



# Welchen Einfluss hat die globale Klimaänderung auf Energieträger von Wind- und Solarprojekten?

31. Windenergietage, Potsdam

Wolfgang Winkler, Business Lead Energy Analytics  
Daran Rife, Principal Scientist  
Mirko Del Hoyo, Energy Analyst  
Cegeon Chan, VP Energy Analytics & Measurements

10. November 2023

# Unternehmenspräsentation DNV

# DNV: Eine globale Beratungsfirma

159  
years

~13,000  
employees

~100,000  
customers

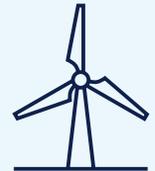
100+  
countries

5%+  
of revenue in R&D

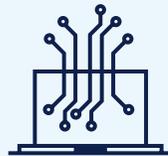
Ship and offshore  
classification and advisory



Energy advisory, certification,  
verification, inspection and  
monitoring



Software, cyber security,  
platforms and  
digital solutions

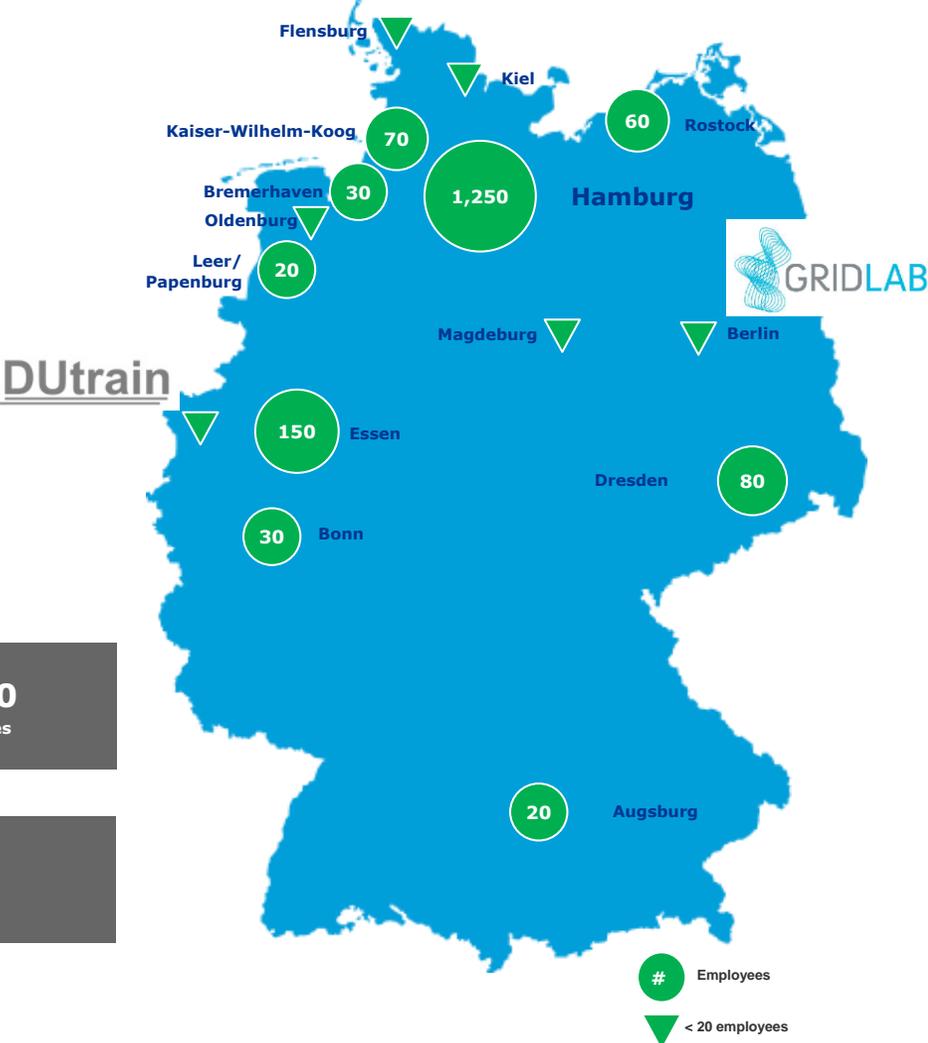


Management system  
certification, supply chain and  
product assurance



# DNV: Eine globale Beratungsfirma

... mit  
lokaler  
Expertise



**1,750**  
employees

**15**  
locations

## Our purpose

To safeguard life,  
property, and the  
environment

## Our vision

A trusted voice  
to tackle global  
transformations

# Die weltweit führende unabhängige Energieexperten und technischer Berater

## 4.400 Experten

Lokaler Zugang zu globalen Best Practices für sichere und effektive Energiesysteme

## 90+ Jahre

im Dienste der Energiewirtschaft, einschließlich der Öl- und Gas-, Wind- und Solarbranche

## 24

Laboratorien und Testzentren, einschließlich Einrichtungen für Tests in großem Maßstab

## 170

Industriestandards, Richtlinien und Handlungsempfehlungen sowie ca. 30 gemeinsame Industrieprojekte pro Jahr

## 65%

von Offshore-Pipelines, die nach DNV-Standards entworfen und installiert wurden

## 42 GW

Echtzeit-Betriebsdaten von Solar-, Wind- und Speicheranlagen werden verwaltet

## >100

Große Energieversorgungsunternehmen vertrauen uns als technischen Berater

## Weltweit Erste

Wasserstoff-Testanlage im Großmaßstab zur Unterstützung von Sicherheit, Infrastruktur und Politik

# Breites und tiefes Know-how bei Onshore-Windprojekten



## MACHBARKEIT

- > Marktinformationen
- > Strategische Beratung
- > Technologiebewertung/Technologiequalifizierung
- > Zertifizierung von Windenergieanlagen und Komponenten

## ENTWICKLUNG

- > Auswahl des Konzepts
- > Messungen
- > Ressourcen- und Energieoptimierung
- > Technische Due Diligence
- > Energiebewertung vor dem Bau
- > Zertifizierung von Windenergieanlagen und Komponenten

## ENGINEERING

- > Optimierung der Projektierung
- > Betriebs- und Instandhaltungsplanung
- > Turbinen-Beratung
- > Überprüfung der Zusammenschaltung
- > Einhaltung der Netzanschlussbedingungen
- > Zertifizierung von Windenergieanlagen und Komponenten

## KONSTRUKTION

- > Optimierung der Konstruktion
- > Projektmanagement
- > Bauüberwachung
- > Ingenieur der Banken
- > Zertifizierung von Trainingssystemen
- > Zertifizierung von Windenergieanlagen und Komponenten

## OPERATION

- > Optimierung des Asset-Managements
- > Betriebs- und Wartungsoptimierung
- > Leistungs- und Zustandsüberwachung
- > Inspektionen und Audits
- > Betriebliche Energiebewertung
- > Due Diligence des Projektportfolios
- > Zertifizierung von Windenergieanlagen und Komponenten
- > Zertifizierung von Dienstleistern
- > Verlängerung der Lebensdauer

