



Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz,  
Bau und Reaktorsicherheit

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Förderkennzeichen: 03DAS083



# Einführung in die Klimamodellierung

Manfred Fink  
Lehrstuhl für Geoinformatik  
Friedrich – Schiller – Universität Jena

# Schlüsselfragen über das Klimasystem

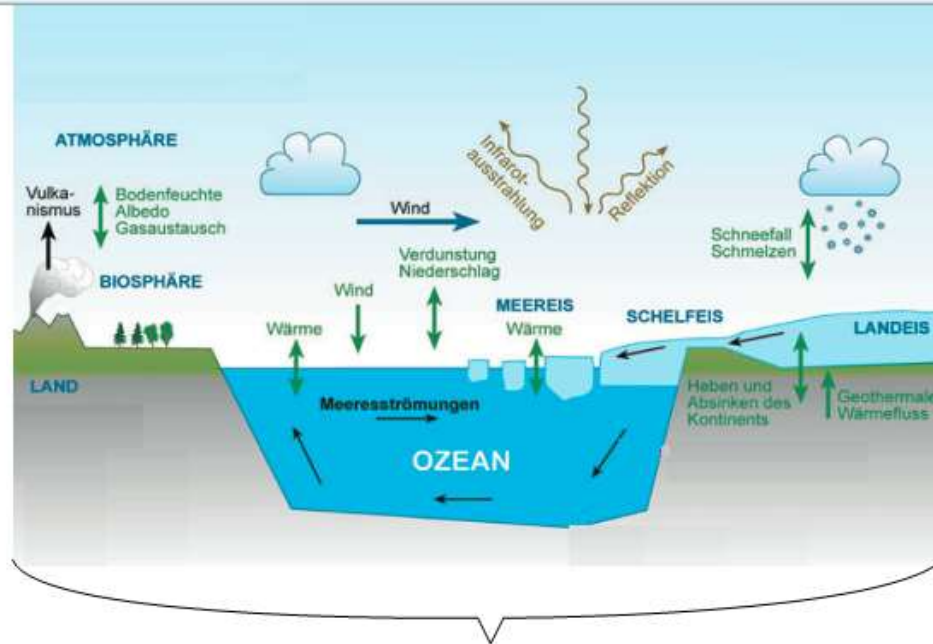
Welche Änderungen wurden beobachtet?

Wie gut wird das vergangene und das aktuelle Klima verstanden?

Welche Änderungen liegen noch vor uns?

## Beobachtungen:

- Temperaturen
- Niederschlag
- Schnee bzw. Eis
- Meeresspiegel
- Zirkulationen
- Extremereignisse



## Simulationen:

- Natürliche Variation
- Klimatreiber
- Globales Klima
- Regionales Klima

## Ablauf:

Paläoklima & Zeitreihenmessungen

Aktuelles Klima

Zukünftiges Klima

Eigene Darstellung (2017)

# Was sind Klimamodelle?

- Wie alle Modelle sind auch Klimamodelle eine vereinfachte Darstellung der Wirklichkeit
- Mit diesen Modellen können wichtige Erkenntnisse über die Folgen von natürlichen und menschlichen Einflüssen auf das Klimasystem verstanden werden.

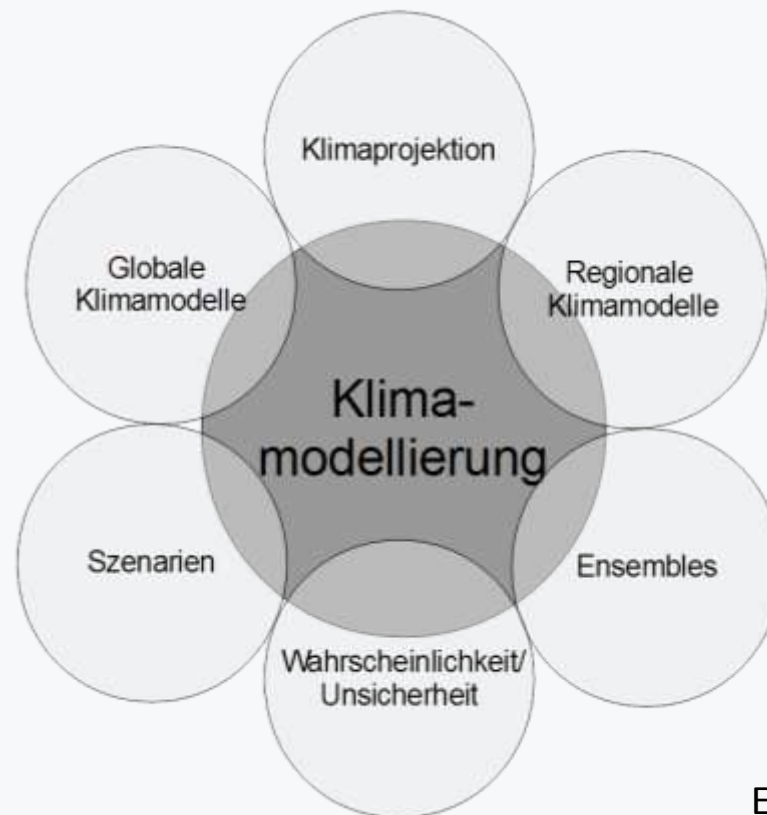
# Klimamodellierung

Klimamodelle gelten als komplexeste Versuche um die Prozesse und Wechselwirkungen im Erdsystem zu beschreiben und quantifizieren. Dies beinhaltet die Beschreibung folgender Prozesse der...

- Atmosphäre (physikalische und chemische Prozesse)
- Ozeane (physikalische und chemische Prozesse)
- Landoberfläche (Vegetation, Biogeochemie, Schnee- Eisbedeckung)
- Interaktionen zwischen den verschiedenen Systemen und des Anthropogenen Einflusses

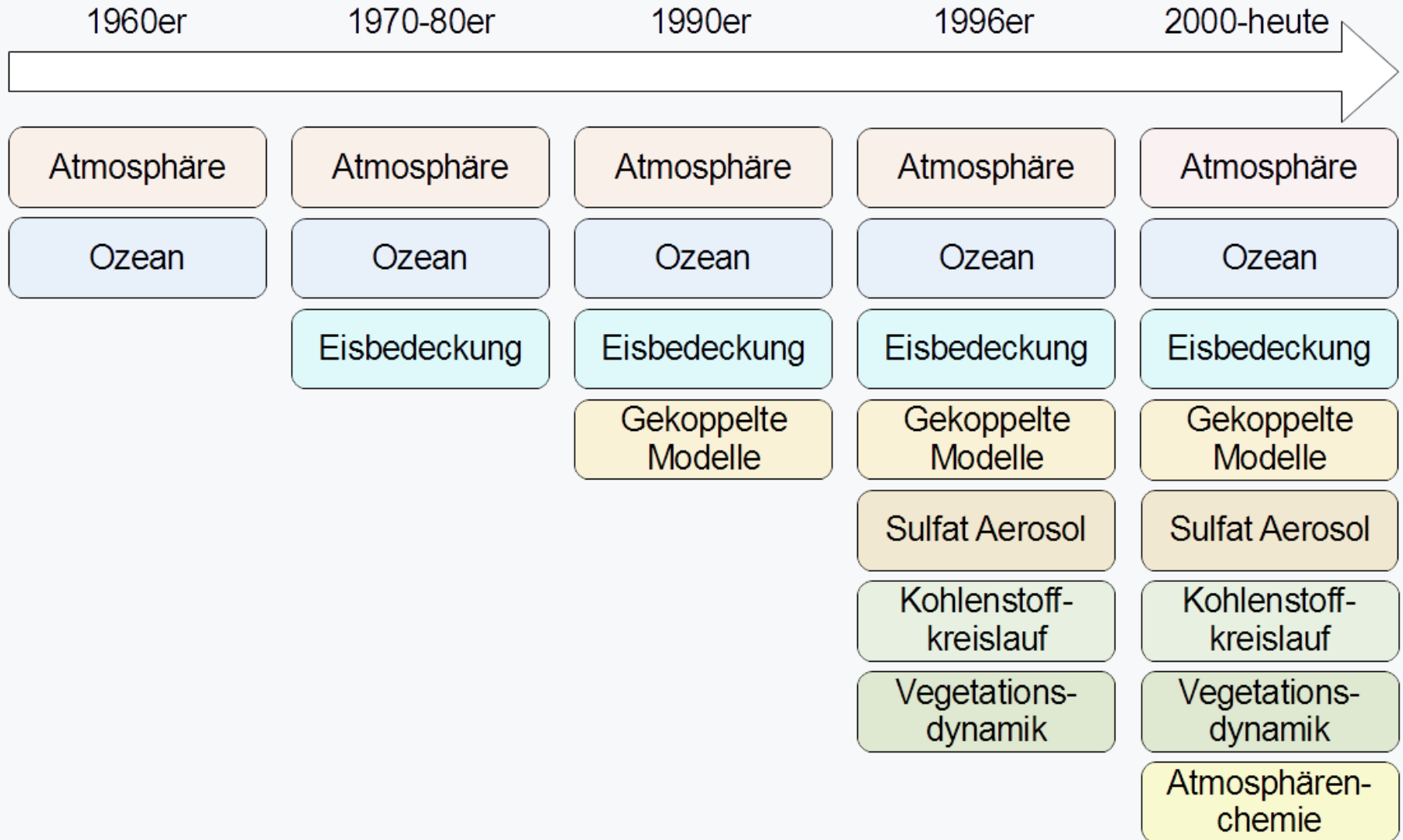
# Klimamodellierung – warum?

- Beschreibung und Verständnis der Prozessdynamik
- Abschätzung von Prozessen
- Prognose, Vorsorge, Planung, Warnsysteme, Entwicklung von Strategien
- Politische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Relevanz



Eigene Darstellung (2017)

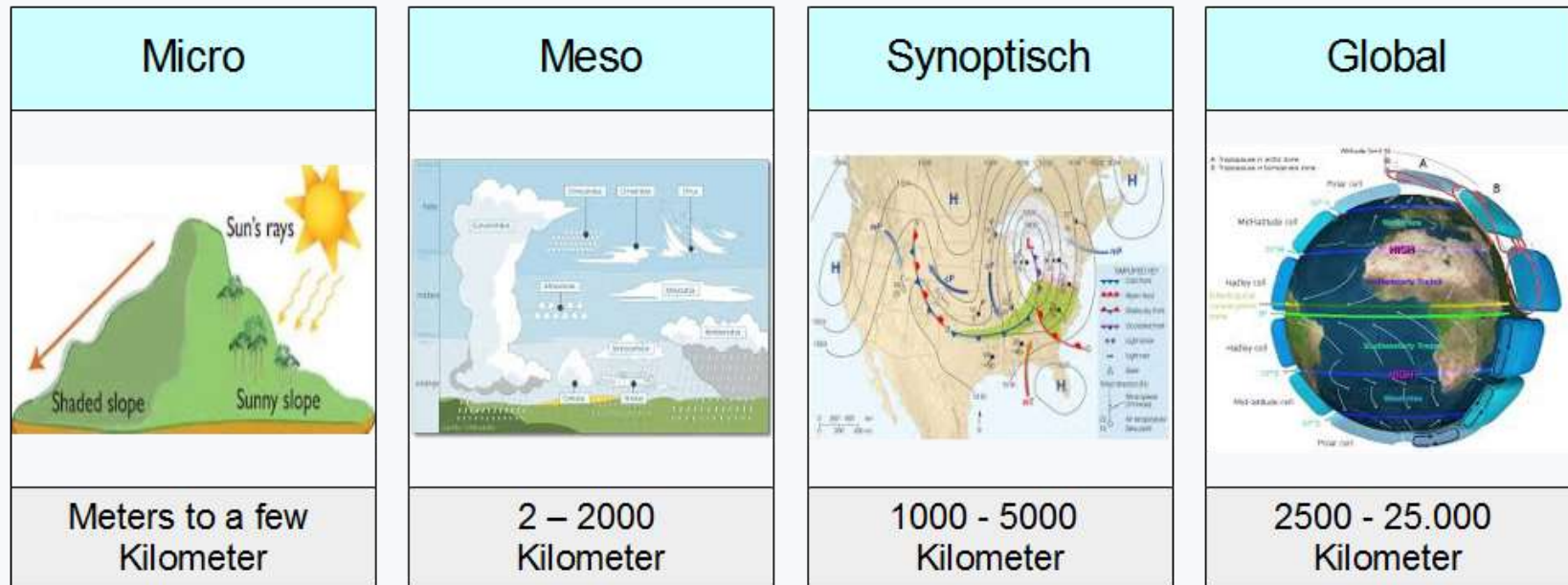
# Entwicklung von Klimamodellen



nach IPCC (2001)

