

Über den Wolken, in der Cloud

Warum Klimaforschung Daten braucht

GeoSphere Austria

Bereichsdirektorin Meteorologie & Regionalstellen

Elke Ludewig

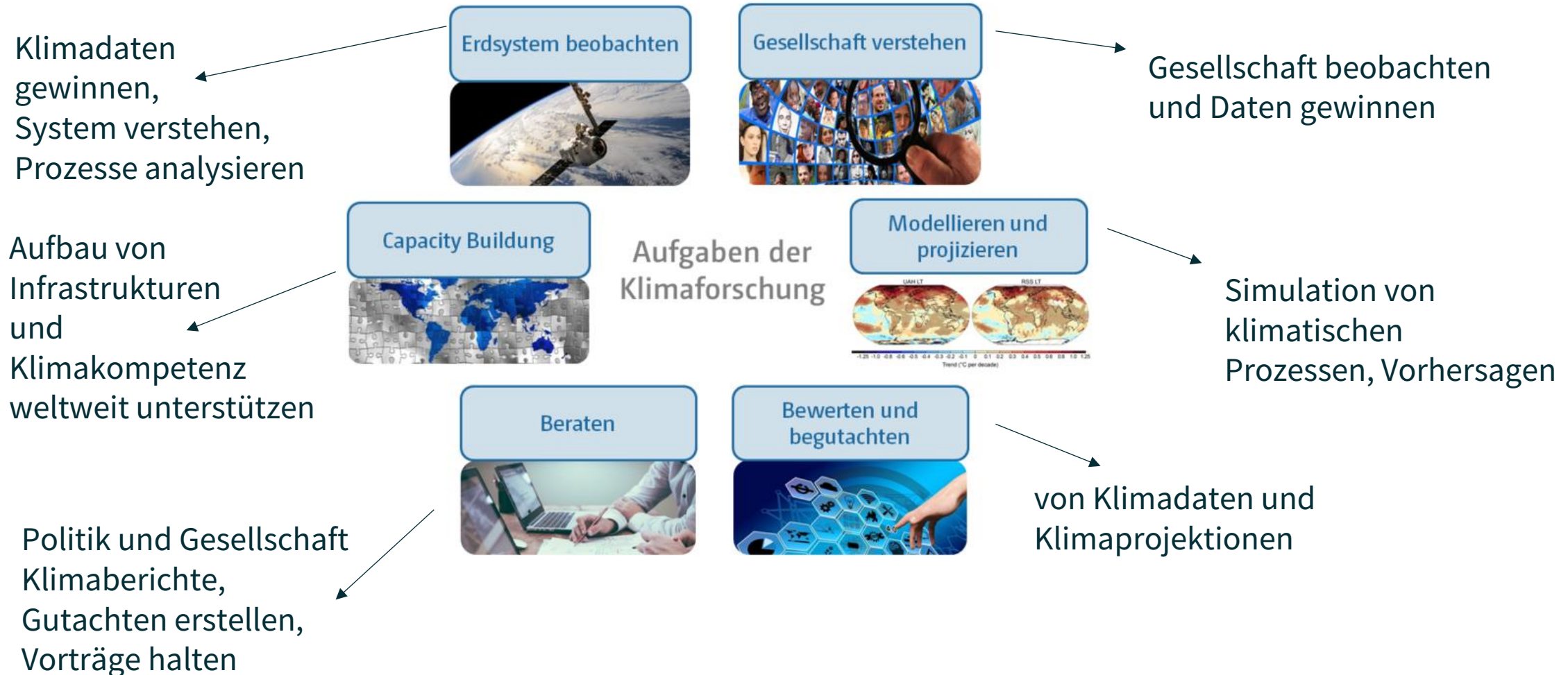
elke.ludewig@geosphere.at



24.09.2026

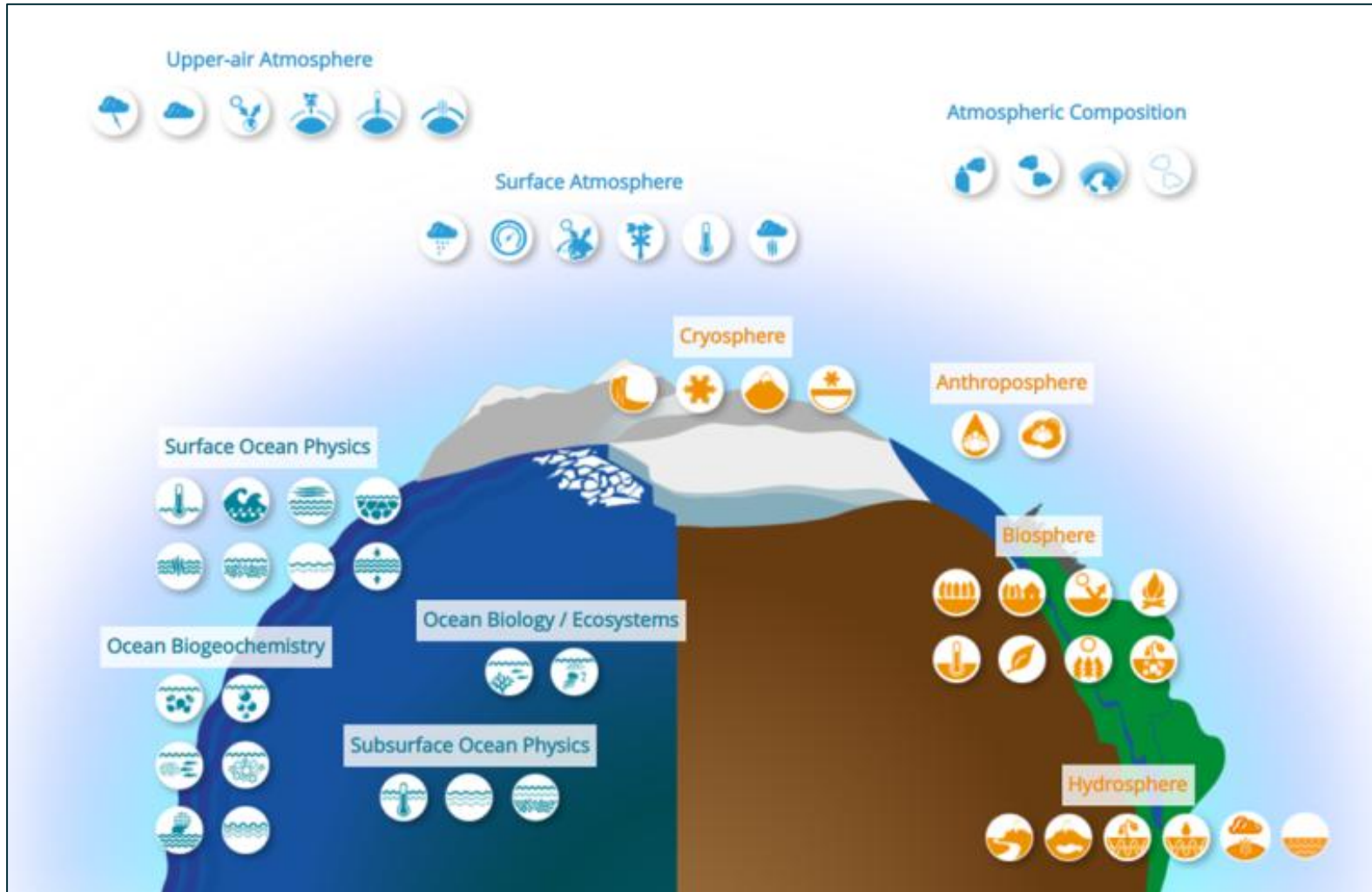


Aufgaben Klimaforschung





Was beobachten wir eigentlich? Essentielle Klimavariabeln



<https://gcoss.wmo.int/site/global-climate-observing-system-gcos/essential-climate-variables/about-essential-climate-variables>