# Einfluss Klimaänderung auf Energieertragsprognosen

# Die Zukunft ist die Vergangenheit...oder doch nicht?

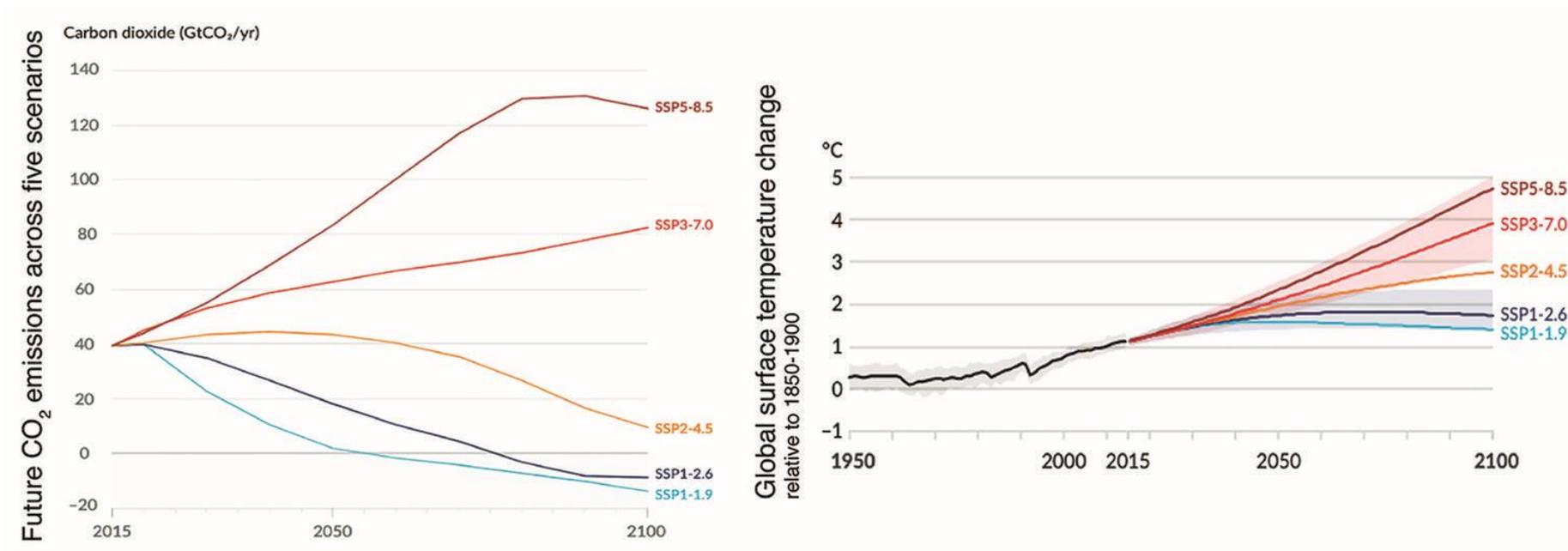
- **Hauptannahme zur Schätzung der zukünftigen Wind- oder Solarenergieproduktion / Einnahmen:**
  - Das Klima der jüngsten Vergangenheit ist ein guter Vorhersagewert für die Zukunft
  - Gilt dies auch bei einem beschleunigten Klimawandel?



*“...”...In den letzten Jahrzehnten haben Schlüsselindikatoren des Klimasystems zunehmend ein Niveau erreicht, das seit Jahrhunderten seit Jahrtausenden nicht mehr beobachtet wurde, und sie verändern sich mit einer Geschwindigkeit, die zumindest in den letzten 2.000 Jahren beispiellos war.” [Bericht der IPCC-Arbeitsgruppe I \(2021\)](#)*

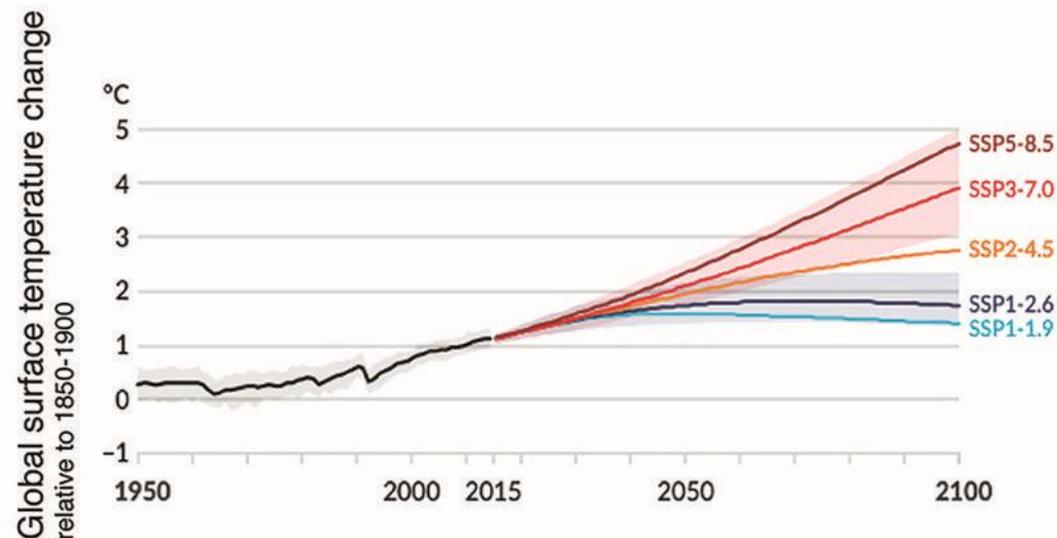
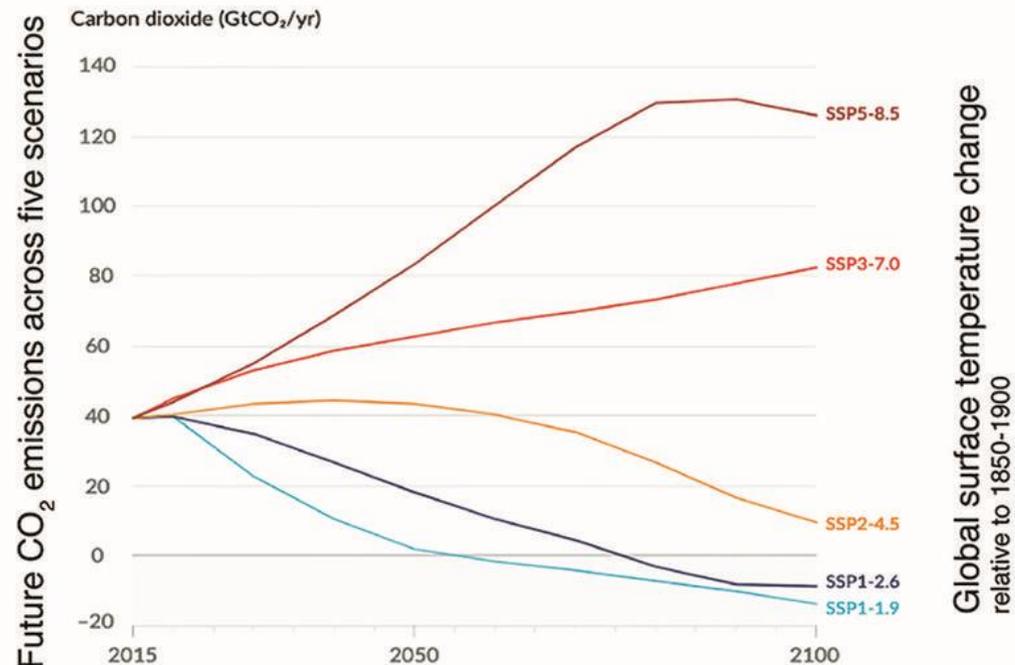
# Basis: Bericht der IPCC-Arbeitsgruppe I