# Skalen der Klimamodellierung

Die physikalischen Prozesse werden über verschiedene räumliche Skalen simuliert:



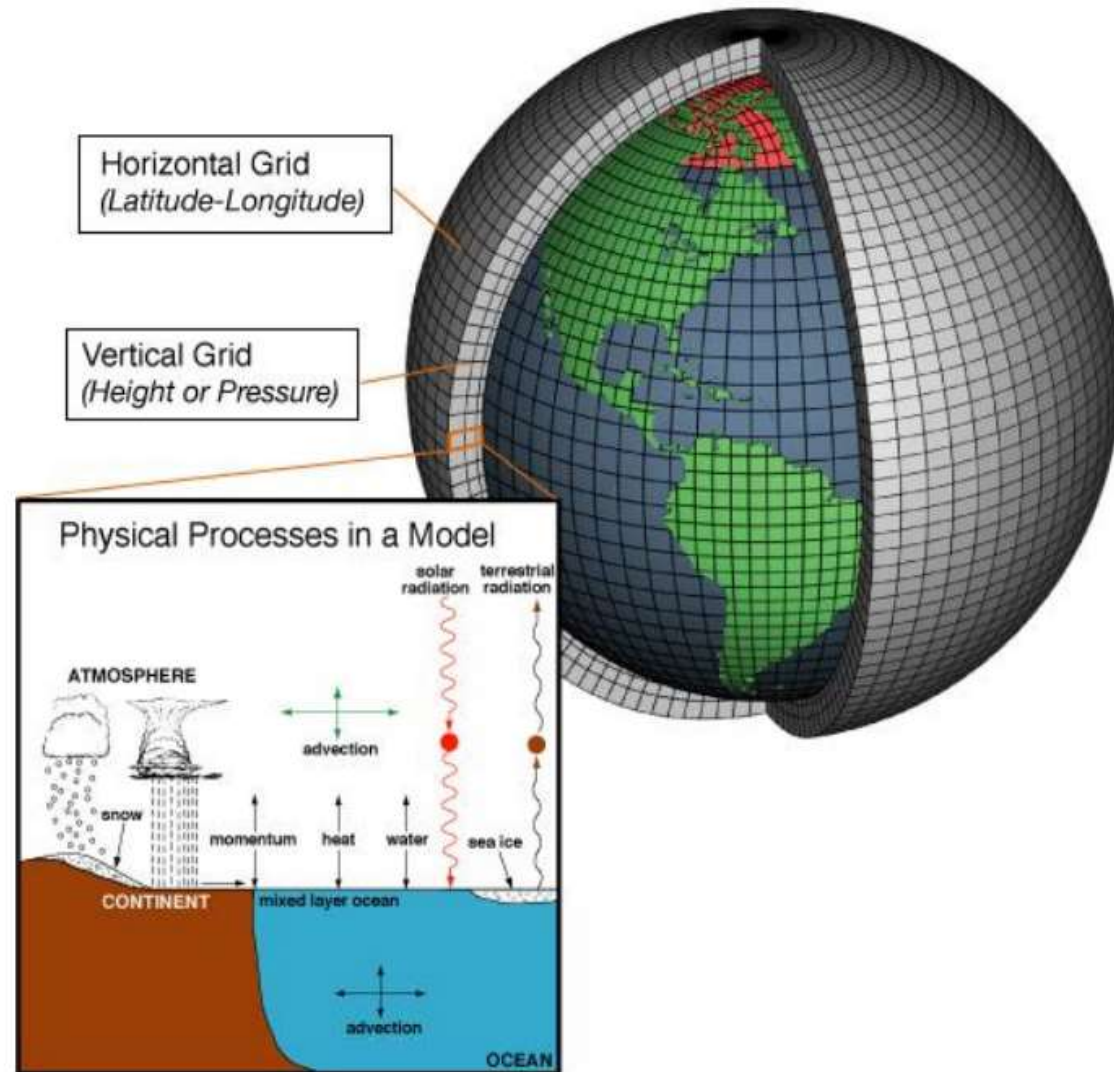
Eigene Abbildung



# Globale Klimamodelle

In jedem Gitter wird folgendes berechnet:

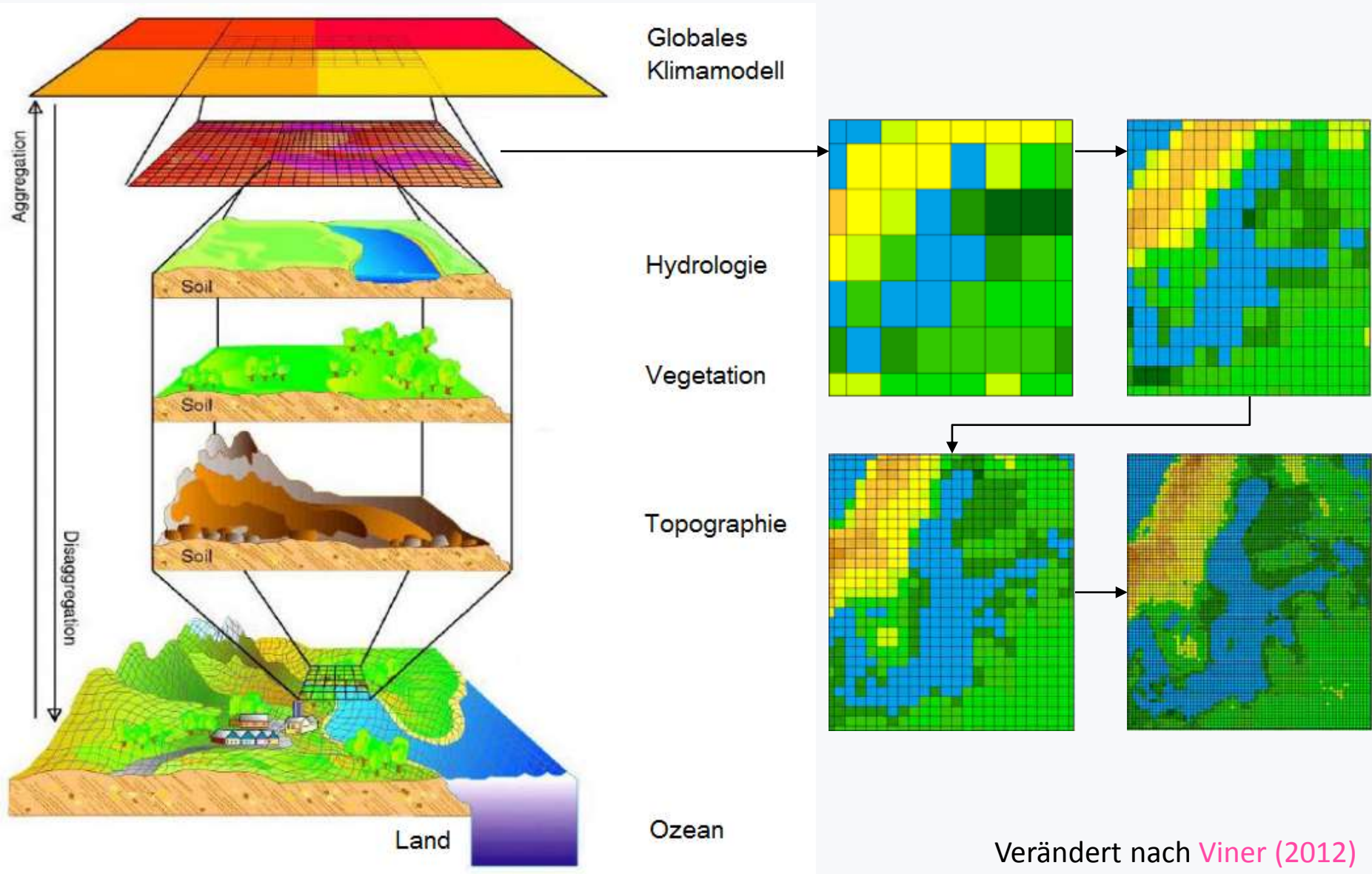
- Wasserdampf
- Wolken atmosphärische Interaktionen
- Direkte/indirekte Einflüsse von Aerosolen
- Schneebedeckung/ Meereisbedeckung
- Grobskaliger Hitzetransport in Wasser und Atmosphäre



National Oceanic and Atmospheric Administration  
(NOAA) (2012)