Atmosphäre

- Temperatur
- Luftdruck
- Feuchte
- Wind
- Wolken
- Strahlung

Land

- Boden
- Vegetation
- Wasser
- Schneebedeckung

Ozean

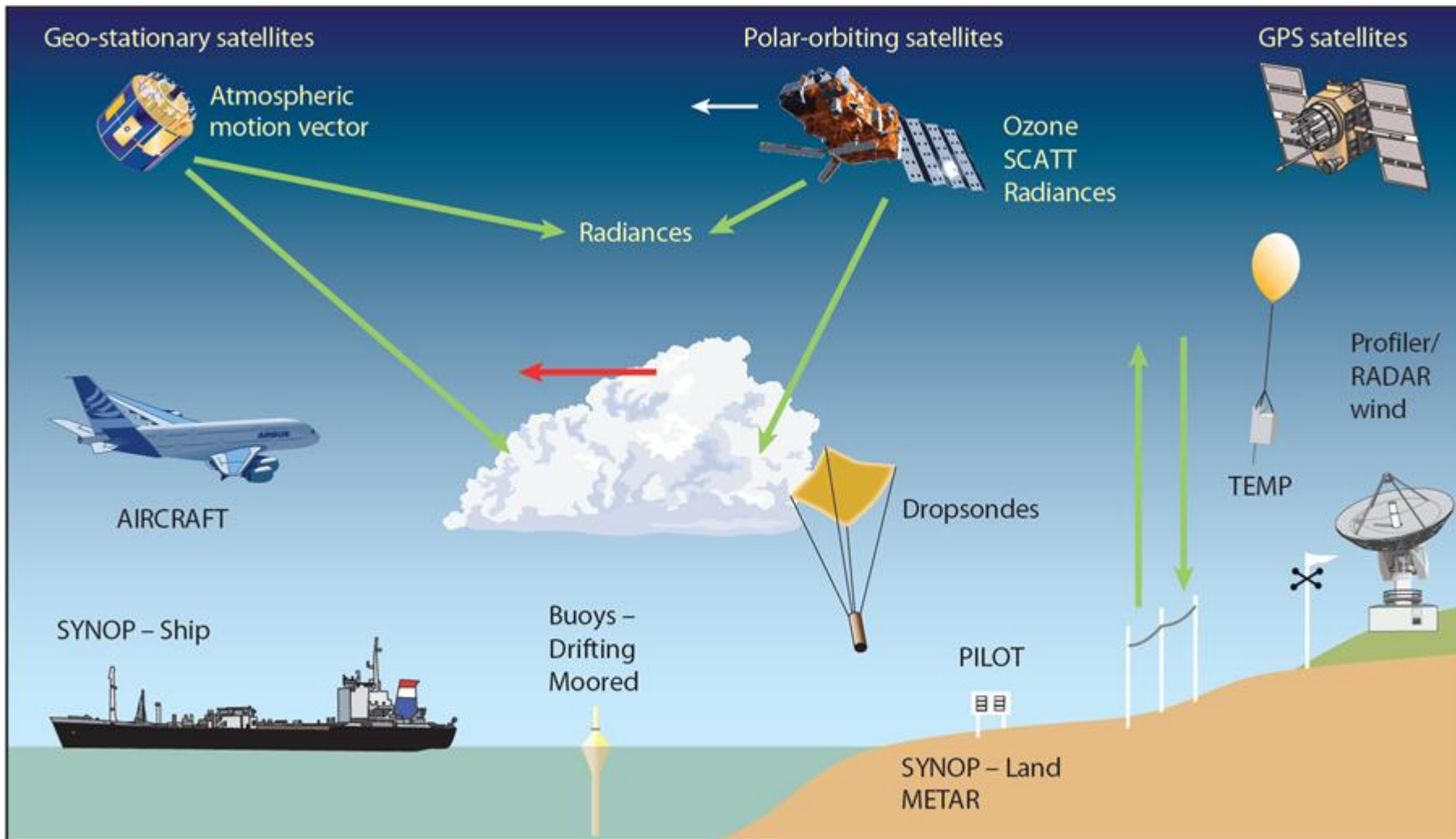
- Temperatur
- Strömungen
- Meeresspiegel
- chemische Eigenschaften

Eis und Schnee

- Gletscher
- Schneedecke
- Meereis

Das Klima ist kein einzelner Messwert, sondern das Ergebnis eines komplexen Systems, das wir kontinuierlich beobachten.

Wie beobachten wir die Erde? – Ein Messnetz für einen ganzen Planeten



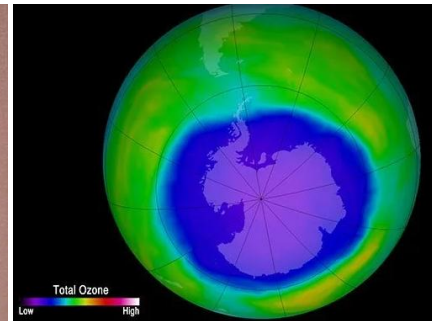
- Bodenstationen
- Radiosonden / Ballons
- Radar und Fernerkundung
- Satelliten
- Schiffe und Bojen
- Forschungsstationen
- Forschungsinstrumente

Keine einzelne Messmethode kann das gesamte Erdsystem erfassen.

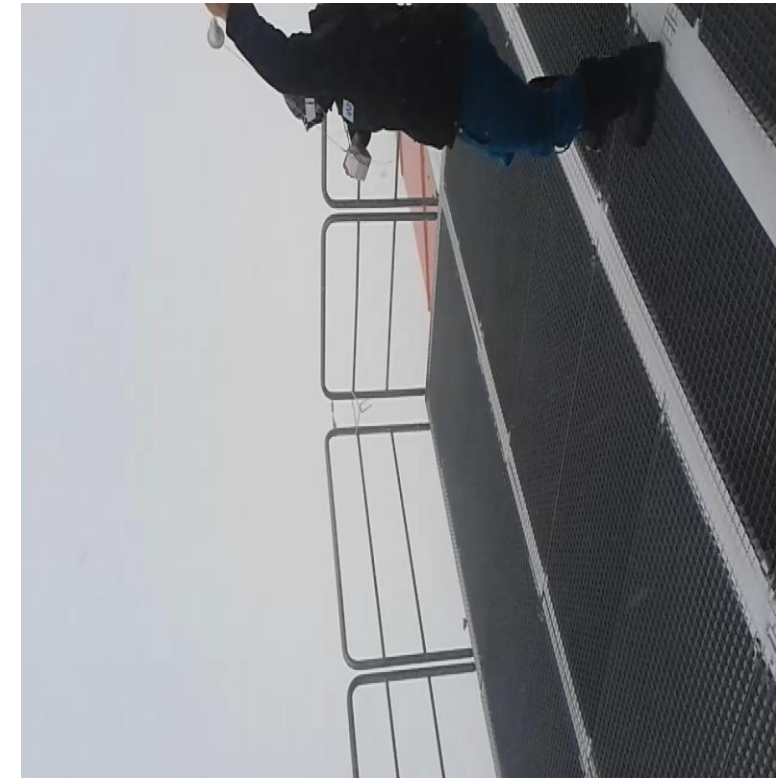
Wie beobachten wir die Erde? – Ein Messnetz für einen ganzen Planeten

Tägliche Wetterballons (Radiosonden) / Ozonsonden

Beispiel: Start Radiosonde und Ozonsonde, Neumayer Station III, Antarktis



Ozonsonde



Radiosonde

Wie beobachten wir die Erde? – Ein Messnetz für einen ganzen Planeten

Forschungsstationen

Beispiel: Klima- und Umweltforschungsstation Sonnblick Observatorium, 3.106m, Alpen, Österreich



@SV, Stich von Heilmann



1886

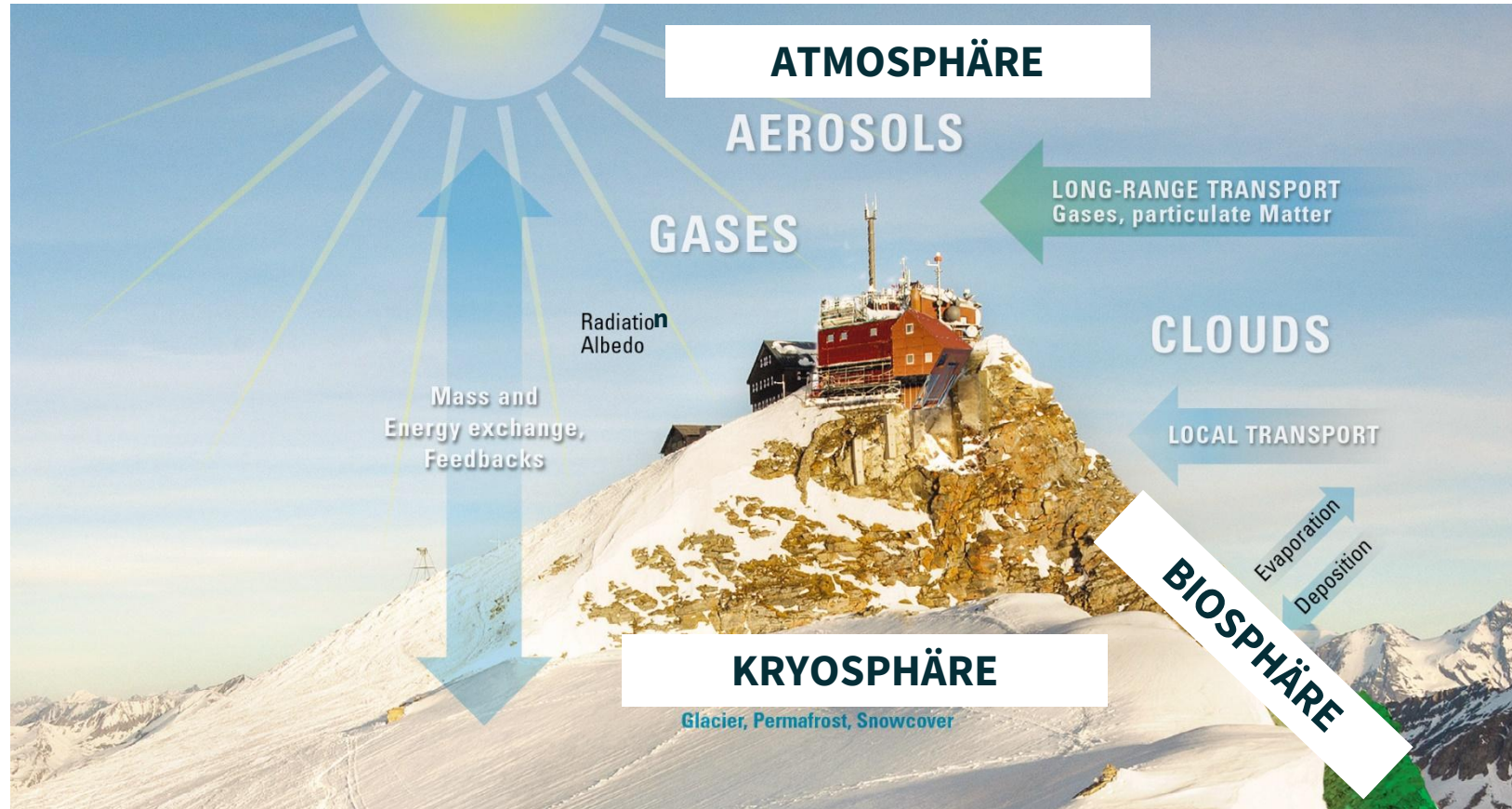
140 Jahre

2026 +

... von der Wetterwarte zur Hightech-Forschungsstation ...