- **SSP1-2.6:** Reduzierung der CO<sub>2</sub> Emissionen nach 2050 (Nachhaltigkeit)
- **SSP2-4.5:** CO<sub>2</sub> bewegt sich in der Nähe des derzeitigen Niveaus und nimmt nach 2050 allmählich ab (Fortsetzung der historischen Muster)
- **SSP3-7.0:** CO<sub>2</sub> verdoppelt sich bis 2100
- **SSP5-8.5:** CO<sub>2</sub> verdoppelt sich bis 2050 und nimmt danach stetig zu (uneingeschränktes Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch)



# Betrachtete Klimamodelle

- Ensembleapproach zur Bewertung der Robustheit und Unsicherheit der prognostizierten Veränderungen bei den Wind- und Solarenergie-Ressourcen im Zeitraum 2025-2055
- 30 “Flagship-”models aus [CMIP6](#)
  - Ausgewählt unter Verwendung der [empfohlenen “wahrscheinlichen” Modellen](#), konsistent mit IPCC Assessment Report 6 (AR 6) Projektionen
- 4 Tier 1 [Shared Socioeconomic Pathway \(SSP\)](#) Treibhausgasemissionen und Erwärmungsszenarien



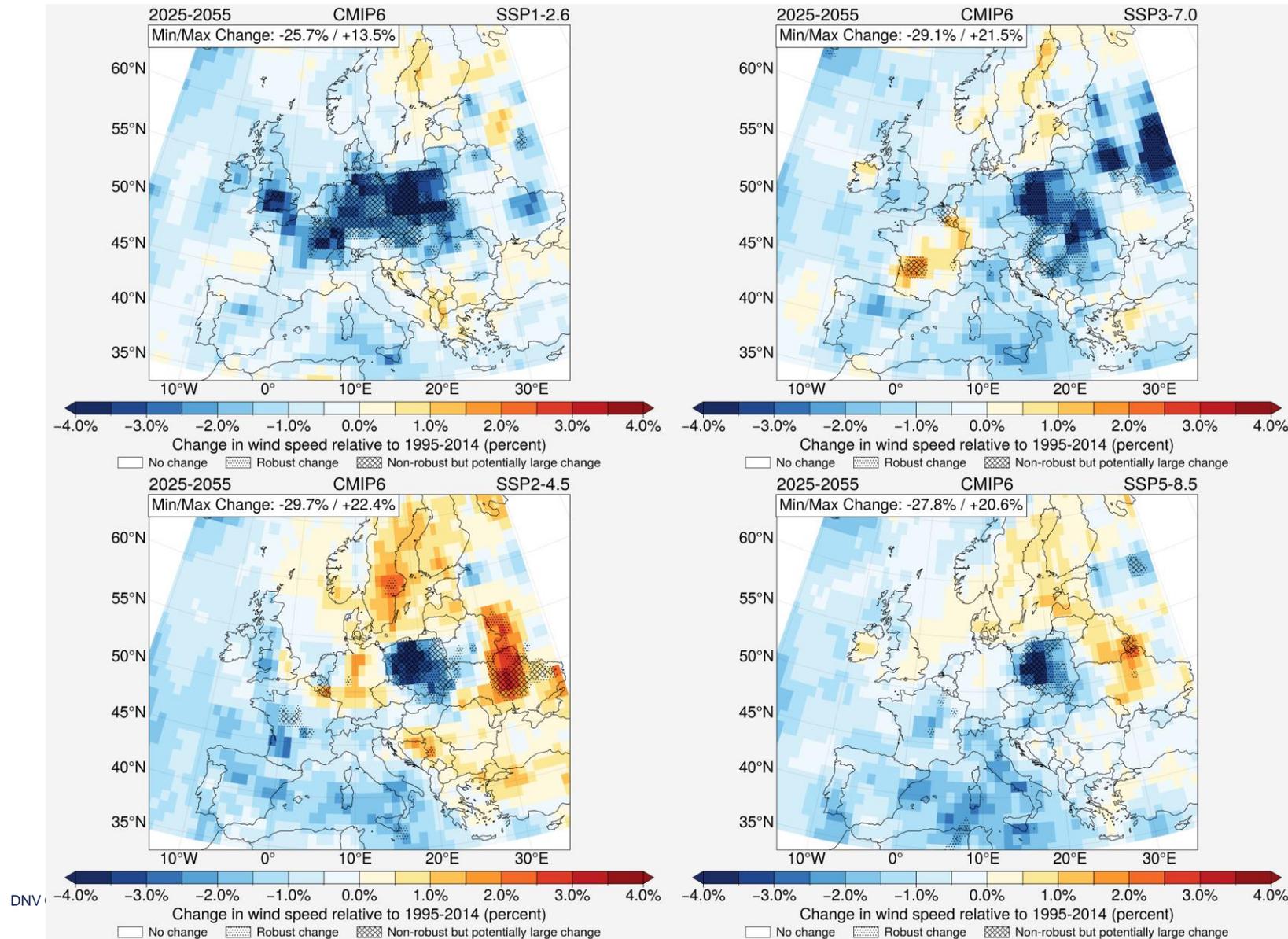
Von [IPCC AR6 WG I Summary for Policy Makers](#)

# Bewertung der Robustheit / Unsicherheit der prognostizierten Veränderungen

Ansatz	Definition	Kategorisierung
<p><b>DNV:</b> Prognostizierter linearer Trend statistisch signifikant</p>	<p>Ausmaß, Vorzeichen und statistische Signifikanz der prognostizierten Trends (2025-2055)*</p> <p>(90% Vertrauensbereich)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Keine Änderung</b> &lt;66% Modelle zeigen signifikante Änderung</li> </ul>
<p><b>IPCC:</b> Signal des Klimawandels übersteigt natürliche Variabilität</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berechnung der Differenz zwischen den langfristigen Mittelwerten 2025-2055 und 1995-2014</li> <li>• Unterschiede, die die Variabilitätsschwelle überschreiten, gelten als signifikant</li> <li>• Variabilitätsschwelle:  <math display="block">\gamma = \sqrt{2/20} \cdot 1.645 \cdot \sigma_{1yr}</math> <math display="block">1.645 \cdot \sigma_{1yr} = 90\% \text{ confidence}</math> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Robuste Veränderung</b>            ≥66% der Modelle zeigen signifikante Veränderungen            ≥80der Modelle stimmen bei den Vorzeichen der Veränderung überein</li> <li>• <b>Nicht-robuste, aber potenziell große Veränderung</b>            ≥66% der Modelle zeigen signifikante Veränderungen            ≤80der Modelle stimmen bei den Vorzeichen der Veränderung überein</li> </ul>

\*[Yue and Wang \(2004\)](#)