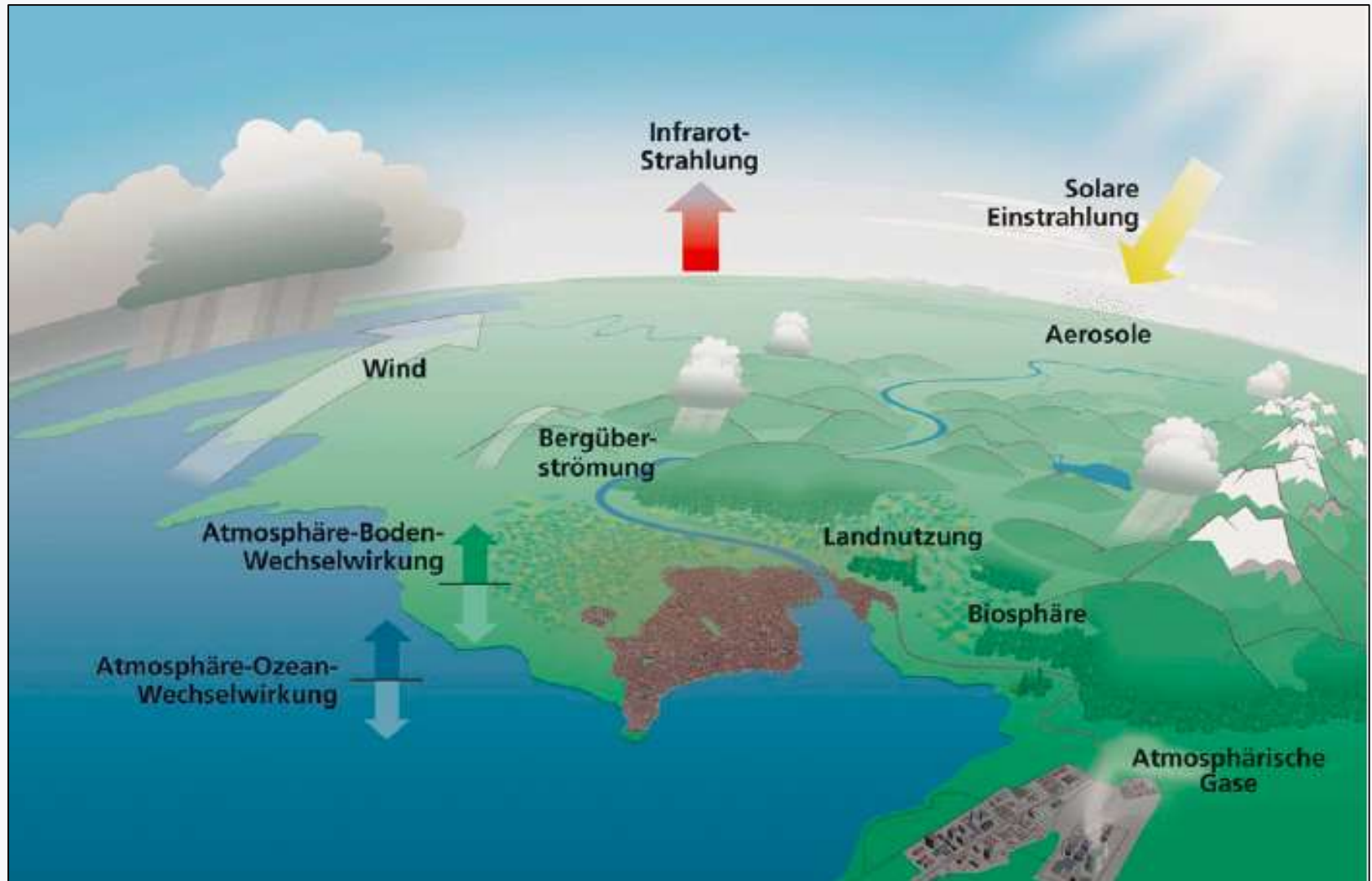


# Downscaling → Regionale Klimamodelle



Verändert nach Viner (2012)

# Regionale Klimamodelle - Systemkomponenten



Verändert Brasseur, Jacob & Schuck-Zöller (2017)

# Downscaling → Dynamisch

## Dynamische Regionalmodelle (dynamical downscaling):

Dynamische Regionalmodelle arbeiten ähnlich wie globale Modelle und simulieren die Dynamik der physikalischen und chemischen Prozesse in der Atmosphäre. Sie beziehen sich aber auf einen begrenzten Ausschnitt der Erdoberfläche und können daher bei gegenwärtigen Rechnerkapazitäten eine höhere Auflösung rechnen, die aktuell (2010) in Deutschland bei 10 bis 20 km liegt.

# Downscaling → Statistisch

## Statistische Regionalmodelle (statistical downscaling):

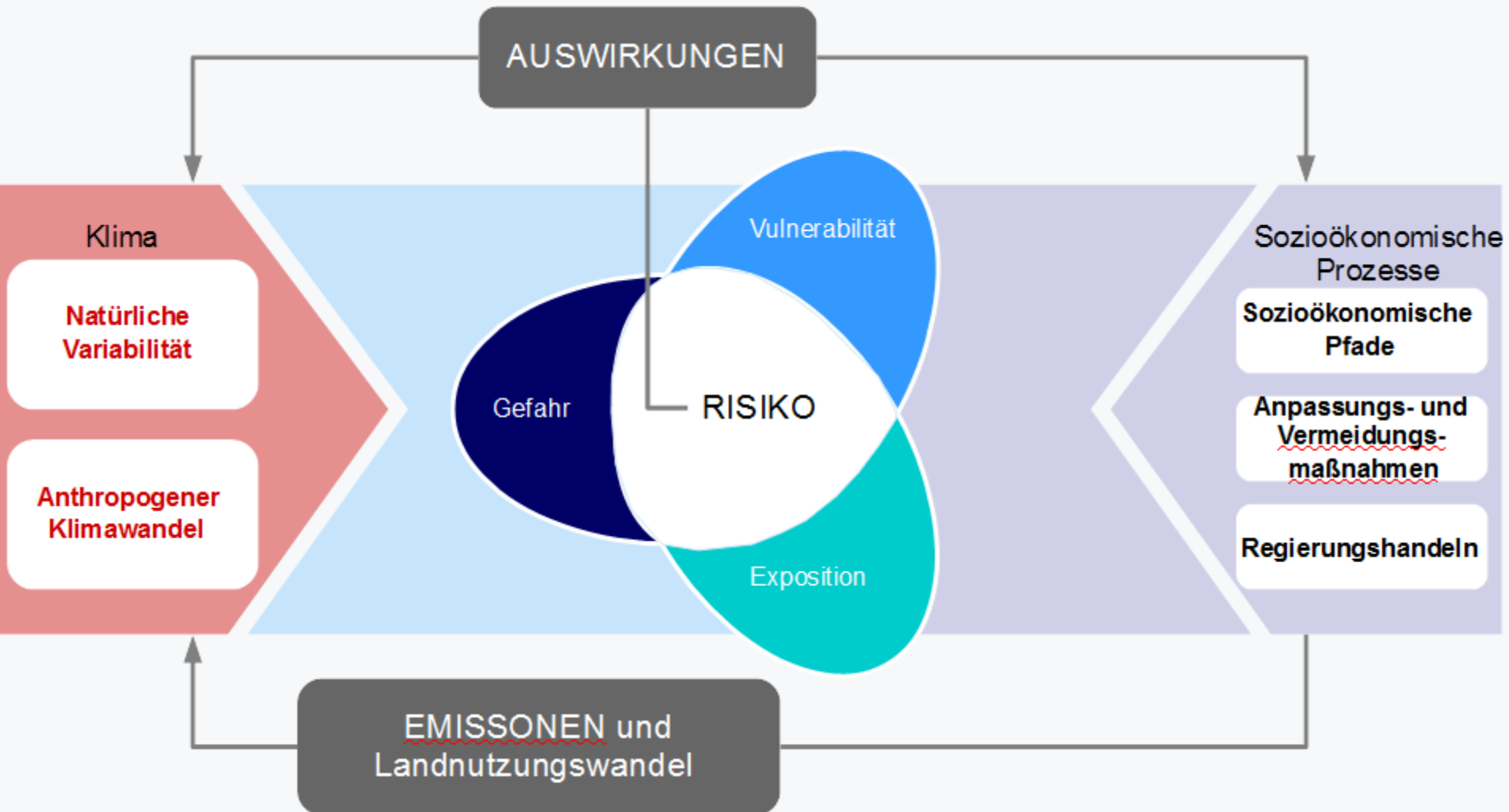
Statistische Regionalmodelle nutzen die statistischen Zusammenhänge zwischen den beobachteten großräumigen Zirkulationsmustern und dem lokalen und regionalen Wettergeschehen. Die gegenwärtigen Zusammenhänge werden von Messdaten übernommen. Die künftigen Änderungen der großräumigen Strukturen stammen aus globalen Klimamodellen, wobei die heutigen statistischen Beziehungen auf die künftigen Verhältnisse übertragen und daraus die regionalen Änderungen abgeleitet werden.

# Regionale Klimamodelle - Deutschland

Regionale Klimamodelle im Überblick (Eigene Tabelle)

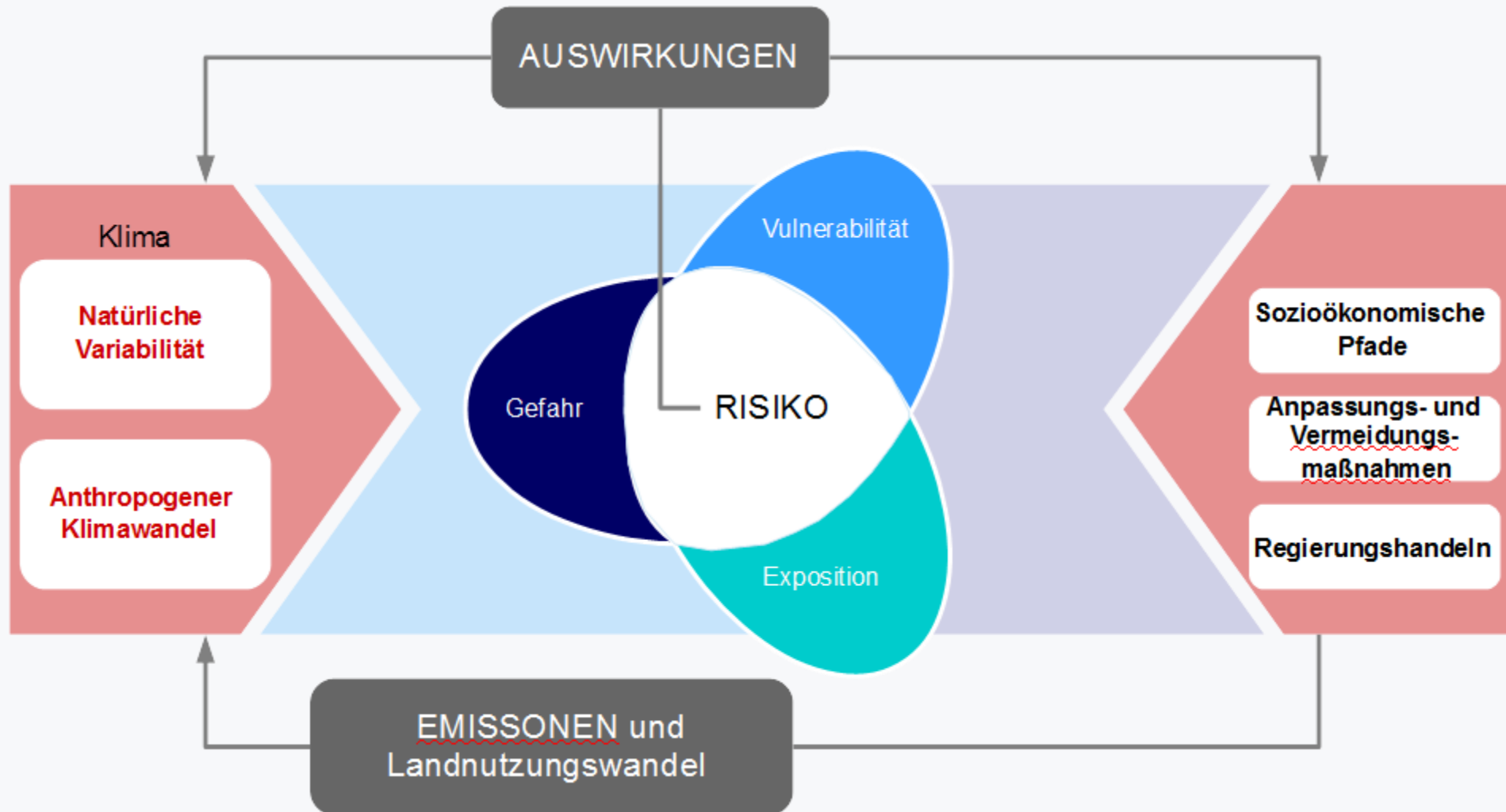
	<b>CLM</b>	<b>REMO</b>	<b>STAR</b>	<b>WETTREG</b>
<b>Modelltyp</b>	dynamisch	dynamisch	statistisch	statistisch-dynamisch
<b>Zeitraum</b>	1990 - 2100	1990 - 2100	2007 - 2060	1961 - 2100
<b>Emissions-szenario</b>	A1B, B1	A1B, A2, B1	A1B	A1B, A2, B1
<b>Räumliche Auflösung</b>	0.165°	0.088°	stations-abhängig	stations-abhängig
<b>Zeitliche Auflösung</b>	stündlich	stündlich	Tageswerte	Tageswerte