Klima-Monitoring

Wie beobachten wir die Erde? – Forschungsstation – Sonnblick Observatorium



- **Atmosphäre**
- **Biosphäre**
- **Kryosphäre**
- Ferntransport
- Partikel in der Luft
 - Feinstaub
 - Bioaerosole
 - Plastik
- Gase
- Wolken
- Wechselwirkungen zwischen den Systemen

→ Besseres Verständnis über unser Klima, unsere Umwelt, unser Ökosystem

ENVISION 2021:
<https://www.sonnblick.net/de/daten/download-portal/reports/>

Messbeispiel „WOLKE“

Sonnblick Observatorium >> über den Wolken, in der Cloud



Europäisches Center für
Wolkenvergleichsmessungen
und Standardisierung - ECCINT

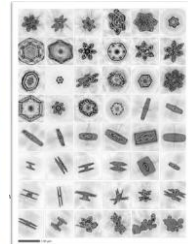
Was für uns wie eine einfache Wolke aussieht, ist wissenschaftlich ein komplexes System.



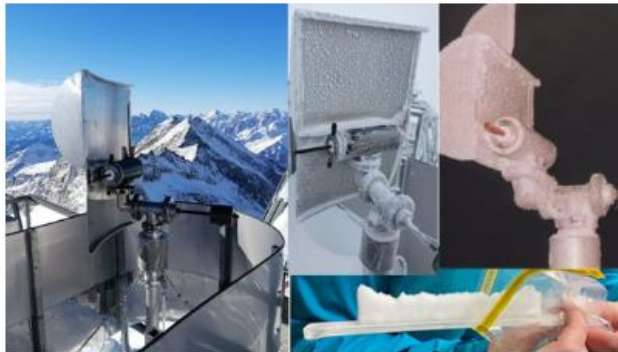
Messbeispiel „WOLKE“



Eisnukleation
Eiskeimbildung



Julia Burkart



Wolkenwasser und
seine chemische
Zusammensetzung



Wolkenflüssigwassergehalt
und
Wolkentröpfchenspektrum

SBO = Messstation für spezifische Wolkeneigenschaften



Eine Wolke ist ein Messproblem

Was müssen wir wissen,
um eine Wolke zu beschreiben?

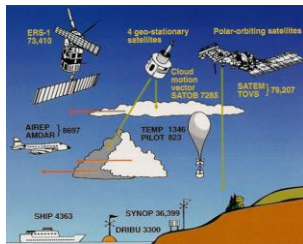
- Temperatur
- Feuchtigkeit
- Wind
- Höhe
- Form
- Flüssigwasser
- Eis
- Aerosole
- Strahlung

„Aber eine Beobachtung ist noch keine
Klimainformation.
Aus einem Messwert muss zunächst eine verlässliche
Information werden.“

Ein Messwert ist noch keine Klimainformation

WETTER

- alles was in der Luft um uns herum passiert
- **Kurzfristig**
Stunden-Tage



Simulation mit gemessenen Anfangswerten, genaue physikalische Berechnung, feste Randwerte

Wettervorhersage
(gilt für 3 Tage)

Witterung

- Wetter in einem bestimmten Zeitraum
- **Mehrere Tage, Wochen**

KLIMA

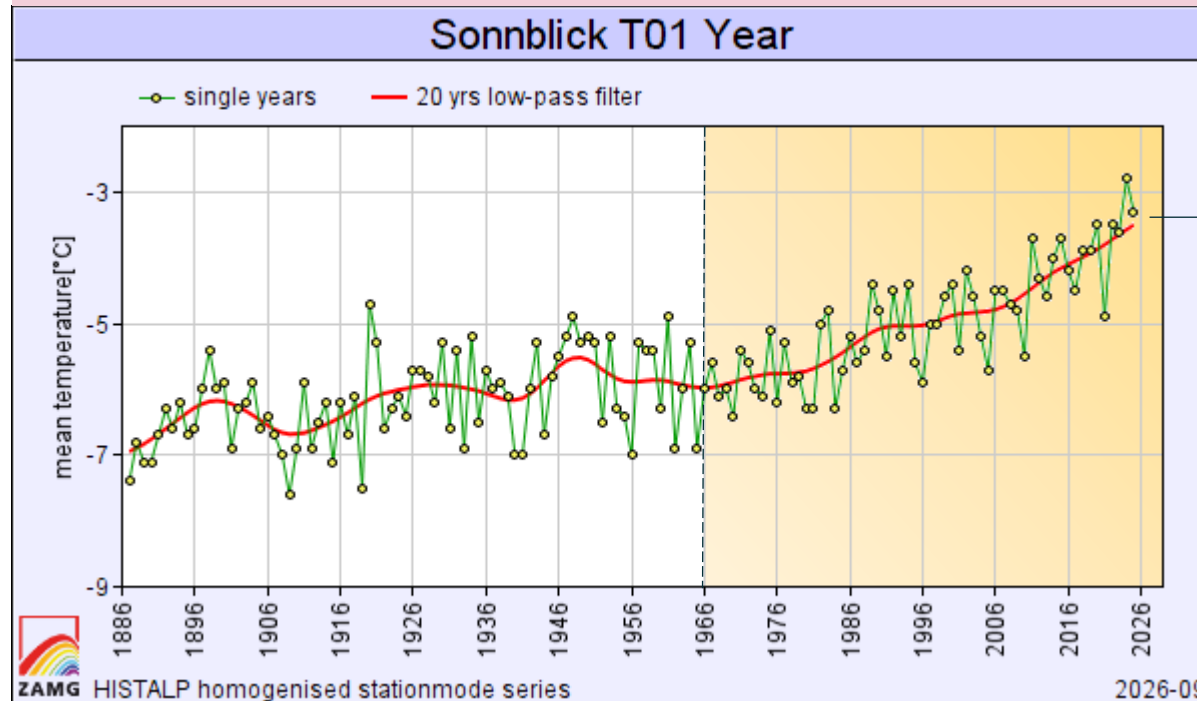
- (statistische) Zustandsbeschreibung des Klimasystems
- **mind. 10-30 Jahre**

Klimavorhersage
(gilt für Jahrzehnte+)