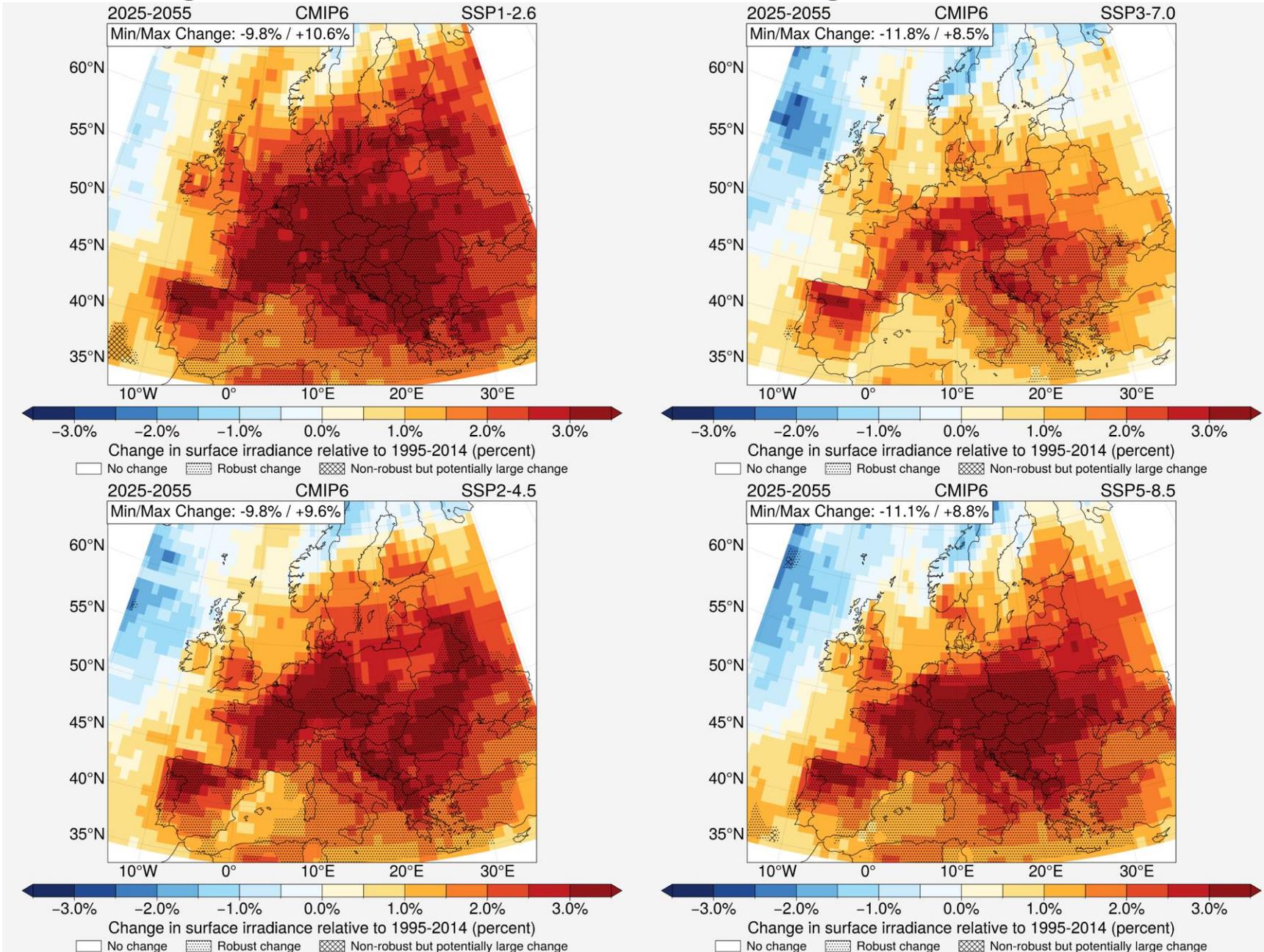
# Prognostizierte Änderung der oberflächennahen Windgeschwindigkeiten



Die Ergebnisse stimmen mit unabhängigen Studien überein

- Earth's Future, **10**, 2022;  
[doi.org/10.1029/2021EF002448](https://doi.org/10.1029/2021EF002448)

# Prognostizierte Änderung der Solareinstrahlung

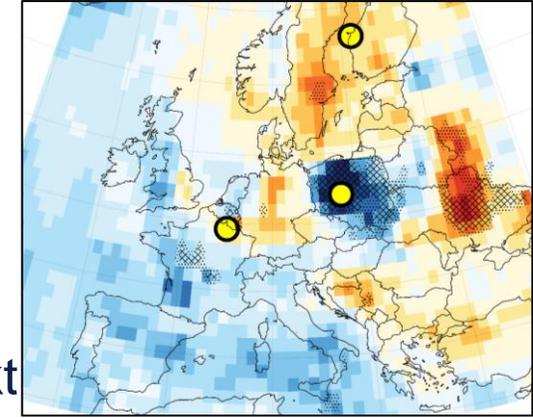


Die Ergebnisse stimmen mit unabhängigen Studien überein

- Earth System Dynamics, 2021, **12**, <https://doi.org/10.5194/esd-12-1099-2021>
- Solar Energy, 2015, **116**, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.03.039>

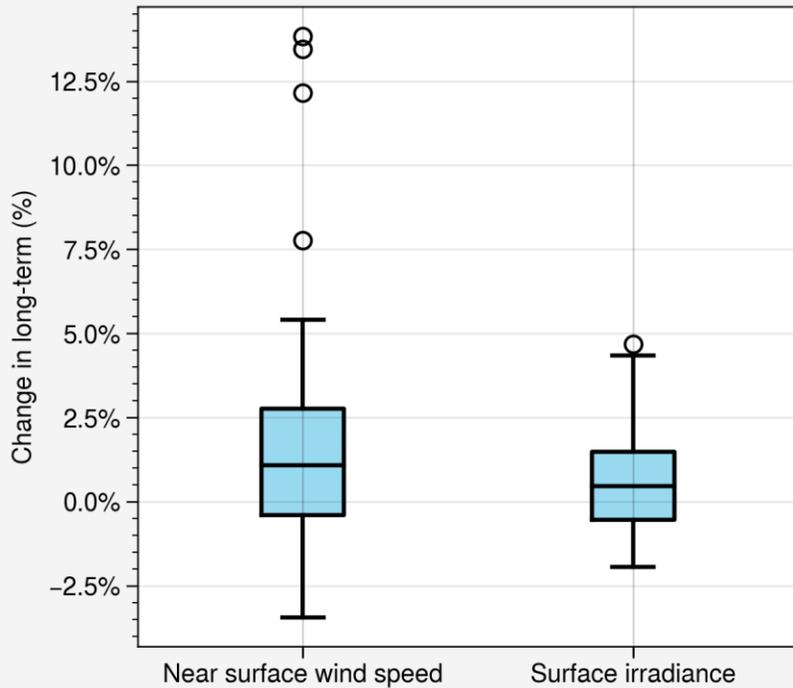
# Verteilung der Veränderungen im langfristigen Mittelwert