# Risikomanagement: Anthropogener Klimawandel



nach IPCC 2014

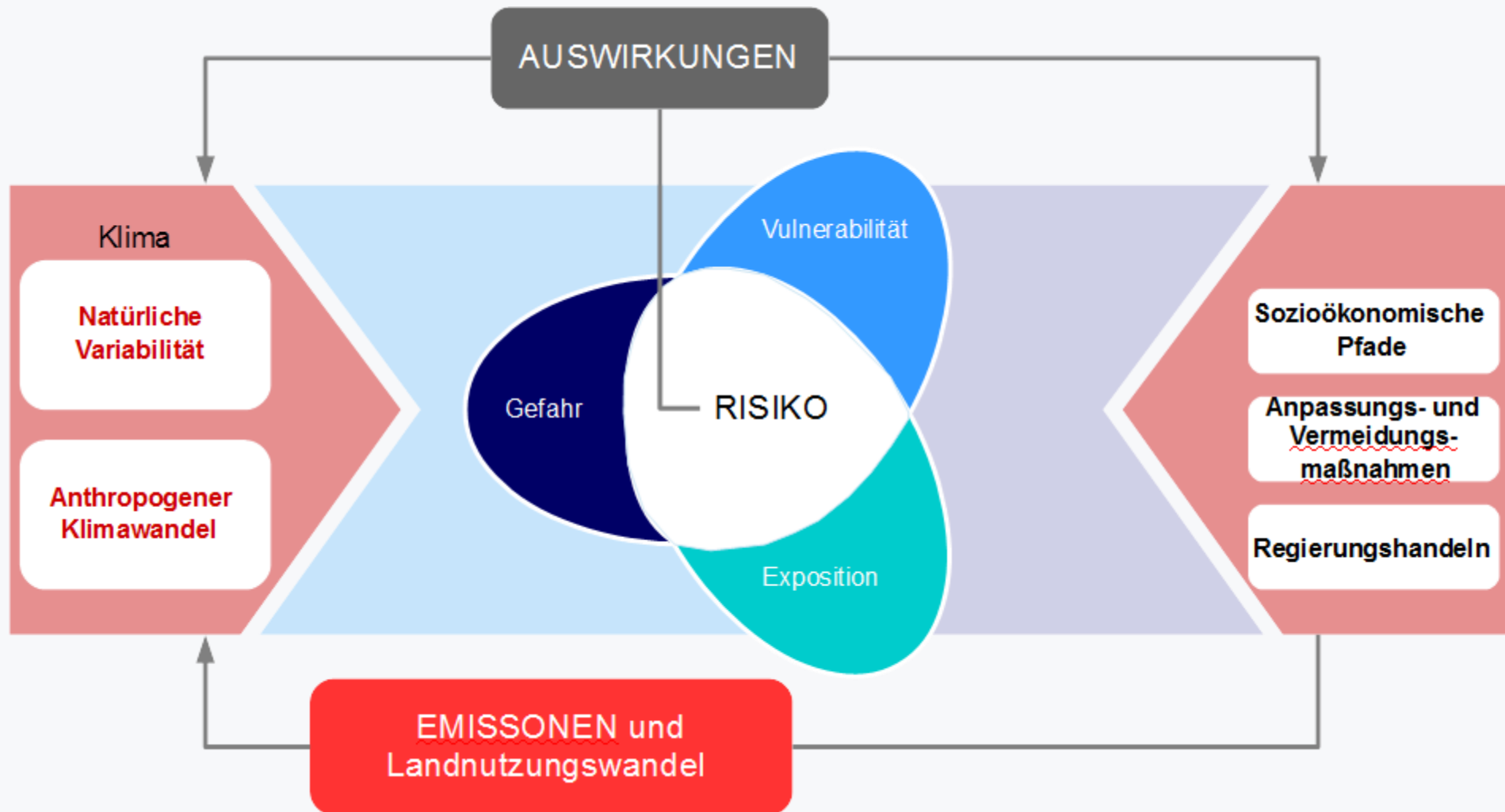
# Risikomanagement: Anthropogener Klimawandel



nach IPCC 2014



# Antropogener Klimawandel: Szenarien



nach IPCC 2014

# Szenarien

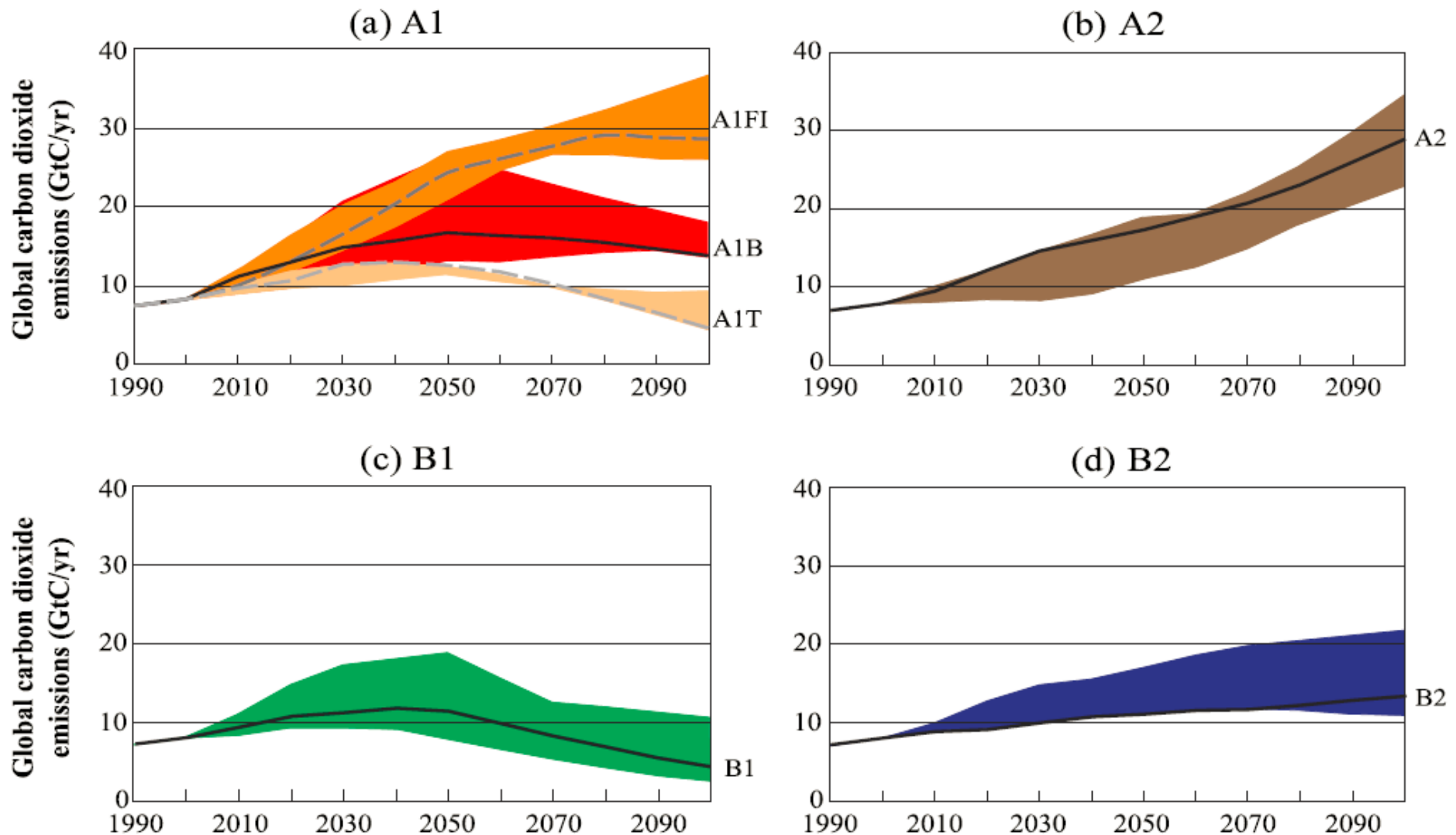
Szenarien spielen eine wichtige Rolle für die Berechnung möglicher Klimaänderungen. Sie basieren auf einer Reihe von Annahmen über weltweite Entwicklungen wie **Bevölkerungswachstum**, **ökonomische** und **soziale Entwicklung**, **technologische Veränderungen**, **Ressourcenverbrauch** und **Umweltmanagement**. Auf Basis dieser Annahmen werden Aussagen darüber getroffen, wie sich der Ausstoß von Treibhausgasen (Emissionsszenarien) und folglich die Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre (Konzentrationsszenarien) entwickeln werden.

# Emmissionszenarien

Ein Emissionsszenario ist eine Abschätzung des zukünftigen Ausstoßes anthropogener Treibhausgase. Durch die Definition mehrerer Versionen wird es möglich, eine Bandbreite denkbarer Entwicklungen abzudecken. Diese Szenarien bilden die Grundlage für die Simulation des zukünftigen Klimas mit Hilfe von globalen Zirkulationsmodellen.

Die Beschreibung verschiedener Szenarien bietet die Möglichkeit, alternative Abbilder der Zukunft zu zeichnen, um so die Folgen bestimmter gesellschaftlicher Entwicklungen auf das Weltklima aufzuzeigen.

# Emmissionszenarien



Zeitliche Entwicklung des globalen Kohlendioxidausstoßes von 1990 bis 2100 in 6 Szenarien nach Nakicenovic et al. (2000)