Von Daten zu Klimainformationen

- 1886 Klimaaufzeichnungen

Temperatur: SBO Jahresmittelwerte 1886-2024 SBO



Klimatologische Zeitreihe Sonnblick Observatorium

von -7.0°C auf $-2,8^{\circ}\text{C}$ seit den 1960er
Trend zunehmend



Wetterhütte
am alten Turm
Messung seit 1886,
139 Jahre

seit 1980 mittlere Temperatur im Sommer > 0
Niederschlag = Regen

2. Vom Messwert zur Klimainformation

1950

Gründung der Weltmeteorologischen Organisation

viele Messungen

- lange Zeiträume
- verschiedene Orte
- standardisierte Messmethoden



WORLD
METEOROLOGICAL
ORGANIZATION

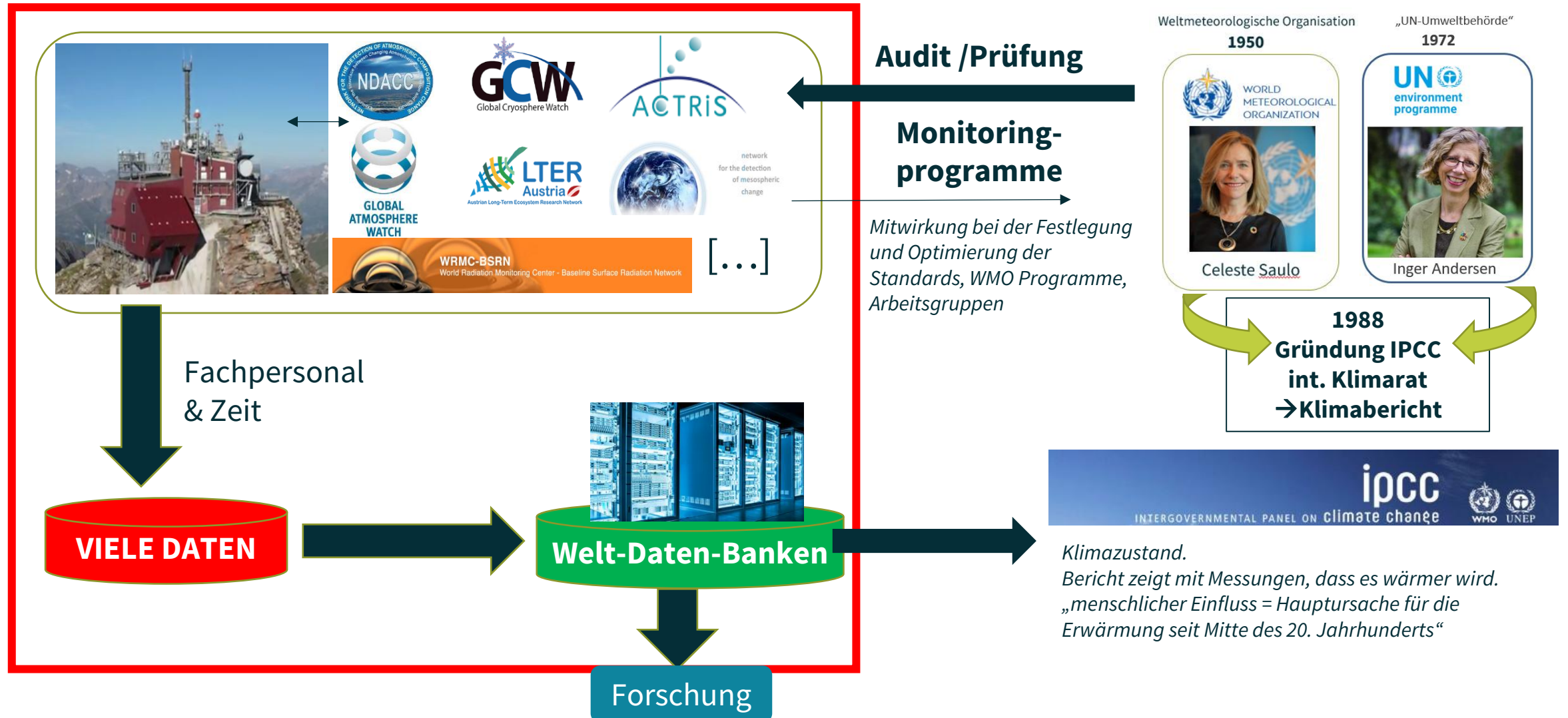


Celeste Saulo

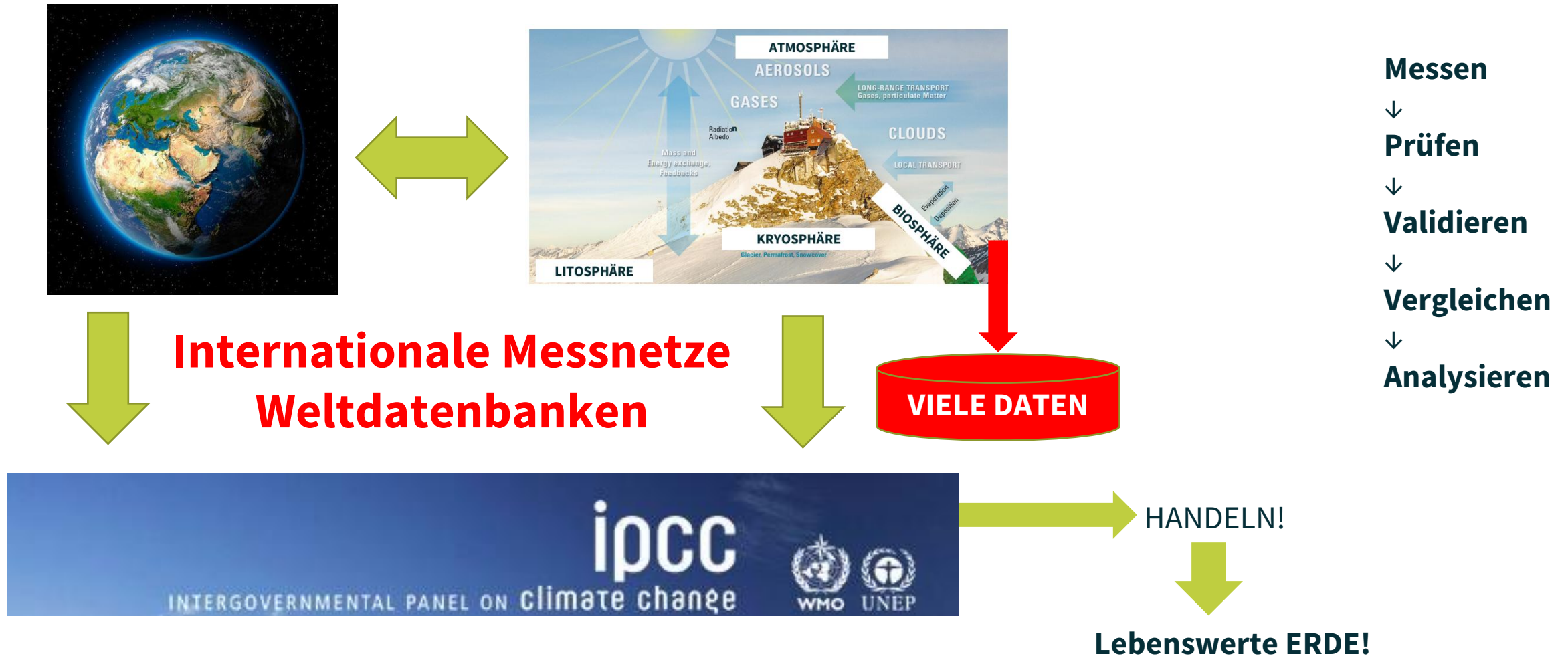


2025: 30 globale GAW Stationen
(inkl. Sonnblick Observatorium)

Datenqualität ist Teil der Wissenschaft



Viele Datenquellen ergeben ein besseres Bild



Viele Datenquellen ergeben ein besseres Bild



Sie haben:

- unterschiedliche räumliche Auflösungen
- unterschiedliche zeitliche Auflösungen
- unterschiedliche Messmethoden
- unterschiedliche Unsicherheiten

Die wissenschaftliche Herausforderung besteht darin, diese Informationen **sinnvoll zusammenzuführen**.

Quelle: E.Ludewig, KI generiert.

Auch Klimadaten haben Unsicherheiten

Wie sicher ist eine Klimainformation?

Nicht jede Information ist gleich genau.

Unsicherheiten können beispielsweise entstehen durch:

- Messungen
- Datenlücken
- unterschiedliche Messmethoden
- räumliche Abdeckung
- natürliche Schwankungen

**Unsicherheit ist kein Zeichen schlechter Wissenschaft.
Unsicherheit zeigt, wie genau wir etwas wissen.**

Veränderung des effektiven Strahlungsantriebs (ERF) von 1750 bis 2019 nach den jeweiligen Einflussfaktoren

