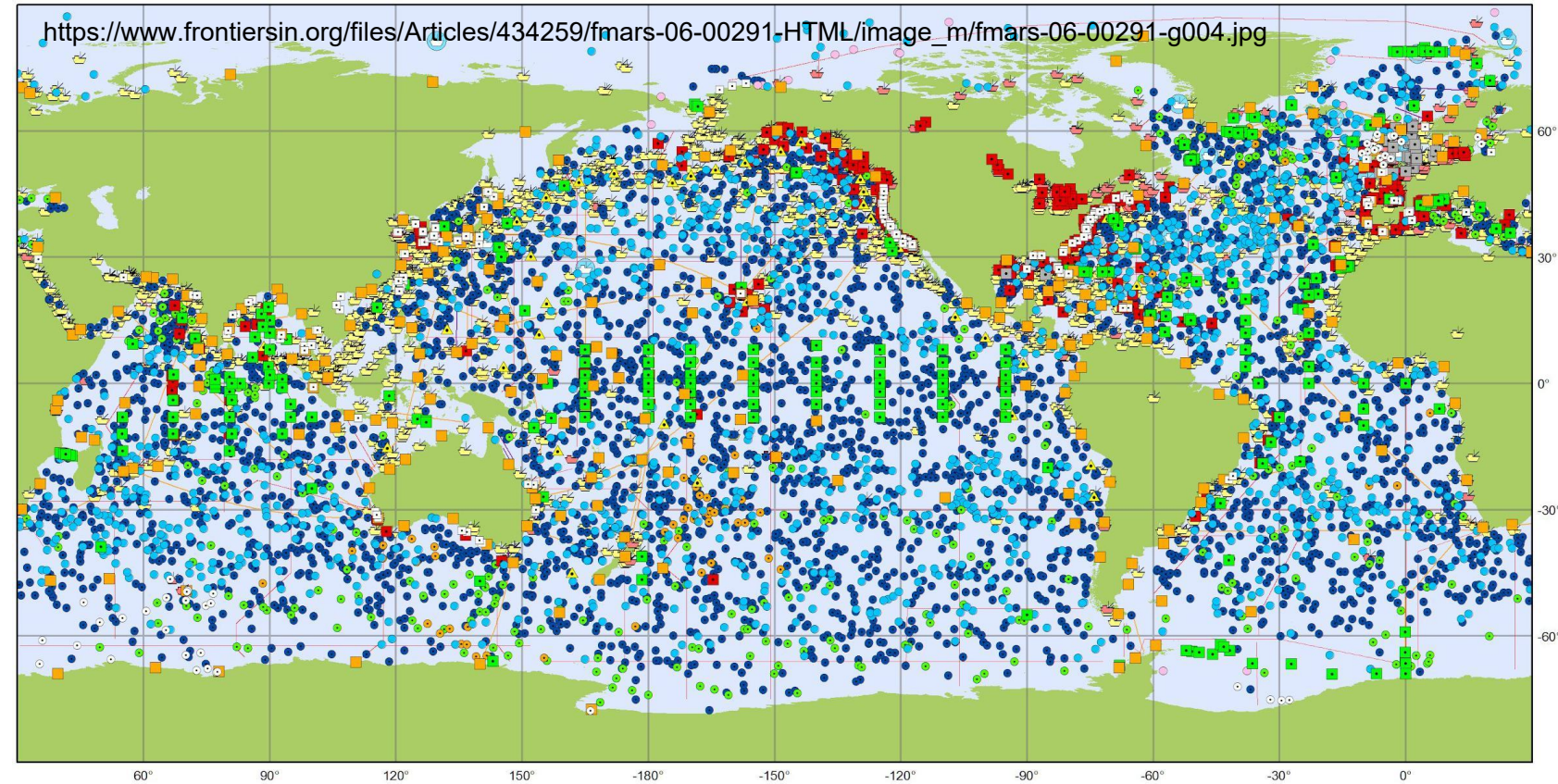


Abbildung: Das NOAA-Sensorarray auf den Kontinenten. Man sieht die geringere Sensordichte in Afrika und Südamerika