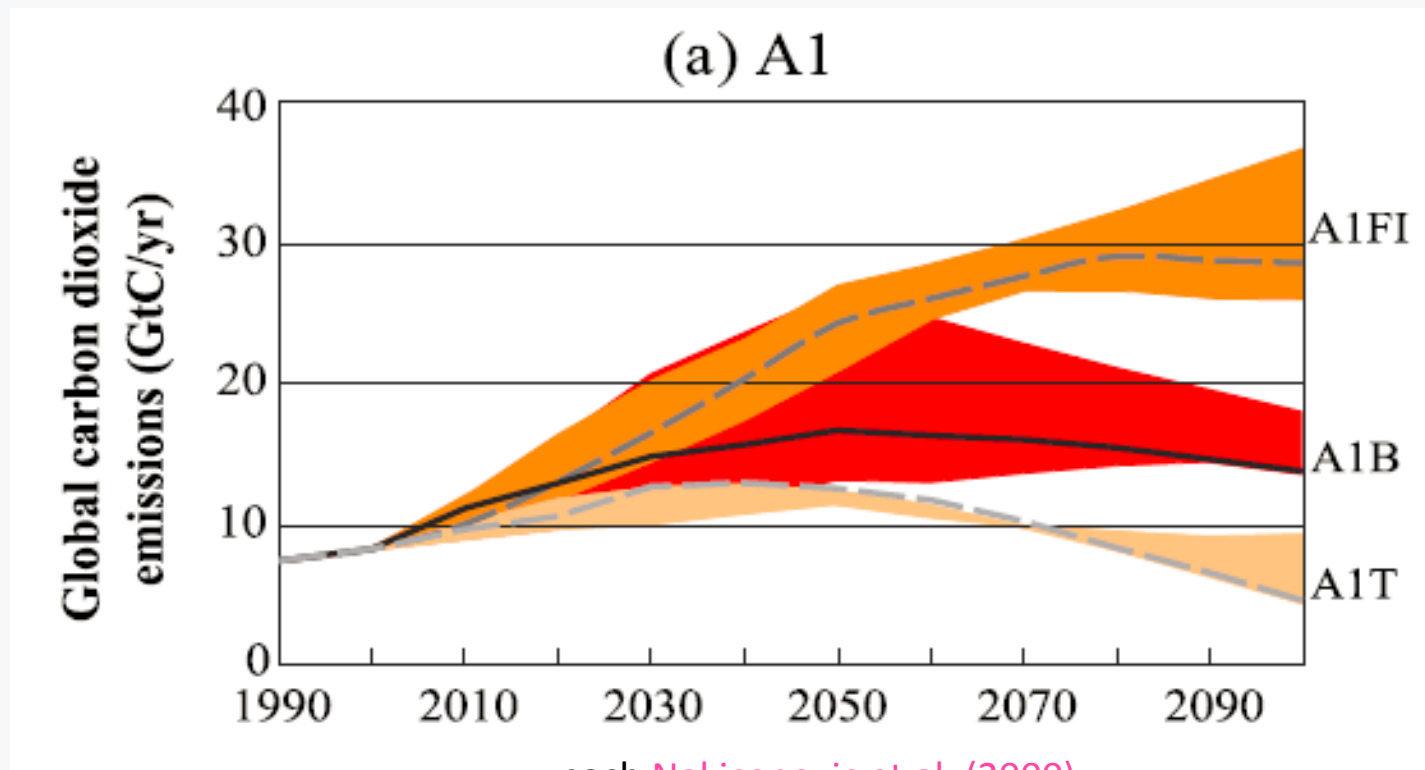
# Szenariengruppe A1

## Die Welt des globalen Wirtschaftswachstums:

- Ein gemäßigtes Bevölkerungswachstum führt zu einem Anstieg der Weltbevölkerung auf 8,7 Mrd. Menschen bis zum Jahr 2050 und einem anschließenden Abfall auf 7 Mrd. Menschen bis 2100. Zum einen verringert sich die Sterblichkeitsrate durch besseren Zugang zu medizinischer Versorgung, zum anderen geht die Fertilität aufgrund steigenden Wohlstands zurück.
- Weiters wachsen Regionen wirtschaftlich enger zusammen, was auf die technologischen Fortschritte im Bereich Verkehr und Kommunikation zurückzuführen ist. Dies bringt eine steigende soziale und kulturelle Interaktion mit sich.

# Szenariengruppe A1

Die Szenariengruppe A1 wird in drei Gruppen aufgeteilt, welche unterschiedliche Richtungen im technologischen Wandel beschreiben: Beim **A1FI-Szenario** bilden Technologien auf Basis fossiler Energieträger weiterhin die Mehrheit. Beim **A1T-Szenario** stellen nicht-fossile Energieträger die Hauptenergielieferanten dar. Im **A1B-Szenario** werden alle Möglichkeiten zur Energiegewinnung gleichberechtigt eingesetzt.



nach Nakicenovic et al. (2000)

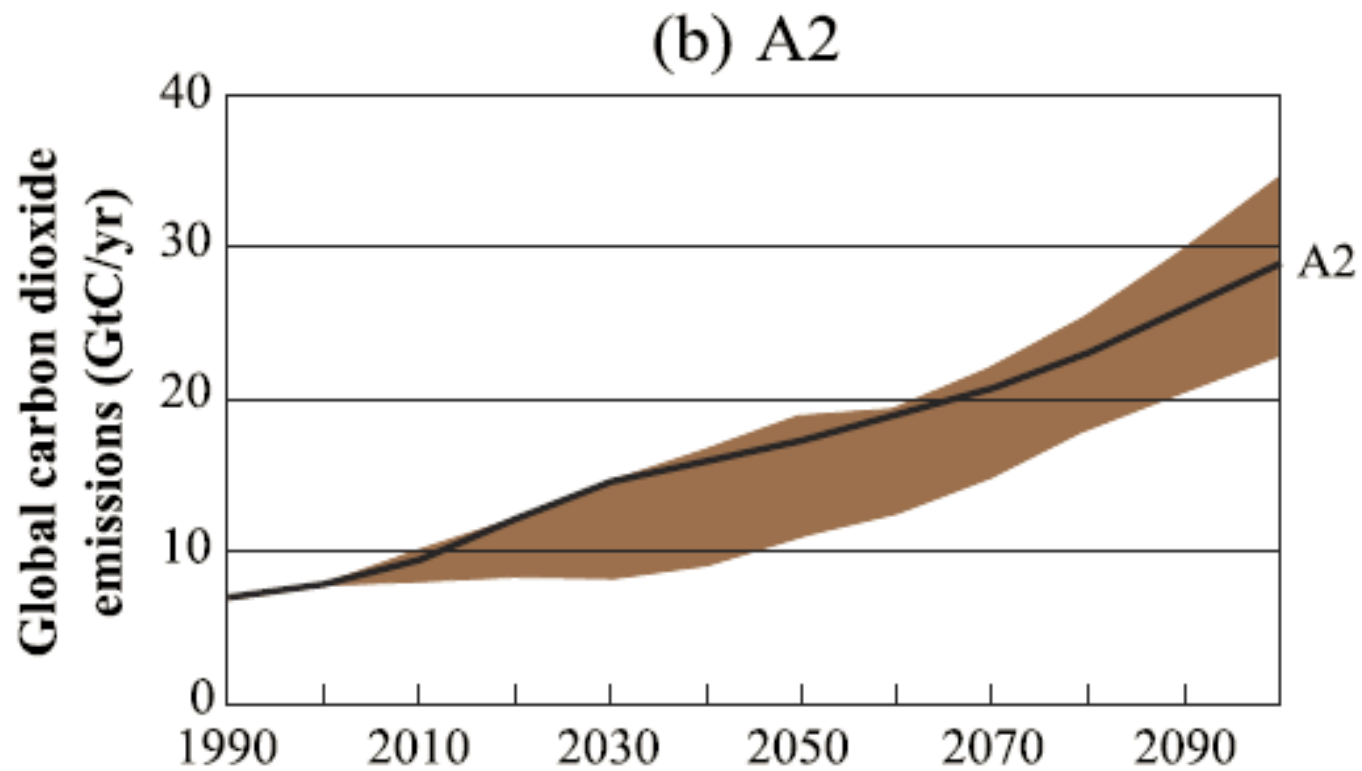
# Szenariengruppe A2

## Die „Jeder kämpft für sich Welt“:

- Die Welt des 21. Jahrhunderts ist heterogen strukturiert. Die Staaten schotten sich in Krisensituationen ab und verhalten sich in der Interaktion mit anderen zurückhaltend. Waren- und Kapitalverkehr fließen schwach, der technologische Wandel verläuft gebremst.
- Durch nur langsam sinkende Geburtenraten wächst die Bevölkerungszahl stetig, was bis zum Ende des Jahrhunderts eine Weltbevölkerung von 15 Mrd. Menschen zur Folge hat.
- Neue Technologien und Innovationen werden in einigen Regionen viel schneller eingeführt als in anderen, da sich die Industrie an die lokalen Vorkommen an Rohstoffen, dem Bildungsgrad der Bevölkerung und der Kultur anpasst. Somit führen Länder mit ergiebigen Rohstoffquellen eine ressourcenintensive Wirtschaft, wohingegen jene, denen dieser Zugang fehlt, versuchen, die Abhängigkeit von Importen zu minimieren.



# Szenariengruppe A2



nach Nakicenovic et al. (2000)

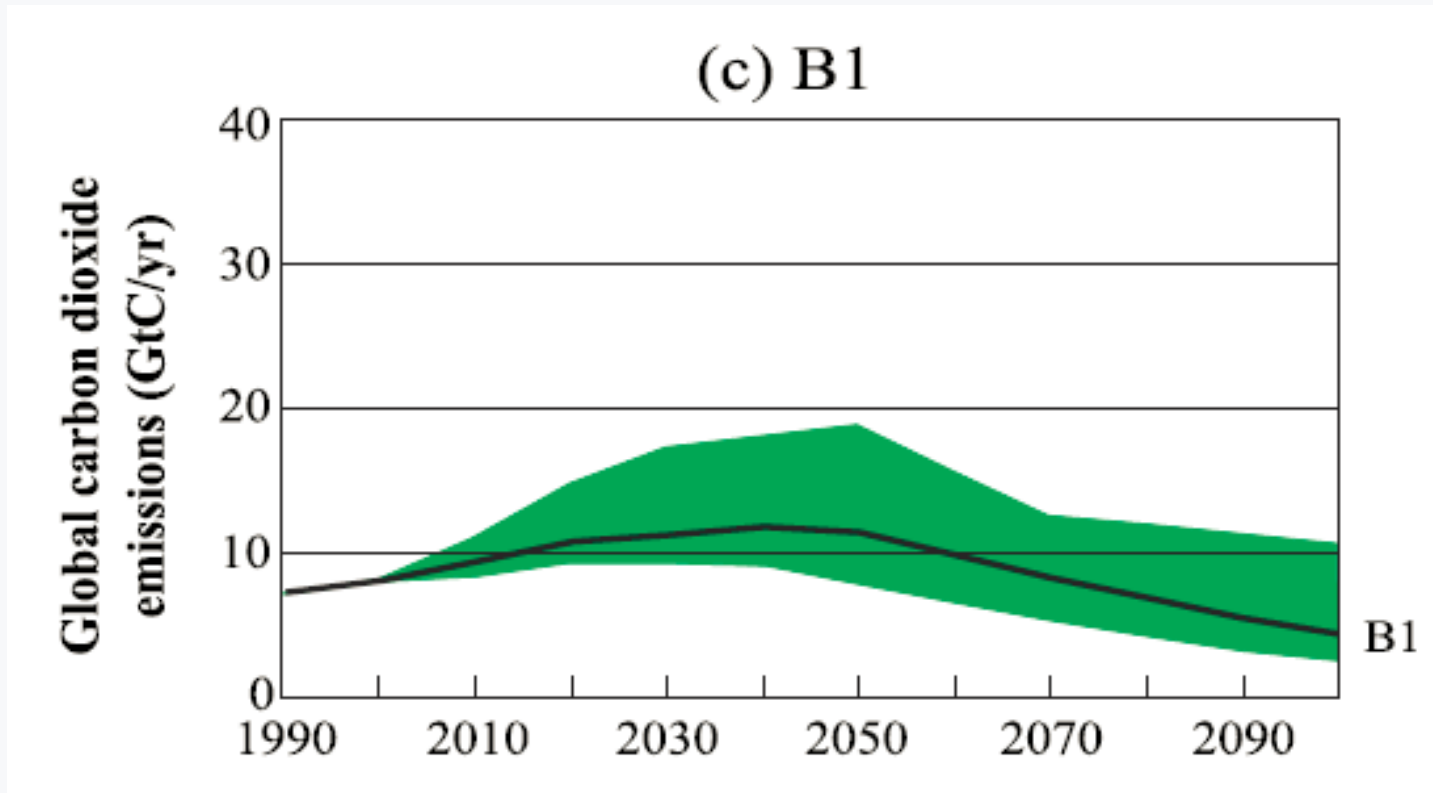
# Szenariengruppe B1

## Die geplante grüne Welt:

- In einer sich rasch verändernden und konvergierenden Welt verschiebt sich (im Gegensatz zu Szenariengruppe A1) das Hauptaugenmerk von wirtschaftlichem Wachstum zur Reinvestition der Gewinne, um die Ressourceneffizienz zu erhöhen, sozial orientierte Institutionen zu schaffen, Verteilungsgerechtigkeit zu erlangen und die Umwelt zu schützen. Im gleitenden Übergang von fossilen zu alternativen Energieträgern wird anfangs hauptsächlich noch fossiles Gas verwendet, durch ein gesteigertes Interesse am Umweltschutz gelingt jedoch den Umstieg auf nicht-fossile Energieträger.
- Ein rascher Wandel in Richtung einer Dienstleistungs- und Informationswirtschaft geht vonstatten. Die Weltbevölkerung nimmt (wie im Szenariengruppe A1) bis zum Jahr 2050 auf knapp 9 Mrd. Menschen zu und danach bis zum Ende des Jahrhunderts auf 7 Mrd. Menschen ab.