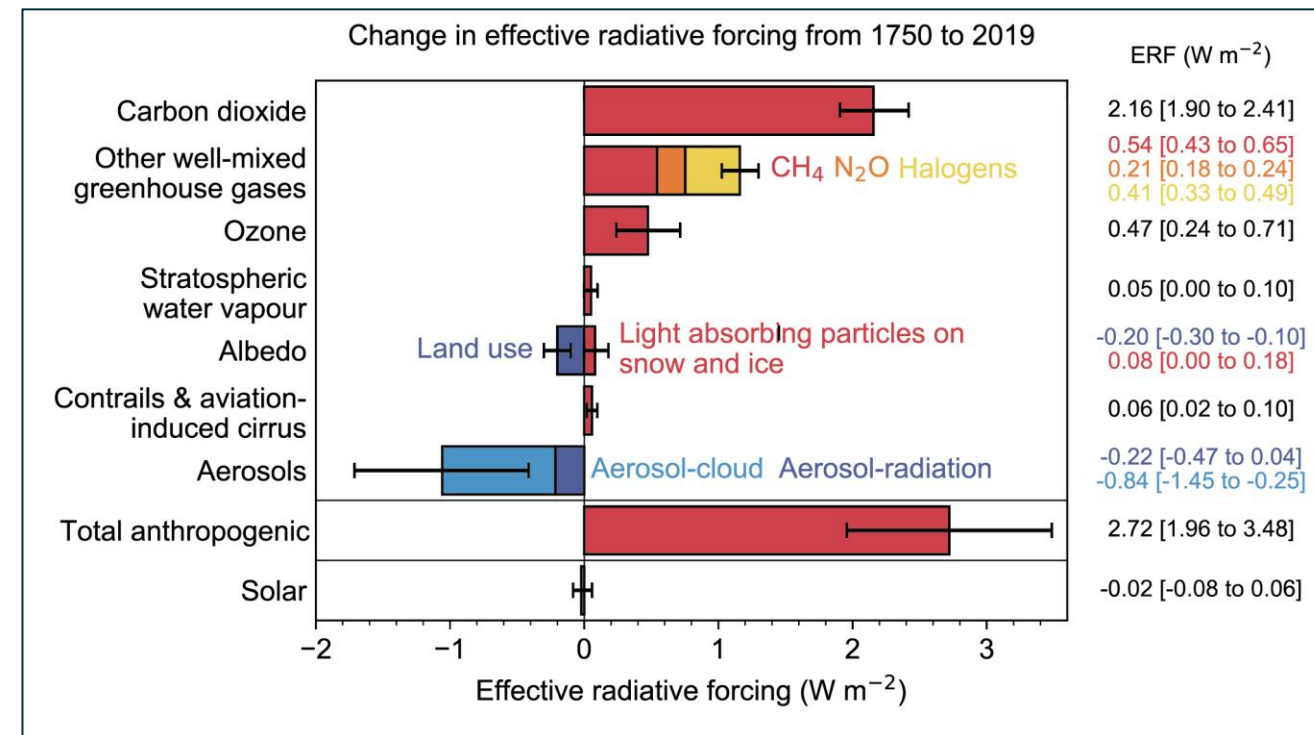


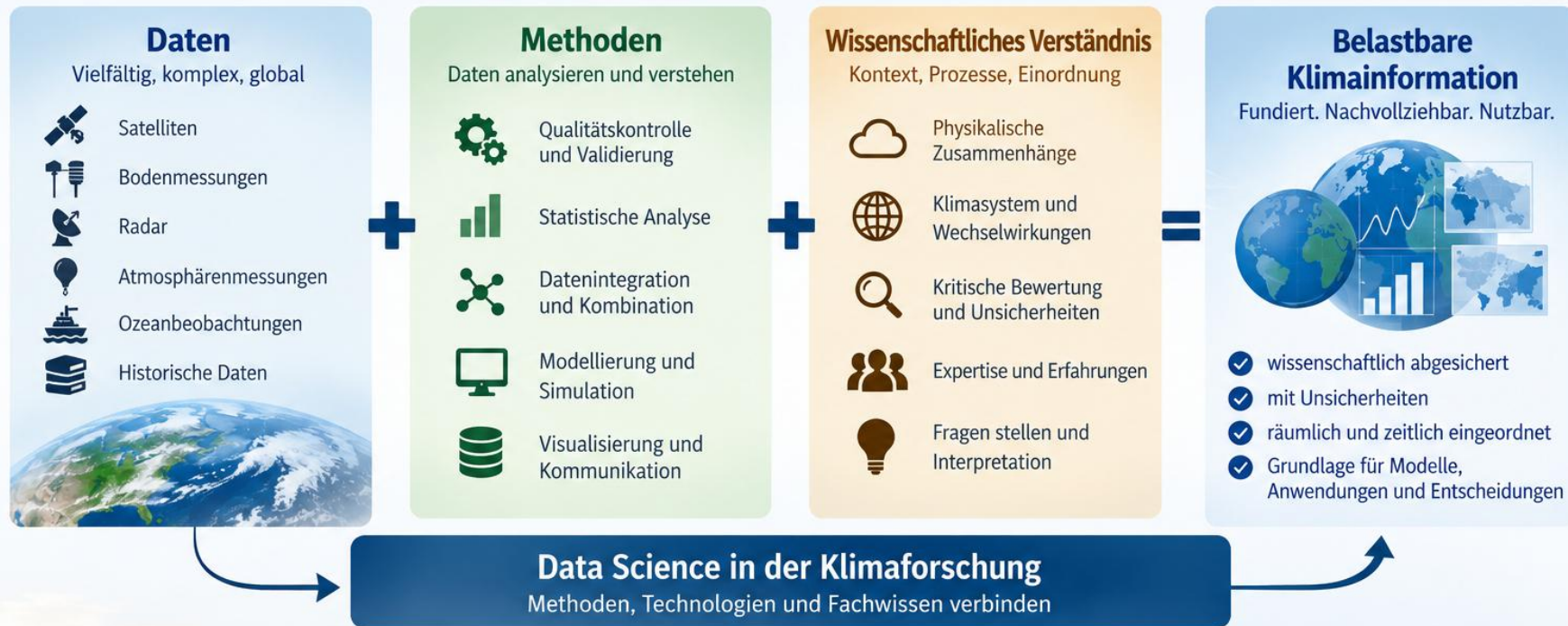
Figure 7.6 in IPCC, 2021: Chapter 7. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Forster, P., T. Storelvmo, K. Armour, W. Collins, J.-L. Dufresne, D. Frame, D.J. Lunt, T. Mauritsen, M.D. Palmer, M. Watanabe, M. Wild, and H. Zhang, 2021: *The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 923–1054, doi: [10.1017/9781009157896.009](https://doi.org/10.1017/9781009157896.009).]

2. Vom Messwert zur Klimainformation

Die Wissenschaft beginnt mit der Einordnung

Aus Daten wird verlässliche Klimainformation durch das Zusammenspiel von Daten, Methoden und wissenschaftlichem Verständnis.

Zu einfach gedacht:



Nicht die Menge der Daten entscheidet, sondern **wie wir sie verstehen.**

*Daten in
Wissen für eine
lebenswerte Zukunft*

Daten
+
Methoden
+
wissenschaftliches
Verständnis



Data Science

E.Ludewig, KI generiert

„Aber selbst wenn wir sehr gute Klimadaten haben, bleibt eine Frage:

Wie verstehen wir die Prozesse, die hinter diesen Veränderungen stehen – und wie können wir abschätzen, was in Zukunft passieren könnte? Dafür brauchen wir Modelle.“

3. Klimamodelle und Simulation

Von Beobachtungen zum Verstehen – von Simulationen zu möglichen Zukunftsszenarien.

Messdaten

Was Beobachten wir?



Die reale Welt

Daten

Beschreiben
den aktuellen
Zustand des
Klimasystems.

Klimamodelle

Wie funktioniert das
Klimasystem?



Atmosphäre
(Physik, Chemie)

Landoberfläche
(Prozesse)

Ozean
(Strömungen)

Eis und Schnee
(Wechselwirkungen)

Mathematisch-physikalische Modelle
beschreiben die Prozesse des Klimasystems
in vereinfachter Form.

Simulationen

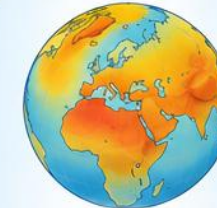
Berechnen,
wie sich das
Klimasystem
unter bestimmten
Bedingungen
entwickeln kann.

Mögliche Entwicklungen

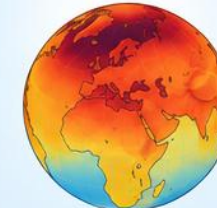
Was könnte in Zukunft passieren?



Geringe
Emissionen
+1,5 °C



Mittlere
Emissionen
+2,5 °C



Hohe
Emissionen
+4,0 °C



Modelle ersetzen Beobachtungen nicht – sie ergänzen sie.

Sie helfen uns, das Klimasystem zu verstehen und mögliche zukünftige Entwicklungen abzuschätzen.

*Heute verstehen.
Morgen gestalten.*

Ein **Modell** ist dabei
keine
Vorhersagemaschine,
sondern eine
**vereinfachte
mathematisch-
physikalische
Beschreibung des
Klimasystems.**

E.Ludewig, KI generiert

Ein Modell für jede Frage – unterschiedliche Skalen, unterschiedliche Komplexität

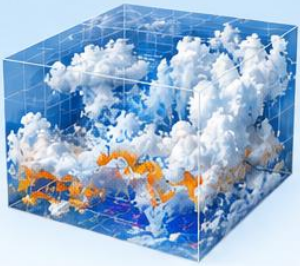
Vom turbulenten Wirbel bis zum globalen Klima: Modelle betrachten das Klimasystem auf verschiedenen Raum- und Zeitskalen.

Kleinere Skalen – mehr Details

Größere Skalen – längere Zeiträume

Large Eddy Simulation (LES)

Turbulenz und Wolkenprozesse



Hochaufgelöste Simulation von Turbulenz, Wolken und Austauschprozessen in der Atmosphäre.

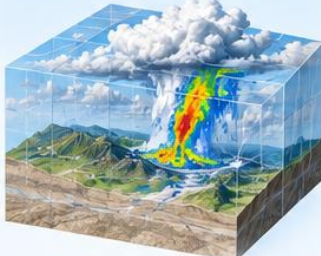
Räumliche Auflösung
~ 1 – 100 m

Zeitskala
Sekunden – Stunden

Beispiele
Wolkenbildung, Turbulenz, Grenzschichtprozesse

Konvektionsauflösende Wettermodelle

Wetter und extreme Ereignisse



Simulieren Wetterprozesse wie Gewitter, Starkniederschlag und konvektive Systeme.

Räumliche Auflösung
~ 1 – 3 km

Zeitskala
Stunden – Tage

Beispiele
Starkregen, Gewitter, Hochwasserwarnungen

Regionale Klimamodelle (RCM)

Klima in einer Region



Höhere Auflösung für Regionen, z. B. Europa oder die Alpen. Nutzen Randbedingungen aus globalen Modellen.

Räumliche Auflösung
~ 10 – 50 km

Zeitskala
Jahre – Jahrzehnte

Beispiele
Regionale Klimaprojektionen, Alpenraum, Niederschlagsänderungen

Globales Wettermodell (NWP)

Wettervorhersage weltweit



Simuliert die Atmosphäre weltweit für Wettervorhersagen.

Räumliche Auflösung
~ 5 – 25 km

Zeitskala
Tage – 2 Wochen

Beispiele
Wettervorhersage, Stürme, Großwetterlagen

Globales Klimamodell (ESM)

Langfristige Klimaveränderungen



Simuliert das gesamte Klimasystem (Atmosphäre, Ozean, Land, Eis, Biosphäre) über lange Zeiträume.

Räumliche Auflösung
~ 50 – 250 km

Zeitskala
Jahrzehnte – Jahrhunderte

Beispiele
Klimaprojektionen, Temperaturänderungen, Meeresspiegelanstieg

Komplexität der Prozesse

Mehr physikalische Detailprozesse, höhere Auflösung, aufwendigere Berechnung

Rechenaufwand

Höherer Datenbedarf und längere Rechenzeiten

Größere Skalen und längere Zeiträume

Mehr Komponenten des Erdsystems (Atmosphäre, Ozean, Land, Eis, Biosphäre)



Modelle sind Werkzeuge, um das Klimasystem zu verstehen – von einzelnen Prozessen bis zu langfristigen Entwicklungen.