Erhebung von Klimadaten

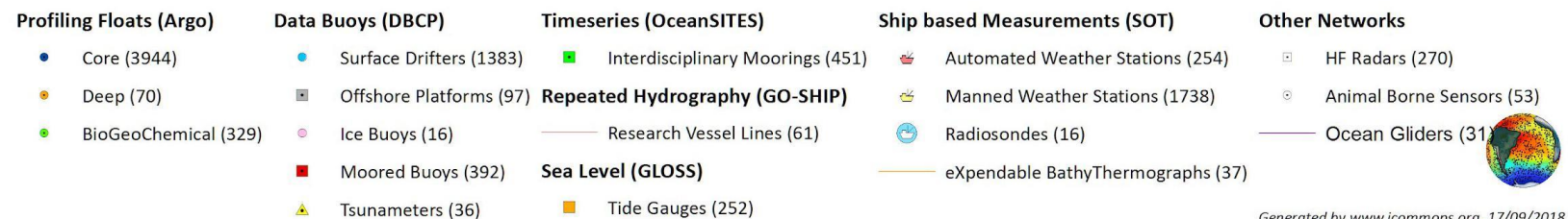
Technischer Fortschritt bei der Datensammlung 2/3

*Abbildung:
Diverse Sensorarrays auf den
Ozeanen.
Die Sensordichte ist erfreulich
hoch und die Sensoren sind
relativ gleichmäßig verteilt.*