# Szenariengruppe B1

Die politischen Anstrengungen, eine homogene Einkommensverteilung und soziale Sicherheit zu erlangen, zeigen Wirkung. Ein dichtes soziales Netz schützt vor Armut und sozialem Ausschluss von schlechter gestellten Bevölkerungsgruppen.



nach Nakicenovic et al. (2000)

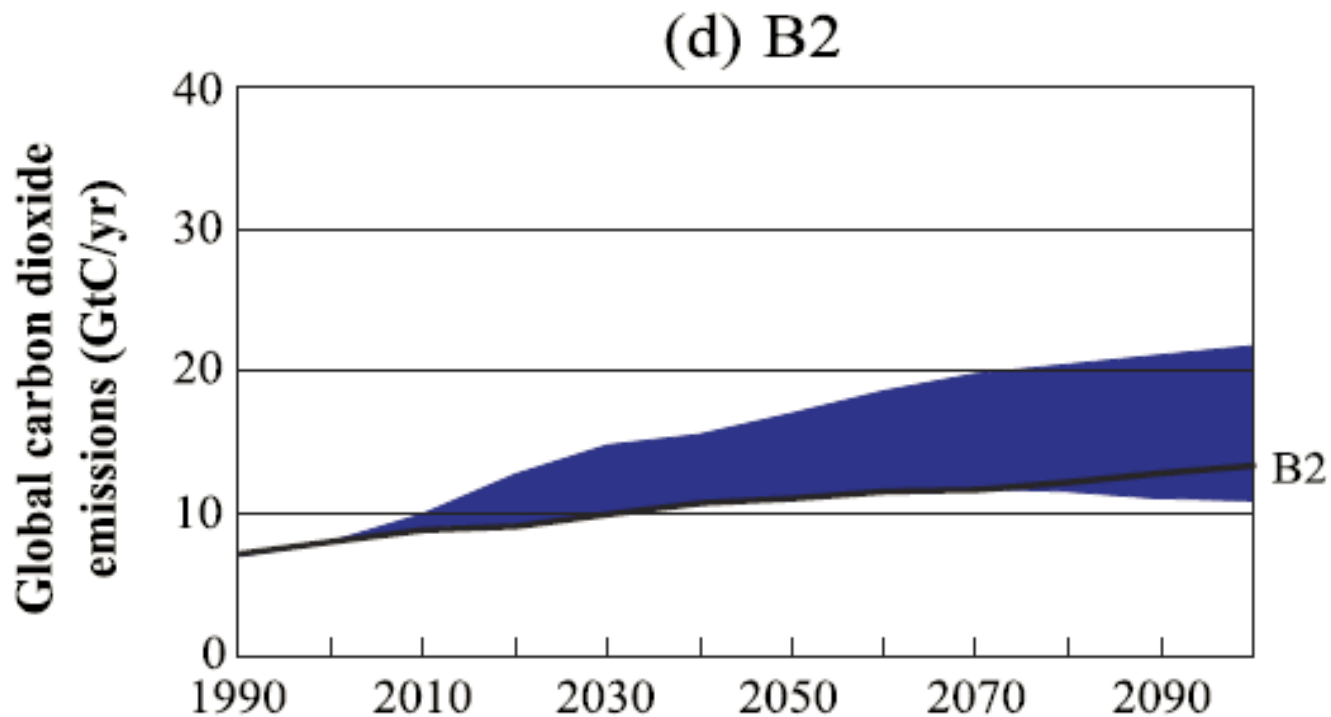
# Szenariengruppe B1

## Die Welt der grünen Regionen:

- Durch ein gesteigertes Interesse an ökologischer und sozialer Nachhaltigkeit werden (im Gegensatz zu Szenariengruppe A2) politische und wirtschaftliche Entscheidungen zunehmend von umweltbewussten Bürgern beeinflusst. Internationale Institutionen verlieren zusehends an Einfluss, an ihre Stelle treten lokale und regionale Entscheidungsträger. Es herrscht ein Trend zu lokaler Autarkie. Wohlstand, Gleichberechtigung und Umweltschutz haben hohe Priorität, diese Ziele werden durch enge soziale Netze auf kommunaler Ebene und technologischen Fortschritt erzielt.
- Die Weltbevölkerung nimmt vor allem aufgrund einer reduzierten Mortalität bis 2100 auf 10 Mrd. Menschen zu, die Fertilität geht dabei ebenfalls leicht zurück.
- Die internationalen Einkommensunterschiede sinken (jedoch nicht so deutlich wie in den Szenariengruppen A1 und B1).

# Szenariengruppe B2

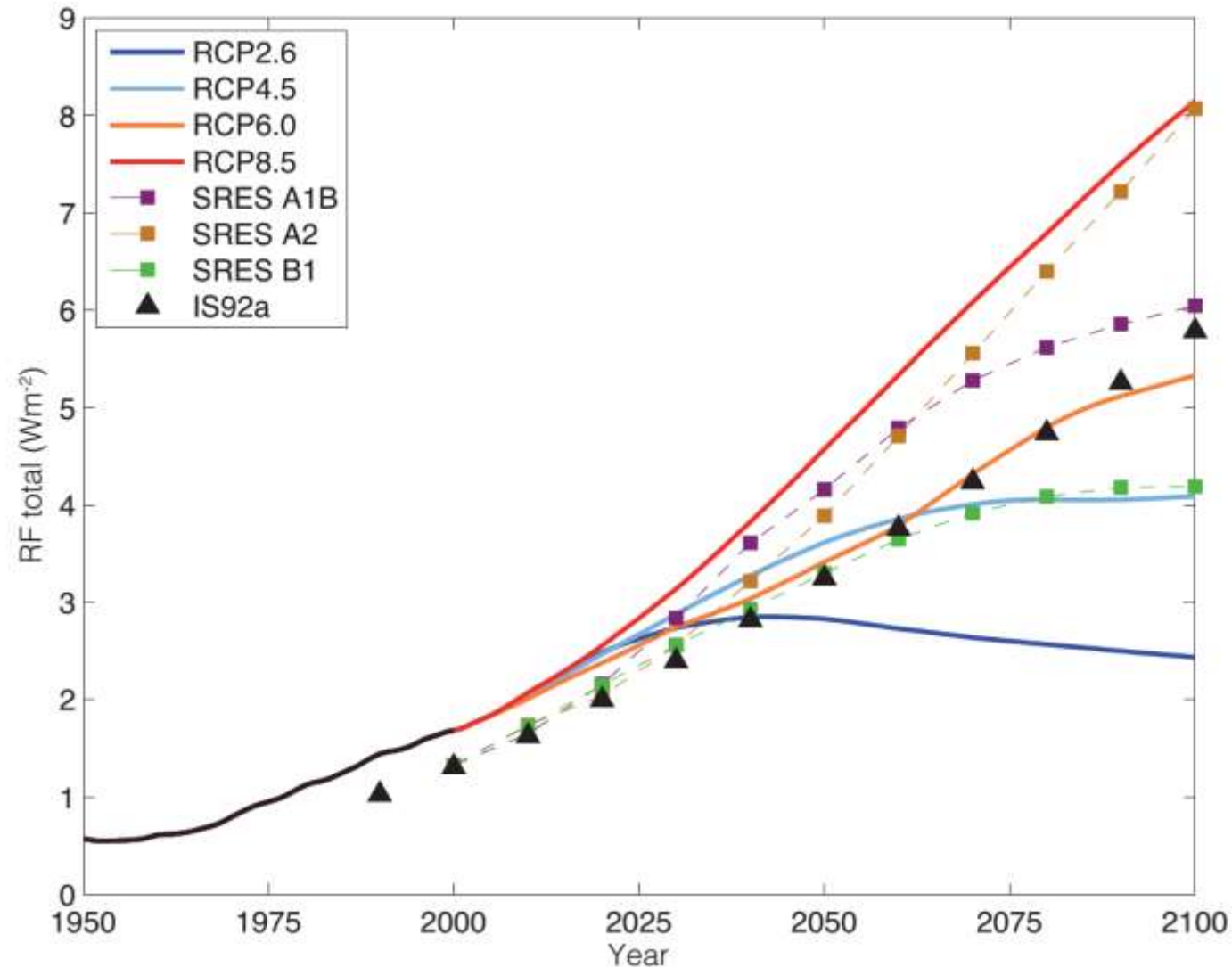
Der technologische Entwicklungsgrad ist global ungleichmäßig verteilt. Im Gegensatz dazu wird auf lokaler Ebene die Landnutzung besser organisiert und in Infrastruktur für mehr Unabhängigkeit vom motorisierten Individualverkehr und weniger Zersiedelung investiert.



nach Nakicenovic et al. (2000)

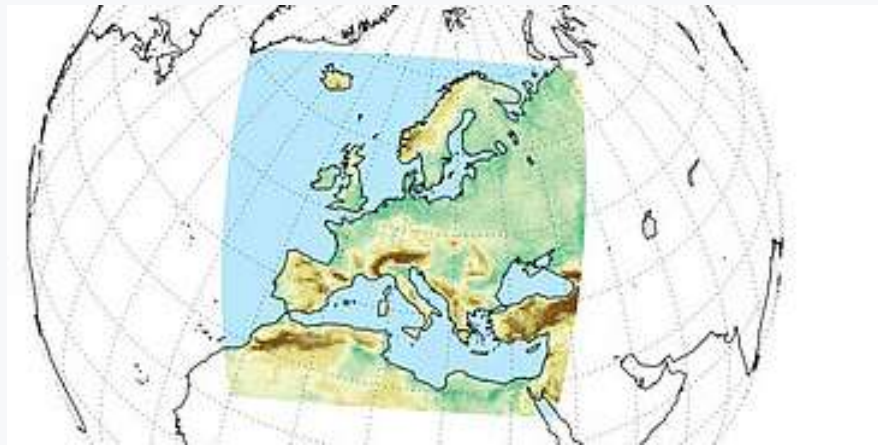
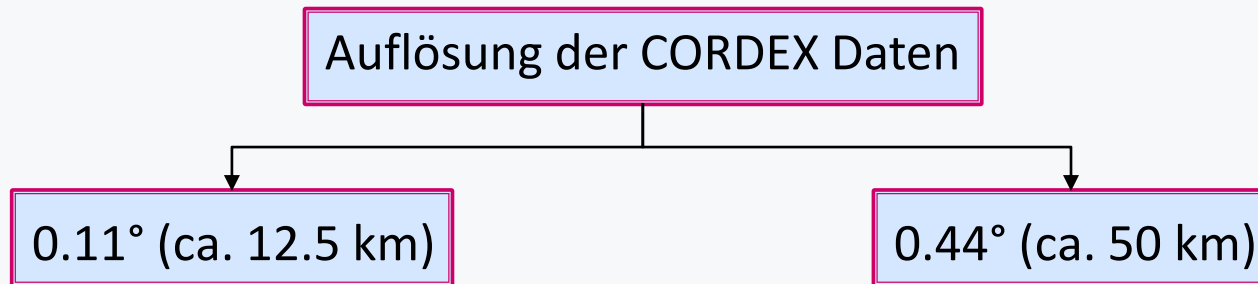
# Szenariengruppe RCP (representative concentration pathway)

Die Aktuellen Emissionsszenarien orientieren sich nicht mehr an direkt an einer „Storyline“ sondern nur noch am Resultat:  
**Änderung der Strahlungsbilanz zum Jahr 2100**



# CORDEX

Die WCRP-Initiative „COordinated Downscaling EXperiment“ stellt einen internationalen Rahmen zur koordinierten Verbesserung und Anwendung regionaler Verfeinerung von Klimasimulationen dar. Alle verfügbaren Datensätze basieren auf Simulationen globaler Klimamodelle aus CMIP5.



nach [Jacob et al. \(2013\)](#)



Heruntergerechnete Modelle nach 0.11° Auflösung.