Ergebnisse für die Gitterzelle (100 km) am Nächsten zu jedem Punkt



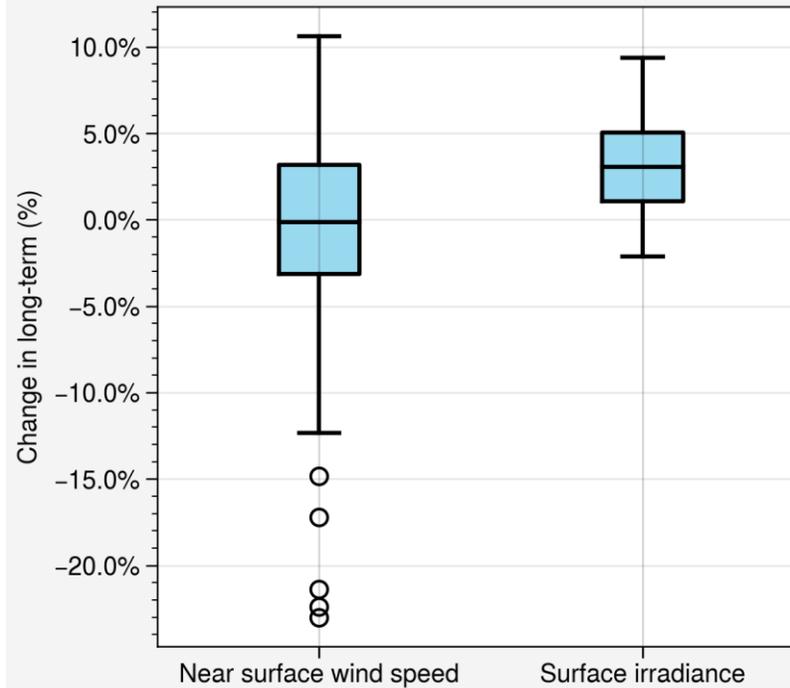
## Finland

CMIP6 (30 models x 4 SSP scenarios)



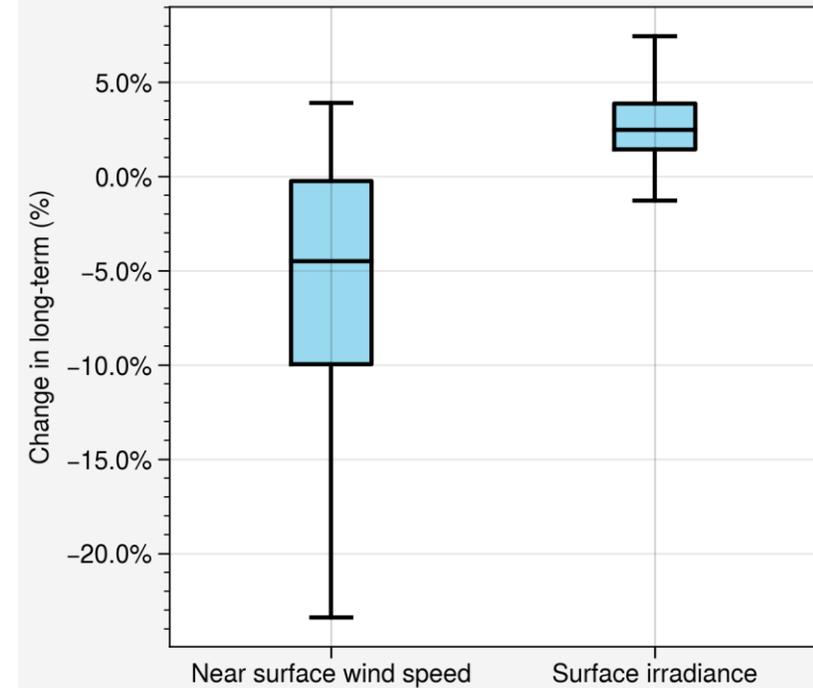
## France

CMIP6 (30 models x 4 SSP scenarios)



## Poland

CMIP6 (30 models x 4 SSP scenarios)



# Risiken darstellen wird erforderlich

- In immer mehr Ländern wird Unternehmen eine verstärkte Offenlegung der Klimarisiken durch die Unternehmen gefordert - Bisher freiwillige Rahmenwerke zur Offenlegung. Finanzinstitutionen / Investoren **müssen** das Risiko von Klimaänderungen betrachten.
- Es müssen jetzt Maßnahmen ergriffen werden, um sicherzustellen, dass die Unternehmen vorbereitet sind [1].
- Großbritannien war das erste G20-Land, das die größten britischen Unternehmen dazu verpflichtete, ihre klimabezogenen Risiken und Chancen offenzulegen, in Übereinstimmung mit den Empfehlungen der Taskforce on Climate-related Financial Disclosures (TCFD) [2].
- **Eine ähnliche Regelung wurde in Deutschland vom UBA vorgeschlagen für alle börsennotierten Unternehmen in Deutschland zur Anwendung der TCFD-Empfehlungen verpflichtet. [3].**
- Für Vorstände deutscher Unternehmen gehört der Klimawandel 2023 mittlerweile zu den drei Top-Prioritäten [...] International liegt der Klimawandel auf Platz zwei der größten Herausforderungen [4].

[1] <https://www.edie.net/why-harmonising-climate-disclosure-standards-will-be-crucial-in-2023/>

[2] <https://www.clydeco.com/en/insights/2023/01/corporate-reporting-of-environmental-matters-under>

[3] <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/reporting-climate-related-risks-survey-summary-2021-02-01.pdf>

[4] <https://industrie.de/management/klimawandel-weltwirtschaftsforum-cxo-sustainability-survey-2023-investitionen/>



# Zusammenfassung

- Potenziell große Veränderungen der Windgeschwindigkeit in Oberflächennähe über Teilen Europas, aber die Modelle stimmen nicht immer über das Vorzeichen der Veränderung überein
  - Unabhängige Studie stellt deutliche Abnahme der Windstärke über ganz Europa bis 2100 fest
- Starke Zunahme der Sonneneinstrahlung in den meisten Teilen Europas
  - Übereinstimmend mit anderen unabhängigen Studien
- Starker Anstieg der Durchschnittstemperaturen in ganz Europa (nicht gezeigt)
  - Potenziell abnehmende PV-Leistung
- Viele sekundäre Effekte: Einfluss Temperatur auf Restriktionen, Vereisung, etc.
- Die vorstehenden Ergebnisse zeigen Veränderungen **auf regionaler Ebene**
  - Downscaling des Klimas erforderlich, um zu verstehen, wie sich solche Veränderungen auf lokaler/standortspezifischer Ebene manifestieren können
- ***Es gibt deutliche Anzeichen, dass die prognostizierten Veränderungen bereits eintreten - siehe nächste und ergänzende Folien!***