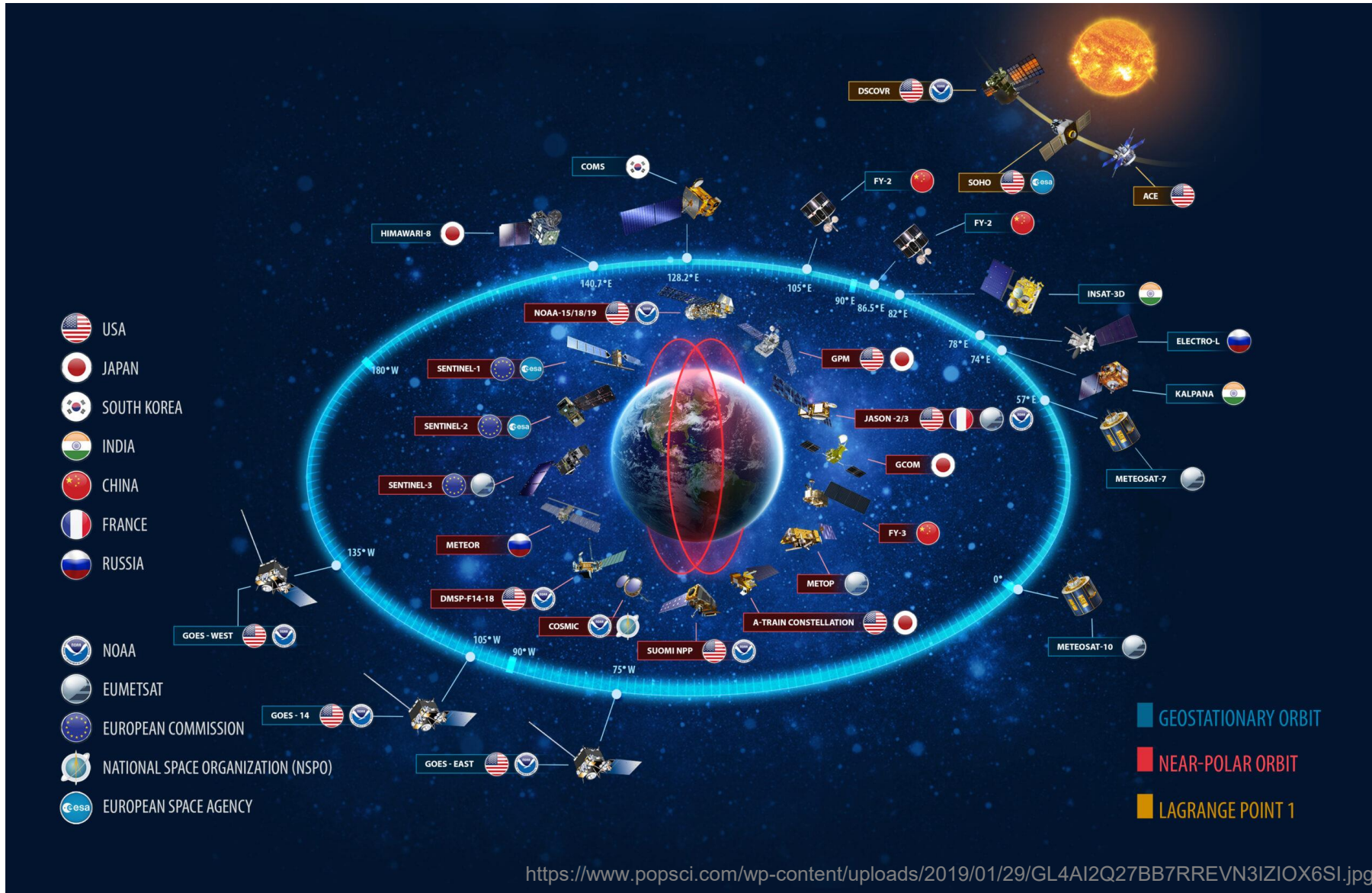


Main in situ Elements of the Global Ocean Observing System

August 2018



Technischer Fortschritt bei der Datensammlung 3/3



*Abbildung:
NOAA-Satellitenarrays zur
Wetterforschung- und
Überwachung.
Ein großes Netz von
Wettersatelliten ergänzt die
Wetterdatensammlung.*

Inhaltsaufgabe

- Einführung Klimamodellierung
- Erstellung eines Klimamodells
- Erhebung von Klimadaten
- **Modellergebnisse und ihre Vorhersagekraft**
- Zusammenfassung
- Anhang: Die Navier-Stokes Gleichungen