Je nach Fragestellung werden Modelle mit unterschiedlicher Komplexität, Auflösung und Zeitskala eingesetzt.

*Verschiedene Modelle –
ein gemeinsames Ziel:
eine lebenswerte Zukunft.*

Je **komplexer** die Modelle und je **höher die räumliche und zeitliche Auflösung**, desto mehr **Rechenleistung** benötigen wir.

E.Ludewig, KI generiert

Je höher die räumliche Auflösung, je länger die Simulationszeiträume und je komplexer die Modelle, desto größer werden Datenmengen und Rechenbedarf.

Warum brauchen wir so viel Rechenleistung?

Klimamodell

- Millionen Gitterpunkte
- viele Variablen
- viele Zeitschritte
- komplexe Wechselwirkungen
- große Datenmengen

Klimaforschung ist heute auch eine Computing-Wissenschaft.



E.Ludewig, KI generiert

Der Supercomputer: Viele Rechner. Eine gemeinsame Aufgabe. Große Antworten.

1 Ein komplexes Problem

Wir wollen das Klimasystem simulieren – mit Atmosphäre, Ozean, Land, Eis und vielen Wechselwirkungen.



- Atmosphäre
- Ozean
- Landoberfläche
- Eis und Schnee
- Biosphäre

2 Das Problem wird zerlegt

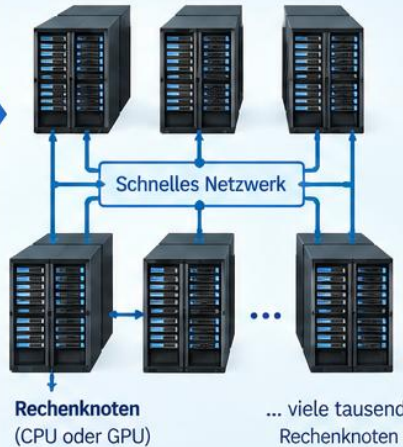
Das Klimamodell wird in viele kleine Teilaufgaben aufgeteilt (z. B. für einzelne Gitterpunkte und Zeitschritte).



Gitterzelle im Modell
Temperatur
Luftdruck
Wind
Feuchtigkeit
Strahlung
...

3 Viele Recheneinheiten arbeiten parallel

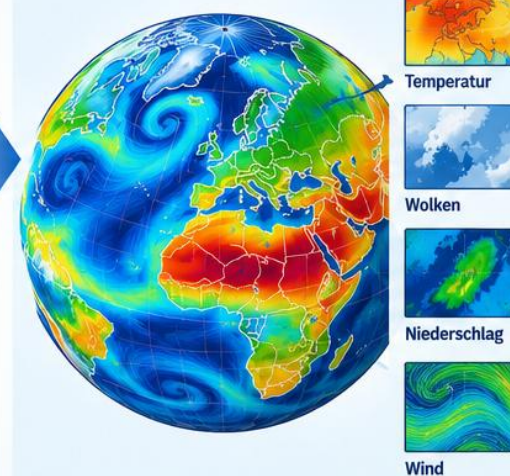
Tausende Prozessoren oder GPU-Einheiten berechnen gleichzeitig die Teilaufgaben und tauschen ständig Daten aus.



Rechenknoten (CPU oder GPU) ... viele tausend Rechenknoten

4 Das Ergebnis

Das Zusammenspiel der vielen Rechnungen ergibt eine Simulation des Klimasystems – heute und in möglichen Zukünften.



Temperatur
Wolken
Niederschlag
Wind

Ein Supercomputer ist kein einzelner, besonders schneller Computer, sondern ein System aus vielen tausend Recheneinheiten, die gleichzeitig zusammenarbeiten.

Der Supercomputer ist eine konkrete Hochleistungs-Recheninfrastruktur.

WAS EINEN SUPERCOMPUTER AUSMACHT



Parallelisierung
Viele Recheneinheiten lösen Teilaufgaben gleichzeitig.



Großer Speicher
Für Modelle, Daten und Zwischenergebnisse.



Schnelles Netzwerk
Ständiger Datenaustausch zwischen den Recheneinheiten.



Hohe Energieeffizienz
Maximale Rechenleistung bei möglichst geringem Energieverbrauch.

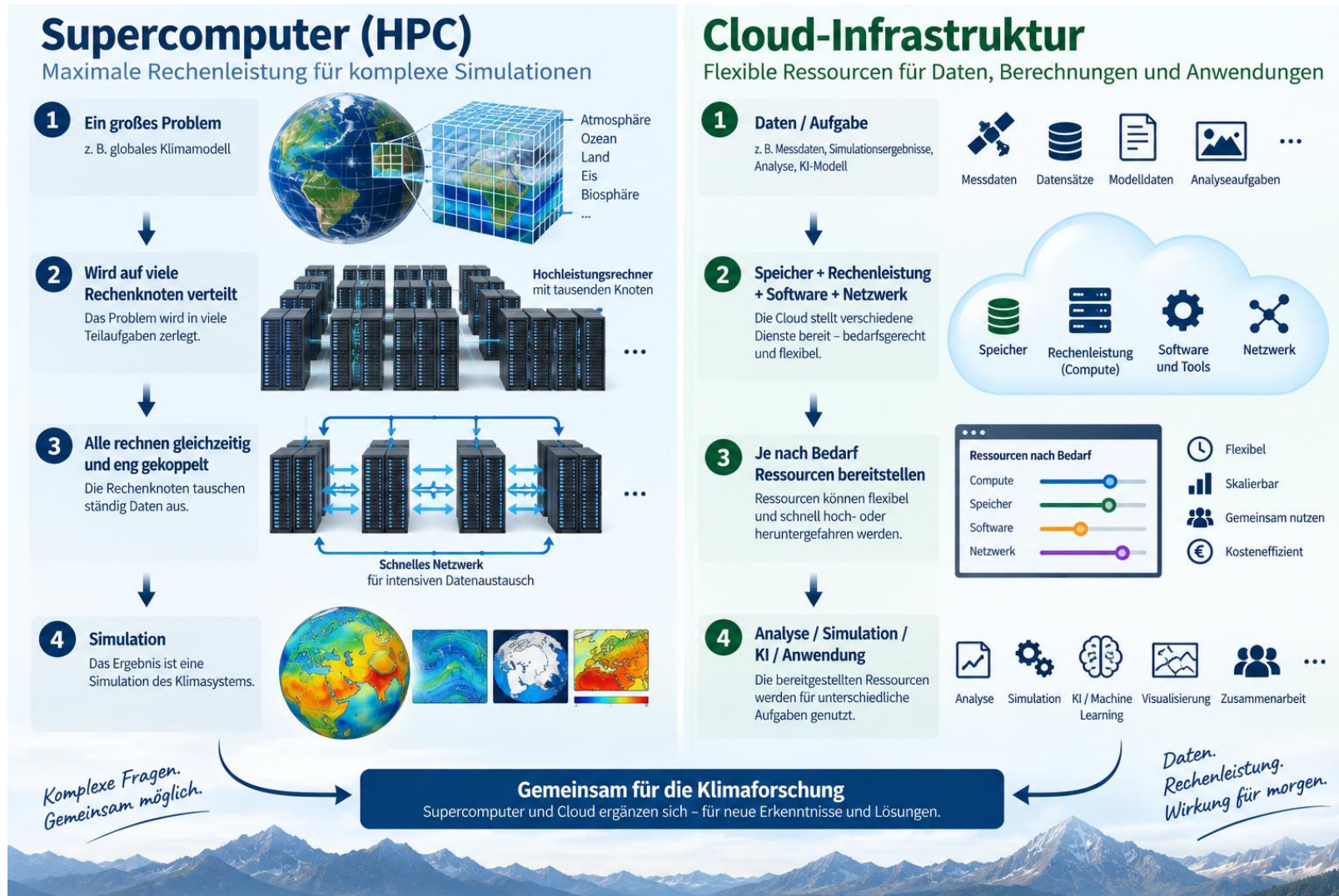
Supercomputer ermöglichen es, das komplexe Klimasystem zu verstehen und mögliche zukünftige Entwicklungen zu erforschen.

RECHENLEISTUNG FÜR EINE LEBENSWERTE ZUKUNFT

E.Ludewig, KI generiert

Vom Supercomputer zur Cloud

HPC ist besonders stark bei eng gekoppelten, rechenintensiven Simulationen.



Vor und nach der Simulation fallen aber noch viele andere Aufgaben an!

Cloud-Infrastrukturen können zusätzliche Möglichkeiten bieten!