# Beobachtete Veränderungen der Windgeschwindigkeit in Oberflächennähe

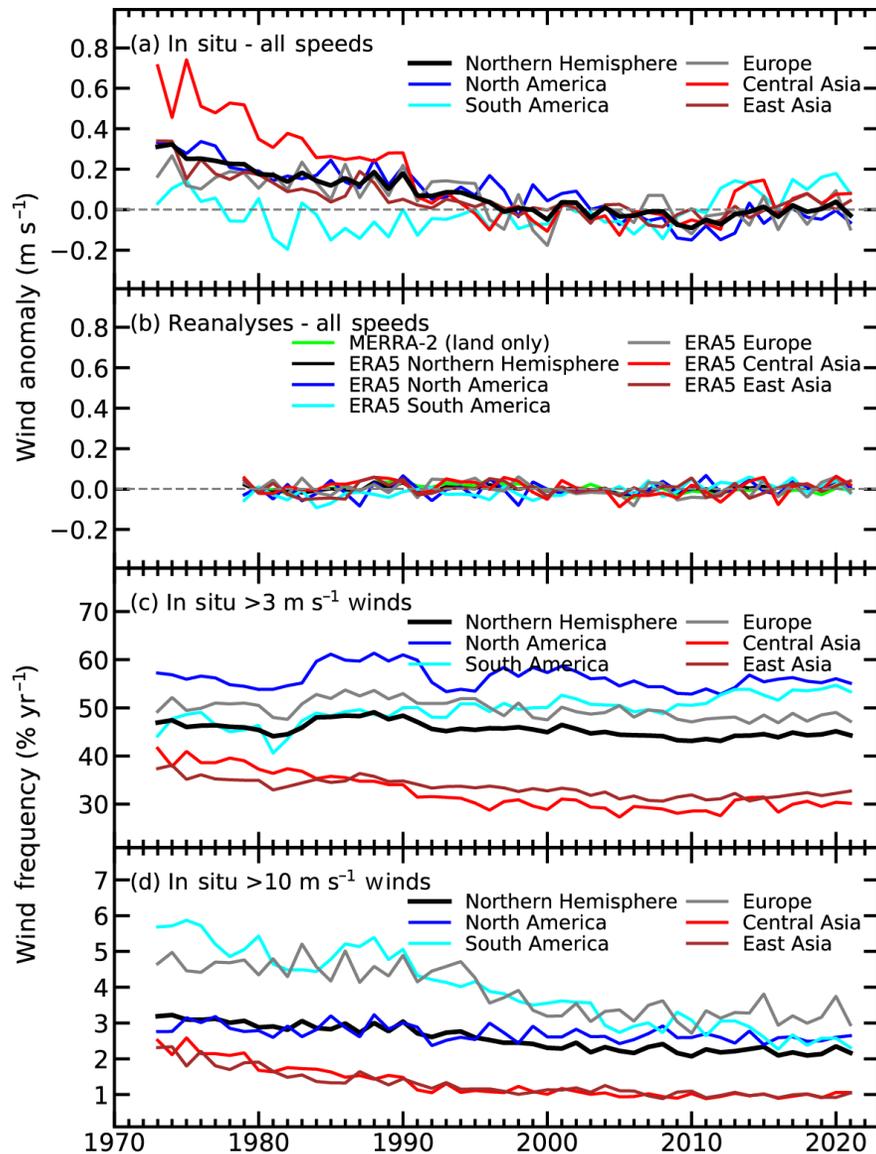


Abb. 2.42. Nördliche Hemisphäre (20°-70°N) und regionale jährliche Zeitreihen der Windgeschwindigkeitsanomalie an der Landoberfläche ( $m s^{-1}$ ; Basisperiode 1991-2020) unter Verwendung (a) des HadISD3 (1973-2021) Beobachtungsdatensatzes und (b) der ERA5 (1979-2021) und MERRA-2 (1980-2021) Reanalysen. Häufigkeit des Auftretens von HadISD3 (% pro Jahr-1) für Windgeschwindigkeiten (c)  $> 3 m s^{-1}$  und (d)  $> 10 m s^{-1}$ .

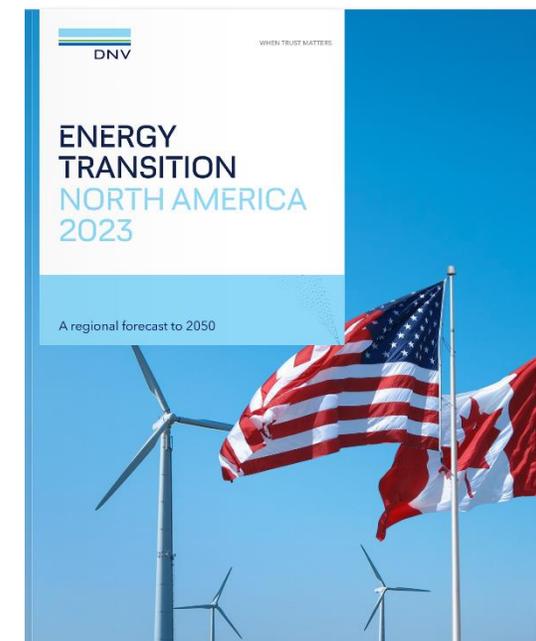
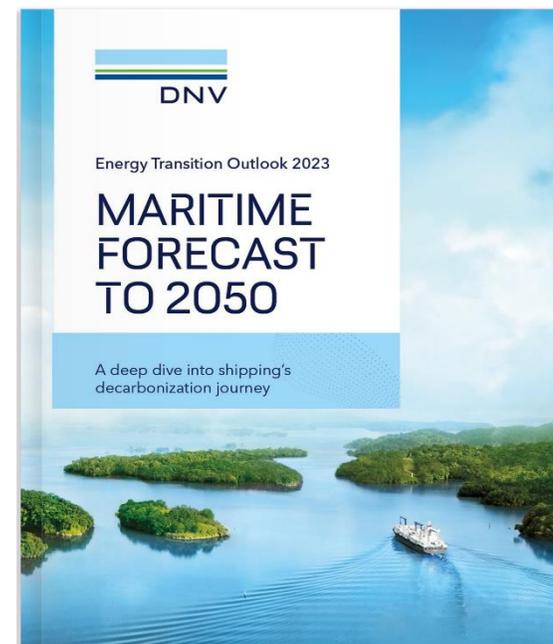
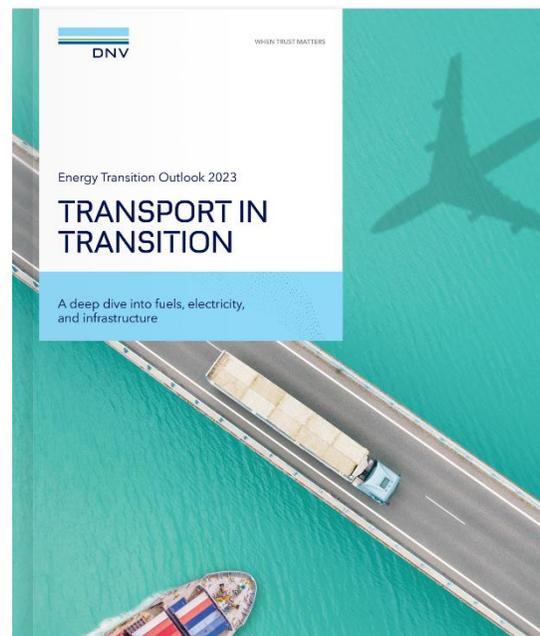
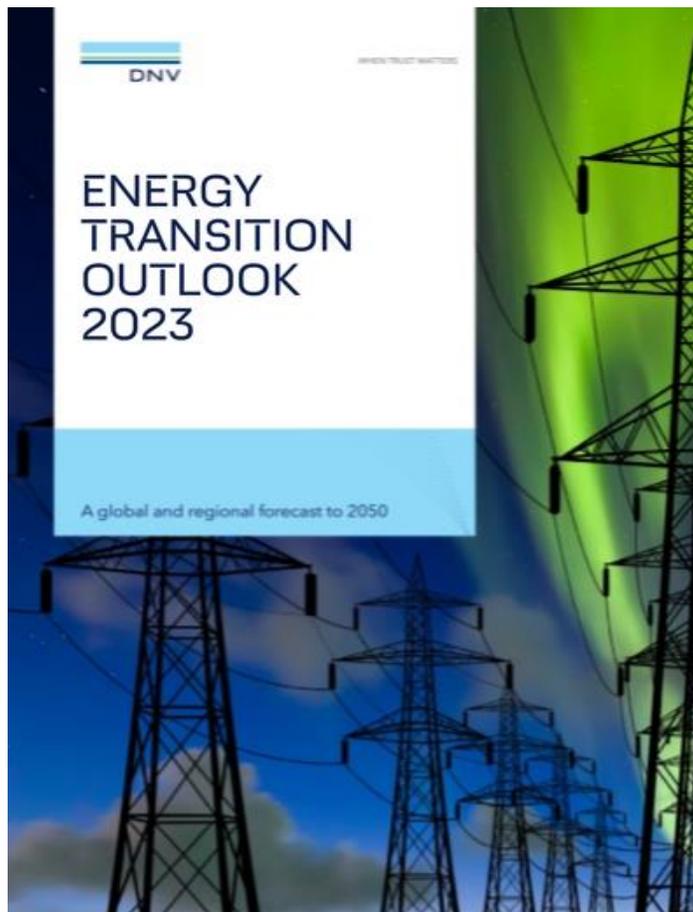
Anmerkung: Die Reanalysedaten und meteorologischen Beobachtungen liefern deutlich unterschiedliche Ergebnisse, auch hinsichtlich der jährlichen Schwankungen. Die Gemeinschaft der Atmosphärenwissenschaftler versteht die Gründe für diese Diskrepanz nicht vollständig.