Modellergebnisse und ihre Vorhersagekraft

Wo werden Klimamodelle erstellt

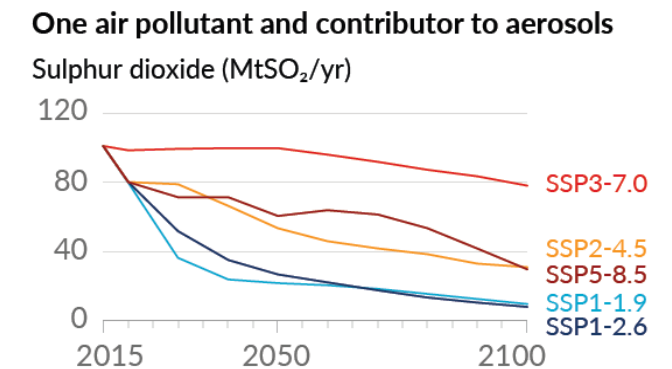
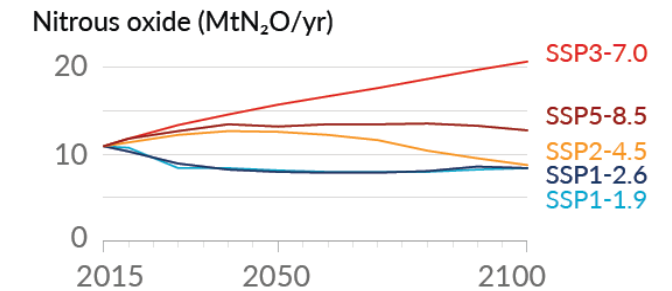
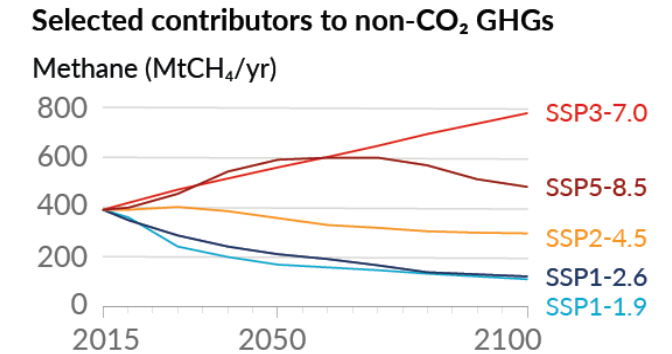
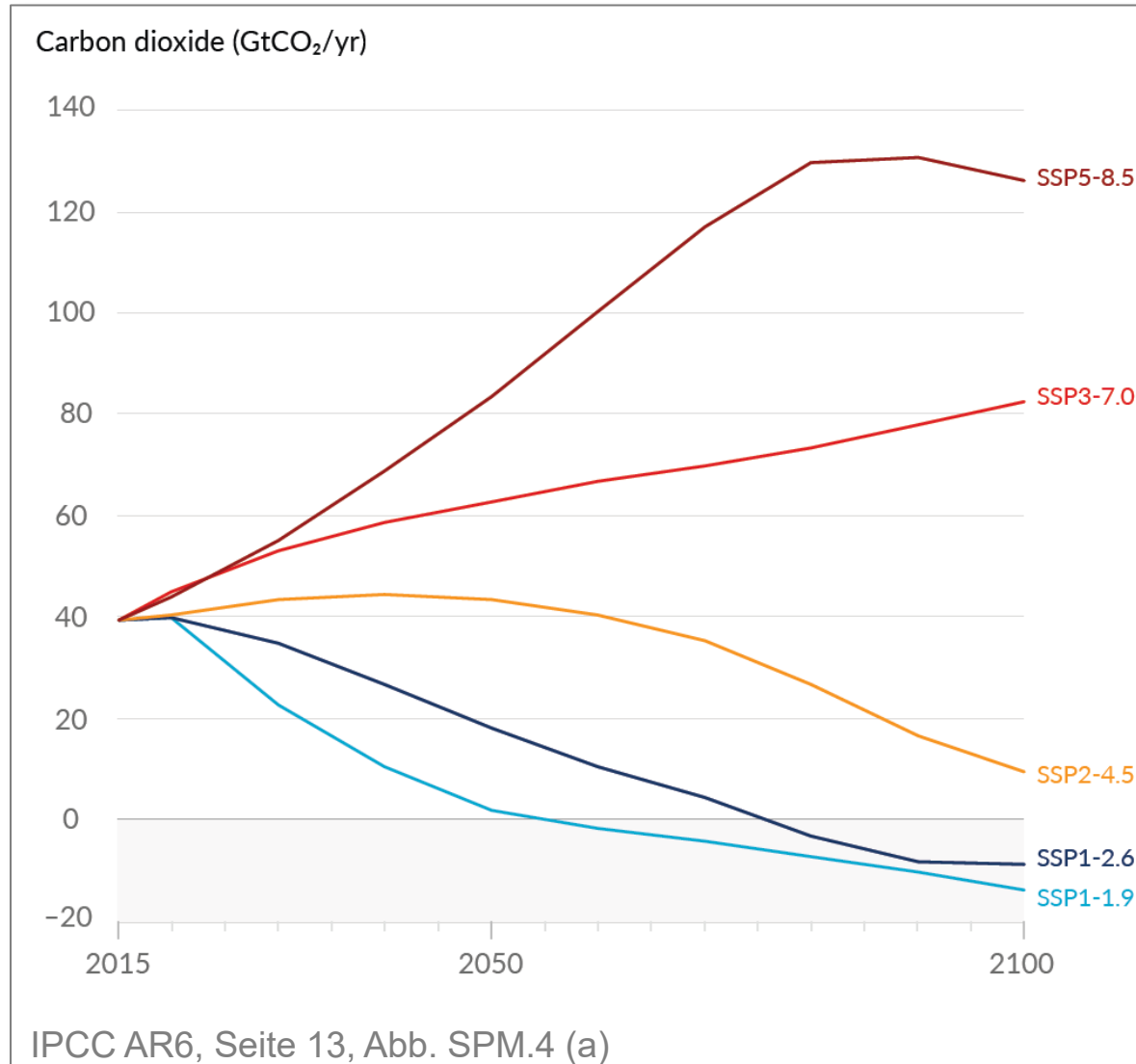
- Klimamodelle werden an vielen Forschungseinrichtungen weltweit erstellt, bekannte Beispiele:
 - National Center for Atmospheric Research (NCAR), USA
 - Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), USA
 - Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M), Deutschland
 - Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ), Deutschland
 - Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), Frankreich
 - Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma), Kanada
 - Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Japan
- Die modernen Klimamodelle haben die bereits angesprochenen Eigenschaften:
 - Hohe räumliche Auflösung (Gitterweite 50 km oder weniger)
 - Gute Darstellung physikalischer Prozesse, inkl. Wolken, Ozeanströmungen, CO₂-Kreislauf
 - Ensemblefähigkeit: wiederholbare Simulationen mit leichten Variationen
 - Vergleich mit realen Daten (Validierung)
- Die fünf IPCC-Szenarien im AR6 (siehe nächste Seiten) wurden von einem internationalen Konsortium von ca. 40 Klimamodellierungszentren berechnet, die gemeinsam an der CMIP6-Initiative (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) teilgenommen haben.
- Auch deutsche Klimarechenzentren haben an diesen Berechnungen mitgewirkt.