- große Datenmengen speichern
- Rechenressourcen flexibel nutzen
- Daten und Modelle gemeinsam verfügbar machen
- Zusammenarbeit über Institutionen und Standorte

Vom Supercomputer zur Cloud

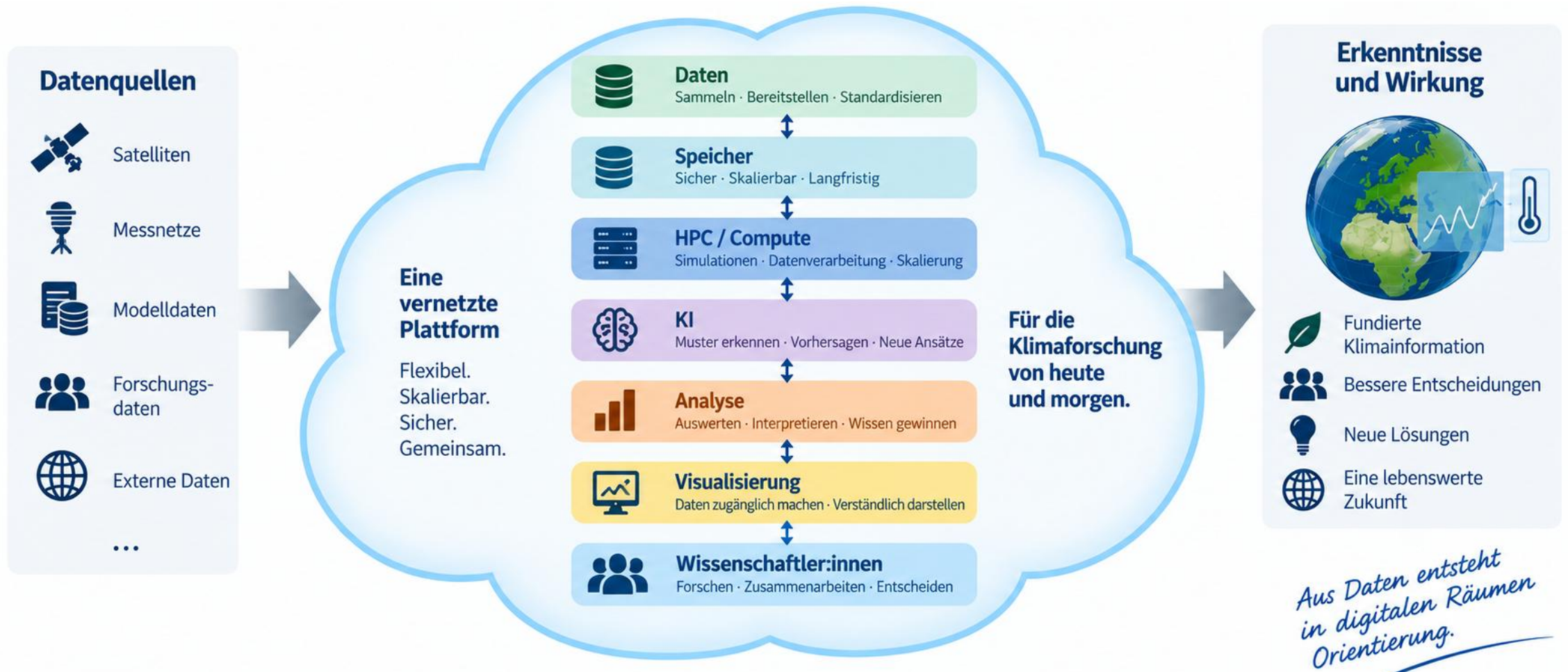
Supercomputer und Cloud sind keine Gegensätze

Supercoputer	Cloud
„Wie schnell können wir ein komplexes Problem berechnen?“	„Wie flexibel können wir Rechenleistung, Speicher und Daten für unterschiedliche Aufgaben bereitstellen?“
HPC → Simulation	Cloud → Daten + Analyse + Zusammenarbeit + Anwendungen

Moderne Klimaforschung braucht beides.

Cloud als digitale Forschungsumgebung

Die Cloud macht nicht nur Rechenleistung verfügbar.
Sie schafft eine **digitale Forschungsumgebung**:



Die eigentliche Herausforderung

Steigerung der Anforderungen >> schneller mehr detaillierte Informationen

Je einfacher wir Rechenleistung bereitstellen können, desto wichtiger wird die Frage: Welche Berechnungen sind wirklich sinnvoll – und wie können wir sie möglichst effizient durchführen?

„Wie können wir wissenschaftlich sinnvoll rechnen?“

Denn mit zunehmender Modellauflösung steigen:

Datenmenge ↑

Rechenzeit ↑

Speicherbedarf ↑

Energiebedarf ↑

KI erweitert unsere Möglichkeiten, große und komplexe Datenmengen auszuwerten – gleichzeitig steigt mit datenintensiver Forschung der Bedarf an Rechenleistung und damit die Bedeutung von nachhaltigem Computing.

Künstliche Intelligenz in der Klimaforschung

Klimaforschung erzeugt sehr große und komplexe Datenmengen:
Satelliten → Messnetze → Modelle → Simulationen

KI kann dabei unterstützen:

- Muster in großen Datenmengen zu erkennen
- komplexe Datensätze auszuwerten
- Bilder und räumliche Strukturen zu analysieren
- Zusammenhänge schneller sichtbar zu machen
- bestimmte Berechnungen effizienter durchzuführen

Bessere Darstellung von Details:

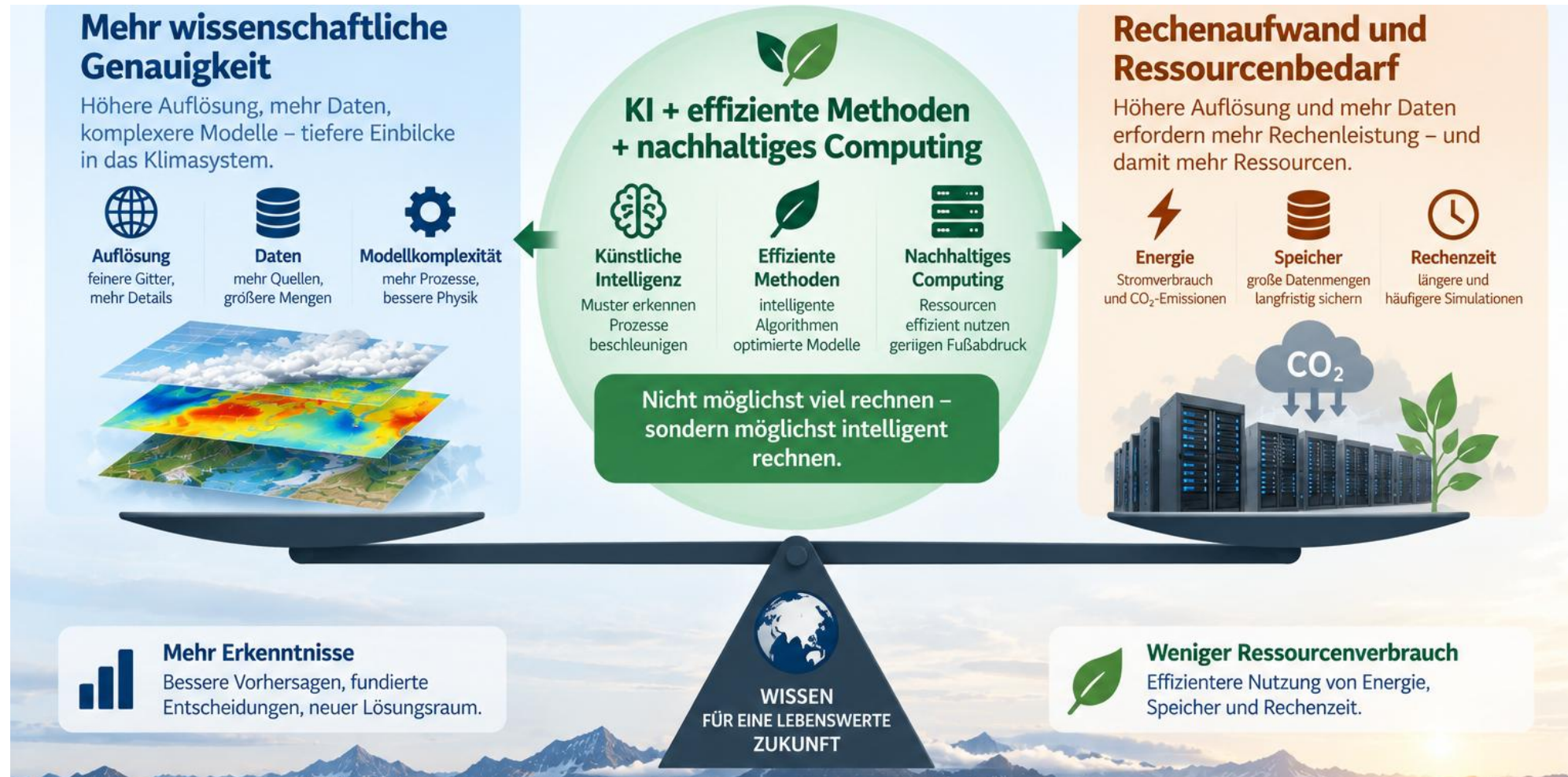
Komplexe Kleinprozesse wie die Wolkenbildung, die Supercomputer überfordern würden, lassen sich durch maschinelles Lernen annähern

Aber KI braucht Rechenleistung

Wie können wir mehr berechnen, ohne unnötig mehr Ressourcen zu verbrauchen?