Aus [State of the Climate in 2022](#), der maßgeblichen jährlichen Zusammenfassung des beobachteten Klimawandels

# Zukünftige Arbeit

- Ermitteln, wie die Auswirkungen des Klimawandels am besten in Energieertragsmittlungen dargestellt werden können - dies erfordert ein starkes Engagement der gesamten Branche, bei Eigentümern, Finanzierern und Investoren.
- Entwicklung einer einheitlichen Sprache/Methodik zur eindeutigen Quantifizierung der physischen oder finanziellen Risiken für Vermögenswerte unter den Bedingungen des Klimawandels.
  - Expertenbeurteilung des Vertrauens und der Wahrscheinlichkeit von Risiken - erfordert ein starkes Engagement in der Klimawissenschaft, um deren Fachwissen und Erkenntnisse zu nutzen.
- Untersuchung der Frage, wie sich regionale Veränderungen auf standortspezifischer Ebene manifestieren können.
  - Relative Änderungen der Windgeschwindigkeit und des Energieertrages, Variabilität, Extremwind
  - Korrelation von Energieertrag in verschiedenen Zeiträumen bei Betrachtung mehrerer Projekte
  - Wind-/Solarressourcen und physische Risiken für Vermögenswerte: tropische Wirbelstürme, Hagel, Überschwemmungen usw.
  - **Weitere Untersuchungen zum Downscaling des Klimas (rechenintensiv!)**
  - **Überprüfung der Verwendung von Stresstest, um die Bandbreite plausibler Veränderungen / Unwägbarkeiten zu erfassen.**

# Energiewendebericht ETO 2023 kürzlich veröffentlicht bei eto.dnv.com



# Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

**Wolfgang Winkler**  
Principal Engineer  
Wolfgang.Winkler@dnv.com  
Mobile: +49 (0)172 408 50 29

[www.dnv.com](http://www.dnv.com)

# Ergänzende Informationen

# In dieser Analyse verwendete CMIP6 Modelle

- ACCESS-CM2
- ACCESS-ESM1-5
- AWI-ESM-1-1-MR
- BCC-CSM2-MR
- BCC-ESM1
- CAMS-CSM1-0
- CAS-ESM2-0
- CESM2
- CESM2-FV2
- CESM-WACCM-FV2
- CMCC-CM2-SR5
- CNRM-CM6-1
- CNRM-ESM2-1
- FGOALS-f3-L
- FGOALS-g3
- GISS-E2-1-G
- GISS-E2-1-H
- GISS-E2-2-G
- IITM-ESM
- KACE-1-0-G
- MCM-UA-1-0
- MIROC-ES21
- MIROC6
- MIROC-ES2L
- MPI-ESM-1-2-HAM
- MPI-ESM1-2-HR
- MPI-ESM1-2-LR
- MRI-ESM2-0
- NorCPM1
- NorESM2-1M

Deutliche Anzeichen, dass die prognostizierten Veränderungen bereits eintreten

# Beobachtete Veränderungen der Windgeschwindigkeit in Oberflächennähe

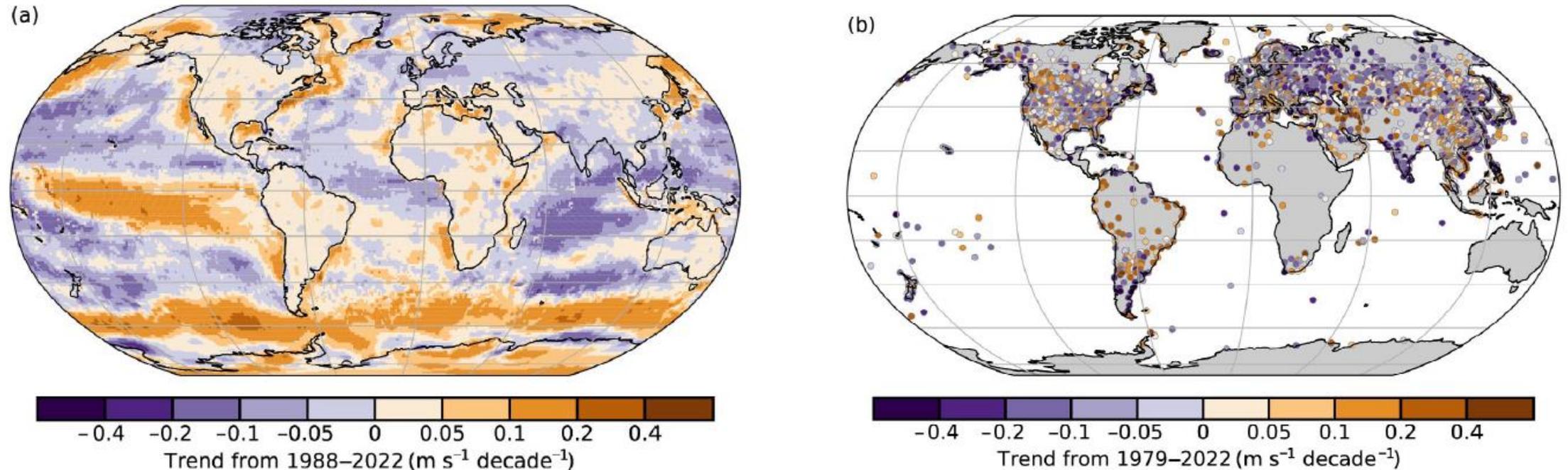
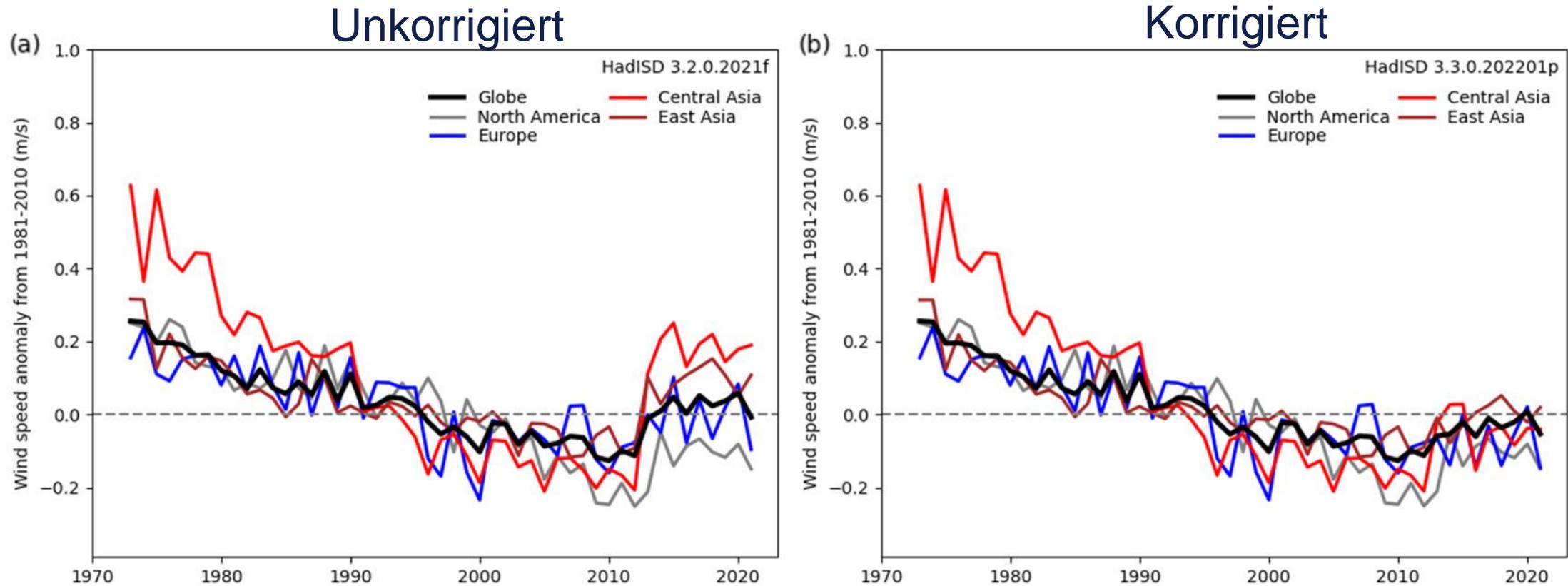