Modellergebnisse und ihre Vorhersagekraft

Die fünf IPCC-Szenarien in AR6

1/4

- Die fünf IPCC-Szenarien unterscheiden sich hinsichtlich der erwarteten Emissionen von Treibhausgasen und Aerosolen bis Ende des 21. Jahrhunderts.
- Für jedes dieser Szenarien werden die erwartete Klimaerwärmung und weitere Parameter berechnet.



Modellergebnisse und ihre Vorhersagekraft

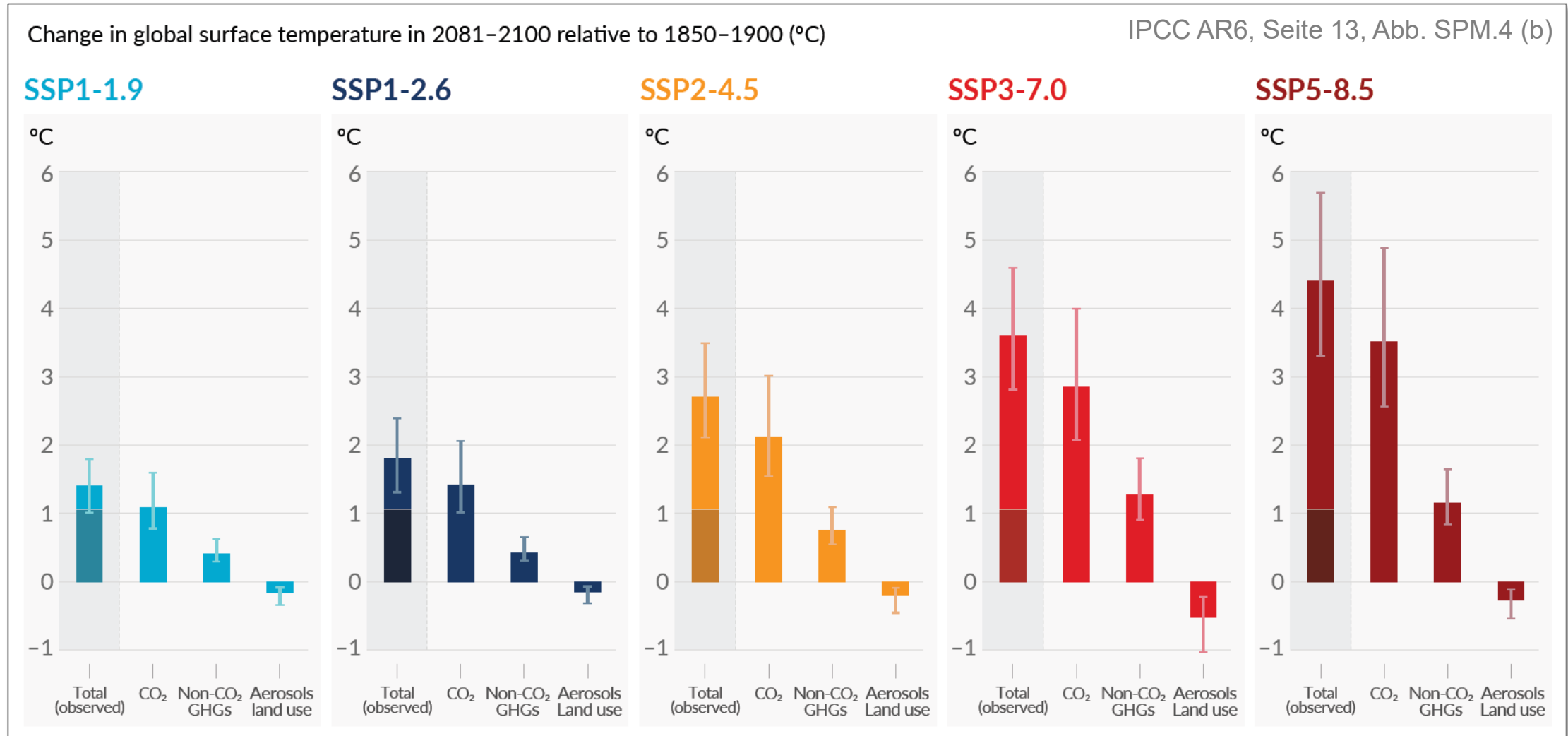
Die fünf IPCC-Szenarien in AR6 2/4

- Die beiden Szenarien SSP1-1.9 und SSP5-8.5 gelten als unrealistische Extremszenarien. Ihr Zweck besteht darin, die maximalen Variationsmöglichkeiten des künftigen Klimas aufzuzeigen.
 - In Szenario SSP1-1.9 wird der weltweite CO₂-Ausstoß bis 2050 auf 0 gesenkt, danach sogar negativ.
 - In Szenario SSP5-8.5 wird der weltweite CO₂-Ausstoß bis 2075 verdreifacht und bleibt dann konstant.
 - Szenario SSP1-2.6 gilt wg. der schnellen Senkung des CO₂-Ausstoßes ebenfalls als unwahrscheinlich.
- Offiziell gilt SSP2-4.5 als wahrscheinlichstes Szenario, dicht gefolgt von SSP3-7.0. Beide gehen davon aus, dass weltweit der CO₂-Ausstoß durch verschiedene Maßnahmen bis Ende des Jahrhunderts gedrosselt wird. Wieviel, ist aufgrund unbekannter Faktoren schwer vorherzusagen:
 - Politische und wirtschaftliche Schwierigkeiten, sich global auf Klimaziele zu einigen und diese zu halten.
 - Schwellenregionen wie Afrika werden ihren CO₂-Ausstoß durch wachsenden Wohlstand zunächst erhöhen.
 - Durch den Ausstieg der USA aus dem Pariser Klimaabkommen wird SSP3-7.0 realistischer.