GCM	RCM	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 run 1	CLMcom-CCLM4-8-17		X	X
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 run 1	SMHI-RCA4		X	X
MOHC-HadGEM2-ES run1	CLMcom-CCLM4-8-17		X	X
MOHC-HadGEM2-ES run1	KNMI-RACMO22E		X	X
MOHC-HadGEM2-ES run1	SMHI-RCA4		X	X
ICHEC-EC-EARTH run12	CLMcom-CCLM4-8-17		X	X
ICHEC-EC-EARTH run3	DMI-HIRHAM5		X	X
ICHEC-EC-EARTH run1	KNMI-RACMO22E		X	X
ICHEC-EC-EARTH run12	SMHI-RCA4	X	X	X
IPSL-INERIS-CM5A-MR run1	WRF331F		X	X
MPI-M-MPI-ESM-LR run1	CLMcom-CCLM4-8-17		X	X
MPI-M-MPI-ESM-LR run1	SMHI-RCA4		X	X
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 run 1	CNRM-ALADIN53		X	X

# Klimamodellunsicherheiten

## Projektionen des zukünftigen Klimas enthalten viele Unsicherheiten:

- Die Emissionsszenarien enthalten zahlreiche Unsicherheiten, z.B. zukünftige wirtschaftliche Entwicklung, politische Entscheidungen etc.. Diese Unsicherheiten sind bekannt und können (theoretisch) von den Menschen kontrolliert werden.
- Die Modelle sind nie perfekt – zum Beispiel kleinskalige Prozesse die unterhalb der Auflösung des Modells stattfinden oder stark vereinfachte Prozesse der Atmosphärenchemie
- Es gibt immer Prozesse und Feedbacks die nicht repräsentiert sind.

nach Weber und Eggert (2016)

# Klimamodellunsicherheiten

## Welche Prozesse Fehlen?

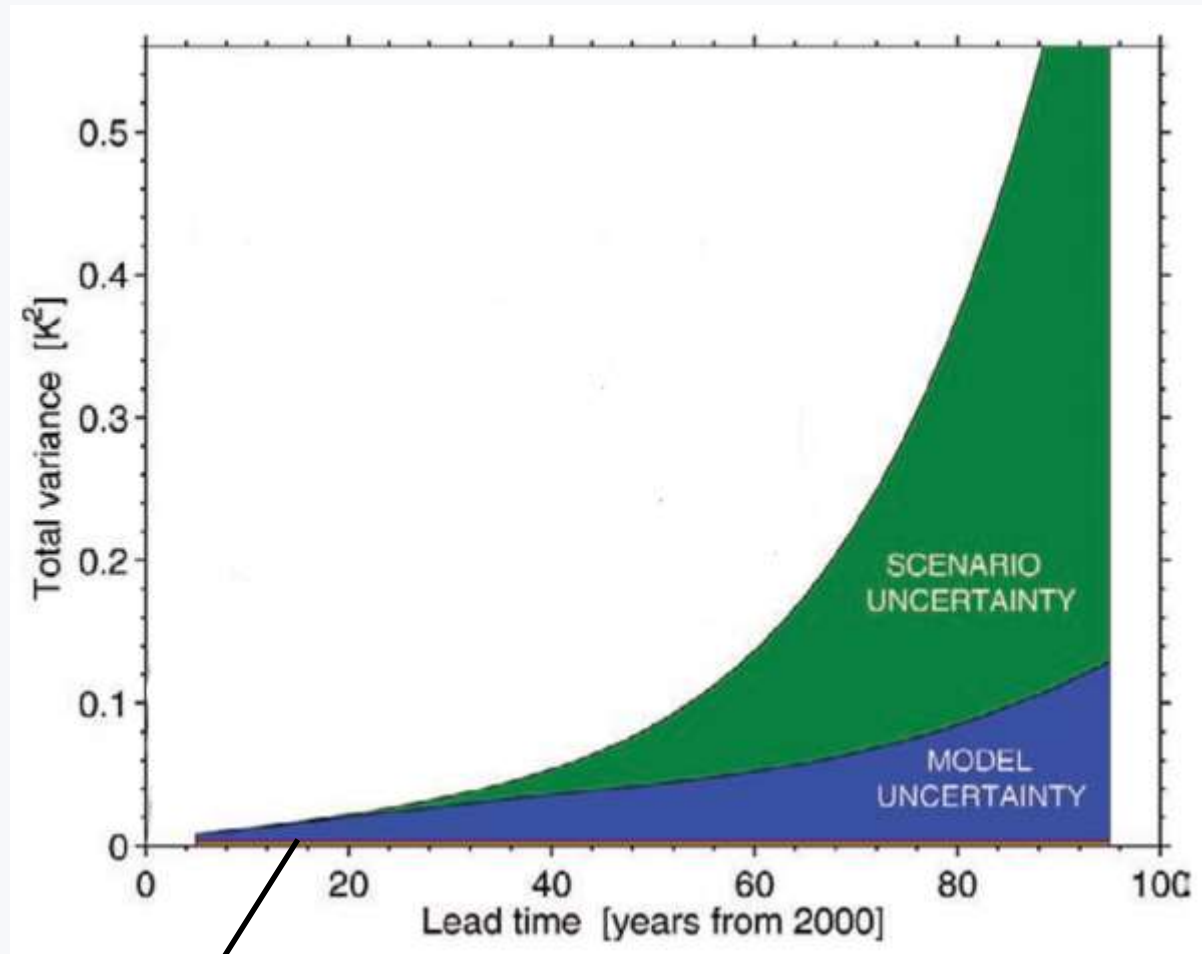
Es wird immer Prozesse geben die in Modellen nicht enthalten sind. Gründe hierfür sind:

- Manche Vorgänge sind schlicht zu Komplex: z.B. eine vollständige Beschreibung der Atmosphärenchemie und Aerosolverteilung.
- Rückkopplungsmechanismen sind nicht immer klar: z.B. auftauen des Permafrostes und damit verbundene Methanemissionen
- Vorgänge die Einfach noch gar nicht bekannt sind. (ein wichtiger Grund die Erforschung und Beobachtung des Klimasystems weiter voranzutreiben)

nach Weber und Eggert (2016)

# Klimamodellunsicherheiten

## Anteile der Gesamtunsicherheit über die Projektionszeit

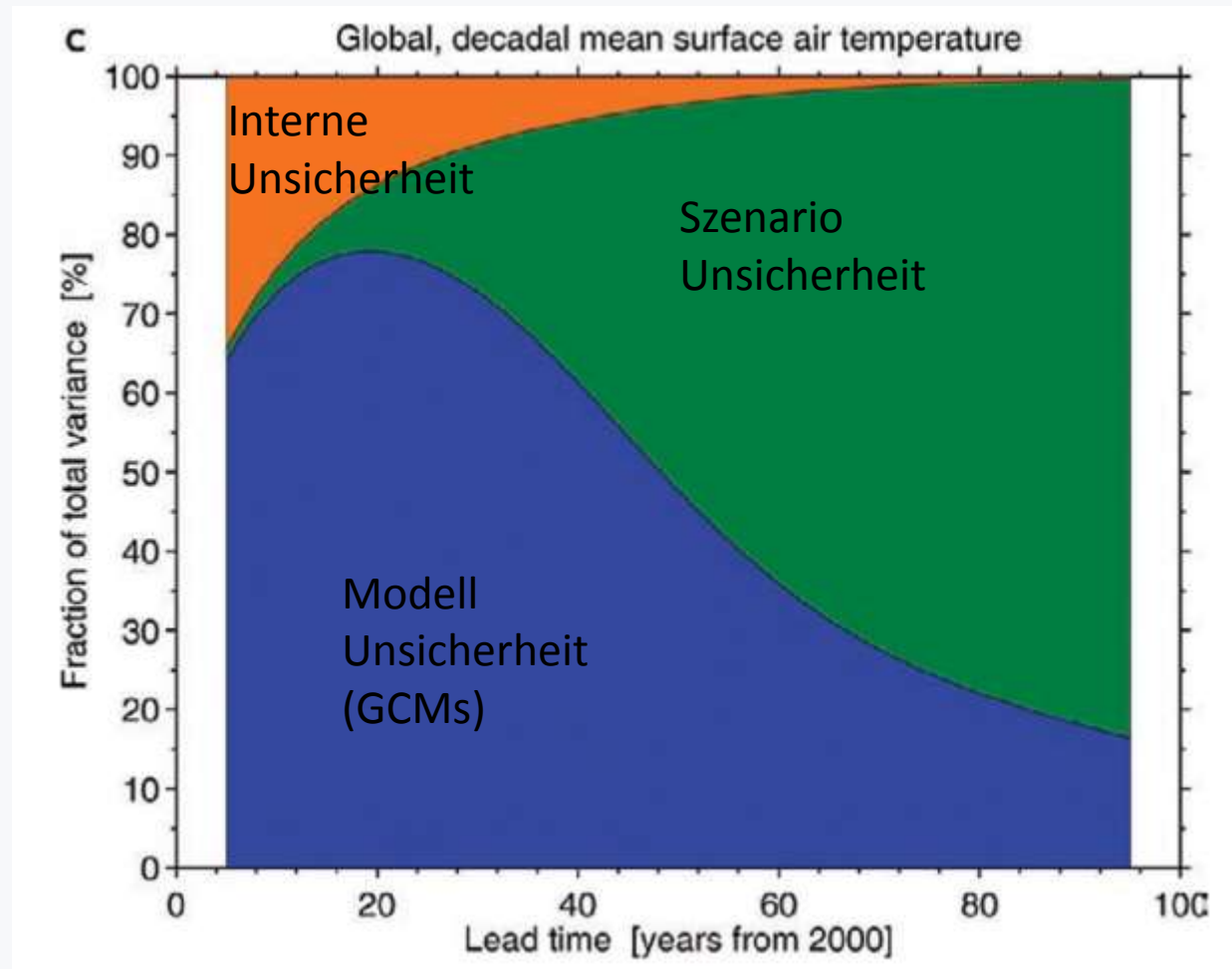


Interne Unsicherheit

nach Hawkins und Sutton (2009)