Nachhaltiges Computing

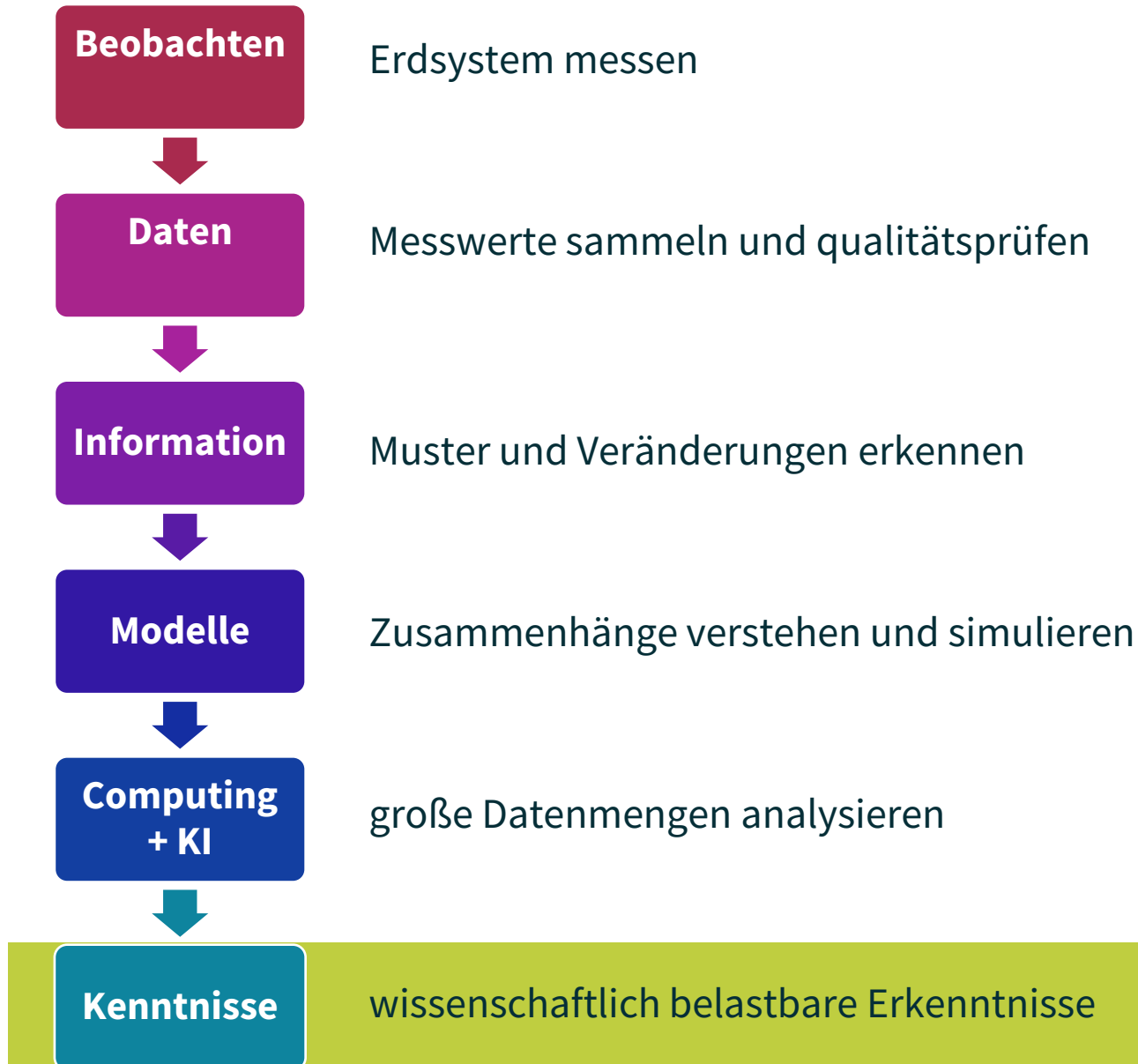
Die benötigte wissenschaftliche Rechenleistung möglichst effizient und ressourcenschonend bereitstellen.
KI und nachhaltiges Computing bringen wissenschaftliche Möglichkeiten und Ressourcenbedarf ins Gleichgewicht.



Heute
rechnen,
morgen
handeln!

„Wir haben jetzt gesehen, wie aus
Beobachtungen Daten werden, wie
Modelle daraus **Simulationen**
erzeugen und wie **Cloud Computing**
und **KI** uns neue Möglichkeiten
eröffnen.

Aber am Ende bleibt die entscheidende
Frage: Was machen wir eigentlich aus
all diesen Daten?“

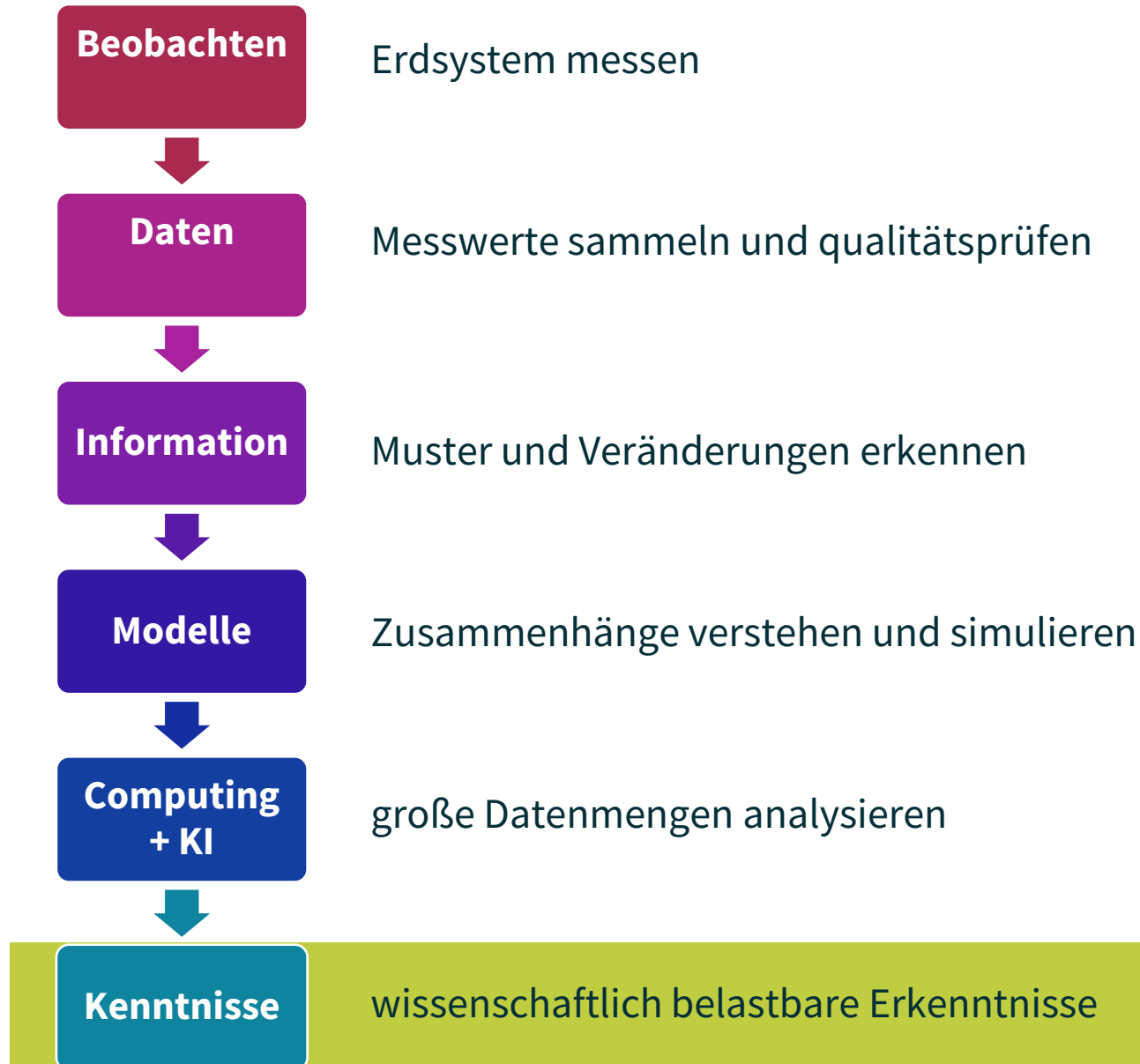


Daten allein reichen nicht!

Nicht die Menge der Daten macht Klimawissen. Entscheidend ist, wie wir Daten wissenschaftlich einordnen.

Wissenschaftliche Einordnung

- **gute Beobachtungen**
- **verlässliche Daten**
- **geeignete Methoden**
- **physikalisches Verständnis**
- **Modelle und Simulationen**
- **Computing und KI**
- **kritische Einordnung von Unsicherheiten**



Daten können uns zeigen:

- Was verändert sich?
- Wo verändert es sich?
- Wie schnell verändert es sich?
- Welche Zusammenhänge gibt es?
- Welche Entwicklungen sind unter bestimmten Bedingungen möglich?

Die wissenschaftliche Aufgabe ist, daraus belastbare Kenntnisse zu gewinnen.

Klimawissen entsteht, wenn wir Beobachtungen, Daten, Modelle und moderne Technologien miteinander verbinden.

Je besser wir Daten verstehen und zusammenführen, desto besser können wir Veränderungen erkennen, Zusammenhänge verstehen und Orientierung für die Zukunft gewinnen.





<https://www.sonnblick.net/de/das-observatorium/360-tour/>

1. Allgemeine Tour

Allgemeine 360° Tour



2. Kids Tour



3. Plan Access Tour

360° Plan Access Tour SBO



GeoSphere Austria, Sonnblick Observatorium

Dr. Elke Ludewig

elke.ludewig@geosphere.at