- Sollte die Realität zwischen den beiden wahrscheinlichsten Szenarien liegen, gilt:
 - Der CO₂-Ausstoß bleibt bis Ende des 21. Jahrhunderts auf dem heutigen Niveau.
 - Anmerkung: Die CO₂-Menge in der Atmosphäre steigt dadurch etwa linear weiter an.
 - Ähnliches gilt für den Ausstoß von anderen Treibhausgasen wie Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O).
 - Aerosole wie Schwefeldioxid (SO₂) nehmen leicht ab.

Modellergebnisse und ihre Vorhersagekraft

Die fünf IPCC-Szenarien in AR6 3/4

- Erklärung, siehe nächste Seite



Modellergebnisse und ihre Vorhersagekraft

Die fünf IPCC-Szenarien in AR6 4/4

- Weiterhin davon ausgehend, dass die Realität zwischen den beiden wahrscheinlichsten Szenarien SSP2-4.5 und SSP3-7.0 liegt, zeigen die Klimamodelle folgende Erwartung bis zum Jahr 2100 auf:
 - Globaler Temperaturanstieg von 3,2 °C seit 1850 (beste Schätzung), oder
 - Globaler Temperaturanstieg von 2,2 °C seit 2021 (beste Schätzung), weil bis 2020 bereits 1,0 °C erreicht.
 - Der *sehr wahrscheinliche* Bereich wird mit 2,5 °C - 4,1 °C seit 1850 angegeben.

	Near term, 2021–2040		Mid-term, 2041–2060		Long term, 2081–2100	
Scenario	Best estimate (°C)	<i>Very likely</i> range (°C)	Best estimate (°C)	<i>Very likely</i> range (°C)	Best estimate (°C)	<i>Very likely</i> range (°C)
SSP1-1.9	1.5	1.2 to 1.7	1.6	1.2 to 2.0	1.4	1.0 to 1.8
SSP1-2.6	1.5	1.2 to 1.8	1.7	1.3 to 2.2	1.8	1.3 to 2.4
SSP2-4.5	1.5	1.2 to 1.8	2.0	1.6 to 2.5	2.7	2.1 to 3.5
SSP3-7.0	1.5	1.2 to 1.8	2.1	1.7 to 2.6	3.6	2.8 to 4.6
SSP5-8.5	1.6	1.3 to 1.9	2.4	1.9 to 3.0	4.4	3.3 to 5.7