# Klimamodellunsicherheiten

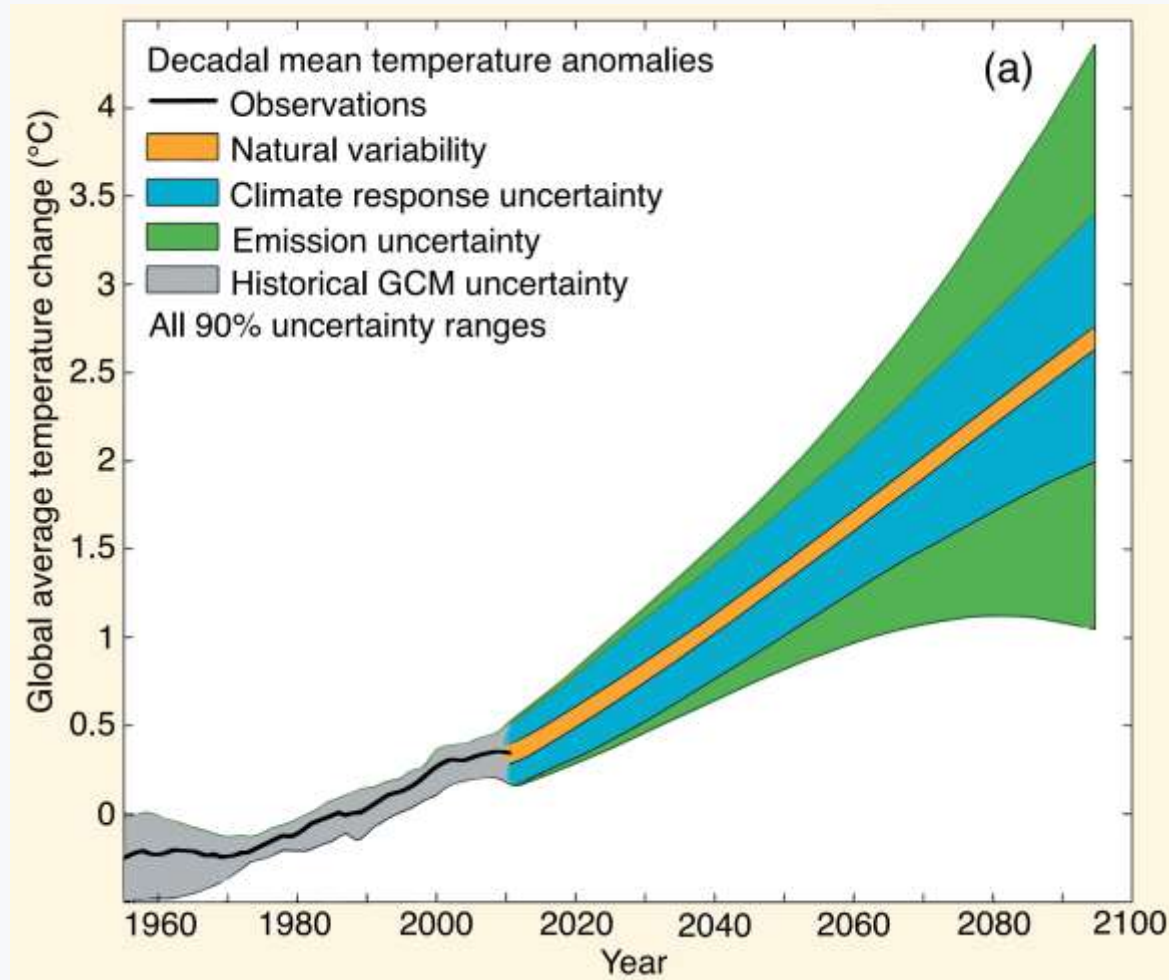
## Anteile der Gesamtunsicherheit über die Projektionszeit



nach Hawkins und Sutton (2009)

# Klimamodellunsicherheiten

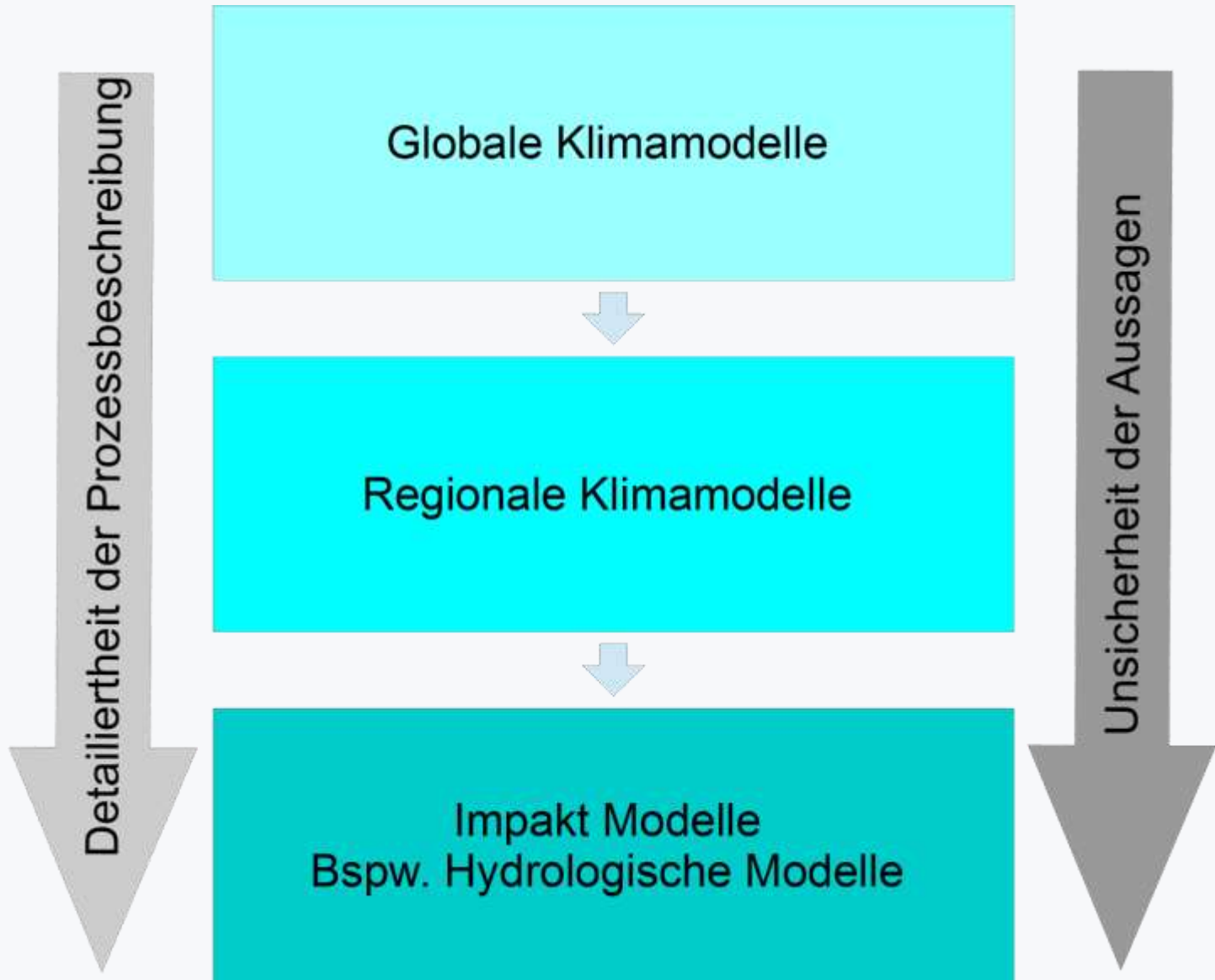
## Anteile der Gesamtunsicherheit über die Projektionszeit



IPPC (2013)

# Klimamodellunsicherheiten

Unsicherheiten  
sind  
Skalenabhängig



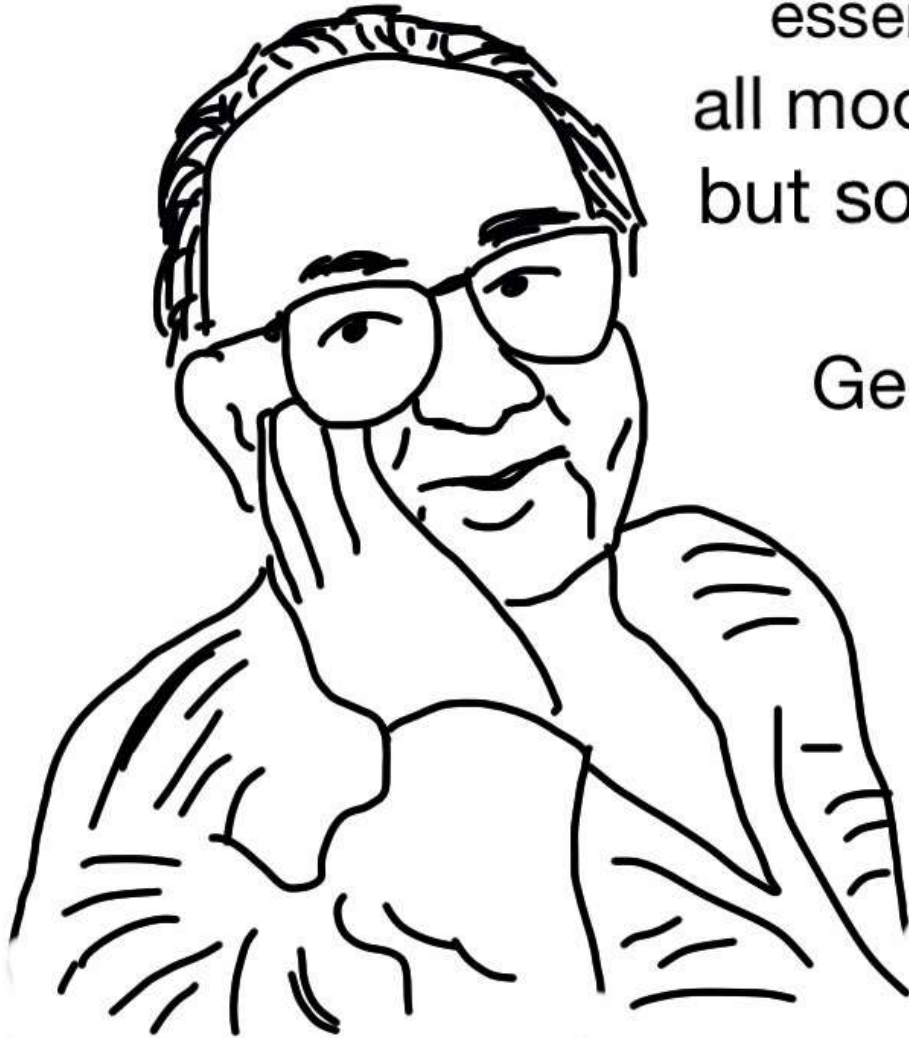


# Klimamodellunsicherheiten

## Andere Klimaelemente:

- Die beschriebenen Modelunsicherheiten beziehen sich auf die Temperatur.
- Die Temperatur lässt sich vergleichsweise Robust messen und beschreiben.
- Andere Klimaelemente, wie insbesondere Niederschlag unterliegen deutlich komplexeren Prozessen und weisen daher deutlich größere Unsicherheiten auf.

Danke!



essentially,  
all models are wrong,  
but some are useful

George E. P. Box