Modellergebnisse und ihre Vorhersagekraft

Unsicherheiten der Modellergebnisse

- Die Klimamodellqualität hat sich in den letzten Jahrzehnten signifikant verbessert. Dennoch ist ein Klimamodell eine Schätzung und weist folglich Prognosefehler auf.
- Die gezeigten Klimaprognosen sind das Ergebnis vieler Modellrechnungen mit unterschiedlichen Parametern. Diese Vorgehensweise wird Ensemblerechnung genannt. Es wird eine Spanne an Ergebnisse erzeugt und daraus werden die Unsicherheiten bestimmt. Der angegebene *sehr wahrscheinliche* Wertebereich bedeutet, dass 95% aller Modellergebnisse in dieser Spanne liegen.
- Gründe für die Unsicherheiten der Modellergebnisse sind zum Beispiel:
 - Die Veränderung in der Wolkenbildung bei steigender globaler Durchschnittstemperatur
 - Rückkopplungen, z.B. bei Eis-Albedo oder Wasserdampf
 - Die Klimasensitivität von Treibhausgasen (Temperaturanstieg pro Verdopplung der Treibhausgasmenge)
 - Natürliche Schwankungen des Klimas, z.B. Ozeanische Oszillationen (wichtig nur im 10-20 Jahre Bereich)
 - Die genaue Wirkung der natürlichen CO₂-Senken (Vegetation und Ozeane)
- Die größte Unsicherheit ist aber der menschliche Faktor. Aus diesem Grund wird diese Unsicherheit durch die verschiedenen Szenarien berücksichtigt.
- Es wäre falsch, zu sagen, dass Klimamodelle aufgrund dieser Unsicherheiten keine Aussagekraft besitzen. Im Gegenteil, die Vorgehensweise wird erfolgreich für Prognosen aller Art eingesetzt.

Inhaltsaufgabe

- Einführung Klimamodellierung
- Erstellung eines Klimamodells
- Erhebung von Klimadaten
- Modellergebnisse und ihre Vorhersagekraft
- **Zusammenfassung**
- Anhang: Die Navier-Stokes Gleichungen

Zusammenfassung

- Eine Prognose des Klimawandels mit Hilfe von Klimamodellen benötigt:
 - Physikalisches Verständnis der atmosphärischen Prozesse
 - Mathematische Beschreibung atmosphärischer Veränderungen, z.B. durch die Navier-Stokes Gleichungen
 - Numerische Modellierung und Berechnung vieler Szenarien mit Hilfe von Supercomputern
 - Globale historische Messdaten von Atmosphäre, Ozeanen, Eisflächen und Landflächen
 - Annahmen zur künftigen Entwicklung von natürlichen und menschlichen Einflussfaktoren
- Im Laufe der letzten Jahrzehnten wurde die Qualität von Klimaprognosen signifikant verbessert. Manche atmosphärische Prozesse sind gut verstanden, andere weniger. Aus diesem Grund werden viele Prognosen mit unterschiedlichen Parametern gerechnet (Ensemble-Rechnungen). Auf diese Weise können die Unsicherheiten der Prognosen bestimmt werden.
- Die größte Unsicherheit ist der menschliche Faktor. Im IPCC-Bericht AR6 werden daher verschiedene Szenarien präsentiert mit unterschiedlichen Entwicklungen der von Menschen verursachten Treibhausgasen und Schadstoffen.
- Neueste Klimamodelle ergeben mit 95% Sicherheit einen weiteren Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur von 1,5 – 3,1 °C zwischen heute und dem Jahr 2100.

Inhaltsaufgabe

- Einführung Klimamodellierung
- Erstellung eines Klimamodells
- Erhebung von Klimadaten
- Modellergebnisse und ihre Vorhersagekraft
- Zusammenfassung
- **Anhang: Die Navier-Stokes Gleichungen**

Die Navier-Stokes Gleichungen

Physikalische Systeme

- Aus mathematischer Sicht wird die Erdatmosphäre als Physikalisches System aufgefasst.

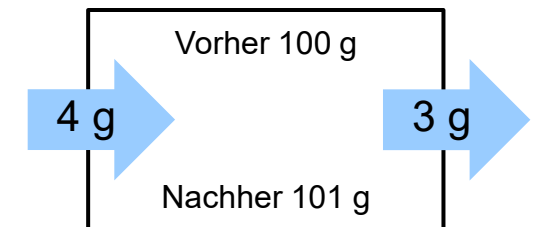
Ein physikalisches System ist ein in der Raumzeit existierendes physikalisches Objekt (oder eine Ansammlung solcher Objekte), das sich als Ganzes in wohldefinierter Weise von seiner Umgebung abgrenzen lässt. (Quelle: Wikipedia)

- Beispiele: Erde, Erdoberfläche + Atmosphäre, Sonnensystem, Atom, Kristall, Fluid, etc.
- Wichtige Zustandsgrößen in der Erdatmosphäre sind unter Anderem
 - Druck, Temperatur, Dichte, Feuchtigkeit, Windgeschwindigkeit (in drei Dimensionen)

Die Navier-Stokes Gleichungen

Erhaltungssätze und Strömungsgleichungen

- Zu den Grundprinzipien der Physik gehören die sogenannten Erhaltungssätze.
- Sie besagen, dass in einem geschlossenen System die folgenden Größen erhalten bleiben:
 1. Masse
 2. Impuls
 3. Energie
- Ist das System nicht geschlossen, gilt, dass die Veränderungen von Masse, Impuls und Energie durch die Summe eingehender und ausgehender Masse, Impuls und Energie bestimmt werden.
- Einfaches Beispiel:
 - Ein nicht-geschlossener Kasten hat links und rechts ein Loch.
 - Es befinden sich 100 g Luft in dem Kasten.
 - In einer Sekunde strömen links 4 g Luft hinein und rechts 3 g Luft hinaus.
 - Folglich enthält der Kasten nach einer Sekunde $100 + 4 - 3 = 101$ g Luft.
 - Begründung: Luft verschwindet nicht einfach, noch entsteht sie spontan, sondern sie bleibt erhalten.
- Diese grundlegende Eigenschaft machen sich die Navier-Stokes-Gleichungen zu Nutzen, indem sie für jeden Zeitpunkt die Erhaltung von Masse, Impuls und Energie beschreiben.



Die Navier-Stokes Gleichungen

Die Navier-Stokes Gleichungen 1/2

- Die zeitlichen Veränderungen des physikalischen Systems „Erdatmosphäre“ werden mit Hilfe der Navier-Stokes Gleichungen beschreiben.
- Es handelt sich dabei um *Partielle Differentialgleichungen* (*PDE = Partial Differential Equations*).
- Um diese zu lösen, müssen sie zeitlich integriert werden. Dazu benötigt es:
Anfangs- und Randbedingungen, Numerische Verfahren, Großcomputer.
- Symbole,
Abkürzungen:

- 1 Partielles Differential: $\frac{\partial}{\partial x_i} = \partial_{x_i}$ i-te partielle Ableitung.
- 2 Nablaoperator: $\nabla = (\partial_{x_1}, \partial_{x_2}, \dots, \partial_{x_n})$
- 3 Laplaceoperator: $\Delta = \sum_{i=1}^n \partial_{x_i x_i}$
- 4 $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ Offenes Gebiet (d. h. offene, zusammenhängende Menge)
- 5 ODE: Ordinary differential equation (gewöhnliche Differentialgleichung)
- 6 PDE: Partial differential equation (partielle Differentialgleichung)

Die Navier-Stokes Gleichungen

Die Navier-Stokes Gleichungen 2/2

Es sei $\mathbf{u}(x, t) = (u_i(x, t))_{i=1}^3$ ein 3-dimensionales Vektorfeld im $\mathbb{R}^3$, $p(x, t)$ eine skalare Druckfunktion, $x \in \mathbb{R}^3$ und $t \geq 0$ die Zeitvariable. Dann heißt

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{u} + \mathbf{u} \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \Delta \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mathbf{f}^a$$

$$\rho_t = -\operatorname{div}(\rho \mathbf{u})$$

$$\mathbf{u}(x, 0) = \mathbf{u}_0(x)$$

das System der Navier-Stokes-Gleichungen mit Anfangsbedingung, inkl. Kontinuitätsgleichung.

Die Funktion $\mathbf{u}_0(x)$ ist ein vorgegebenes Vektorfeld im $\mathbb{R}^3$, $\mathbf{f}^a \equiv \mathbf{f}^a(x, t)$ ist die Funktion aller äußeren Kräfte.

Wort und Wissen Klima-Arbeitsgruppe

Peter Korevaar
Hanna Ziegler
Albrecht Ehrmann
Maik Böhm

Dank an: Markus Blietz, Reinhard Junker, Markus Merk, Peter Trüb, Henrik Ullrich