Fig. 2.46. Wind speed trends ( $\text{m s}^{-1} \text{ decade}^{-1}$ ) from (a) ERA5 reanalysis output over land/ice and Remote Sensing Systems (RSS) satellite radiometers (SSM/I, SSMIS, TMI, GMI, AMSR2, ASMR-E, and WindSat) over ocean (shaded areas) for the period 1988–2022 and (b) the observational HadISD3 dataset over land (circles) for the period 1979–2022.

# Beobachtete Veränderungen der Windgeschwindigkeit in Oberflächennähe

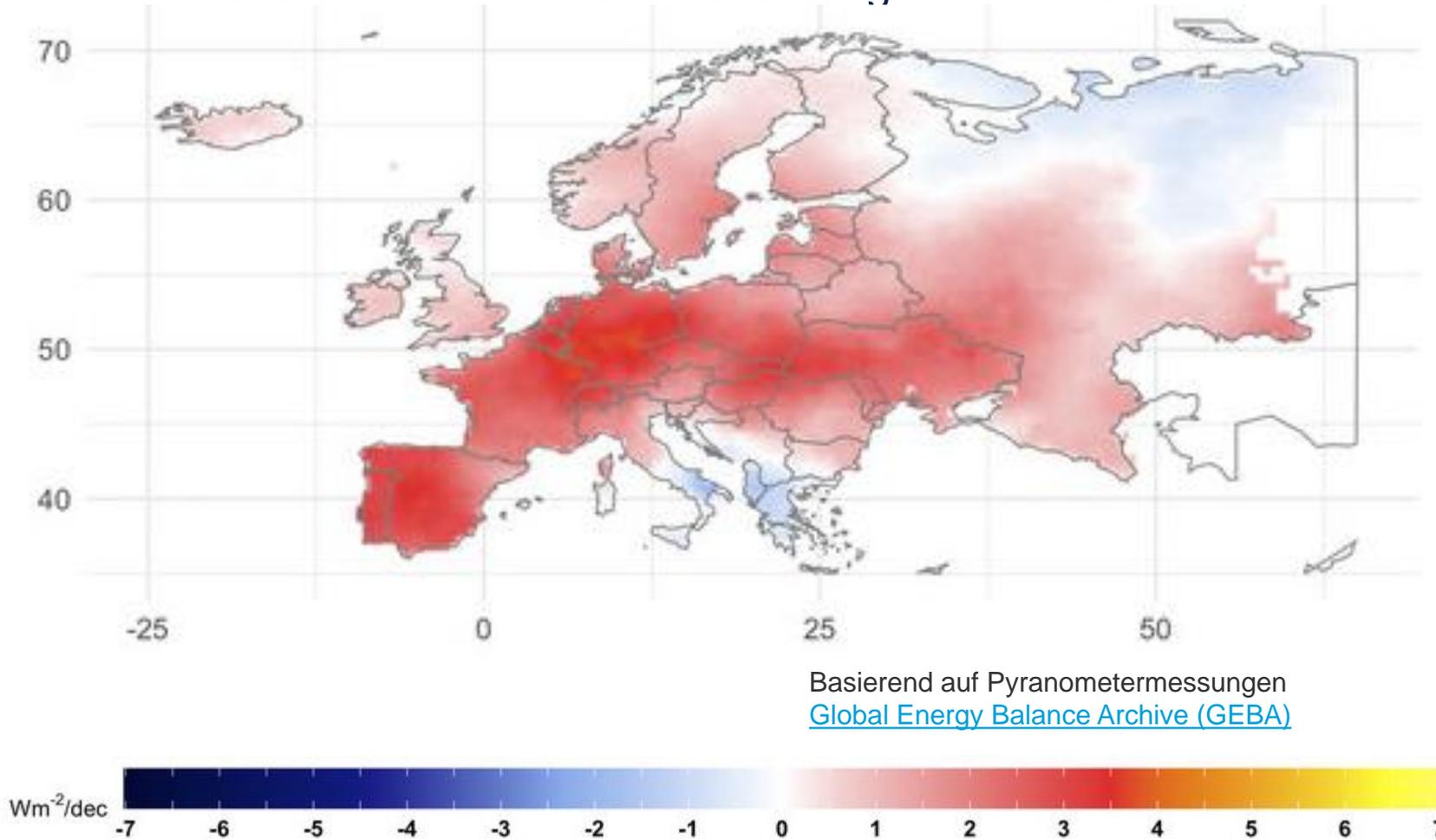
Aus einer [kürzlich veröffentlichten Studie](#) geht hervor, dass sich die Windhöffigkeit nicht so stark erholt hat wie bisher angenommen, was auf nicht dokumentierte Änderungen bei der Codierung der Windstille zurückzuführen ist. Nach der Korrektur liegt die Erholung der Windstärke 30 % unter den früheren Schätzungen.



Zitat: Environmental Research 4, 2022 ; <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac770a>

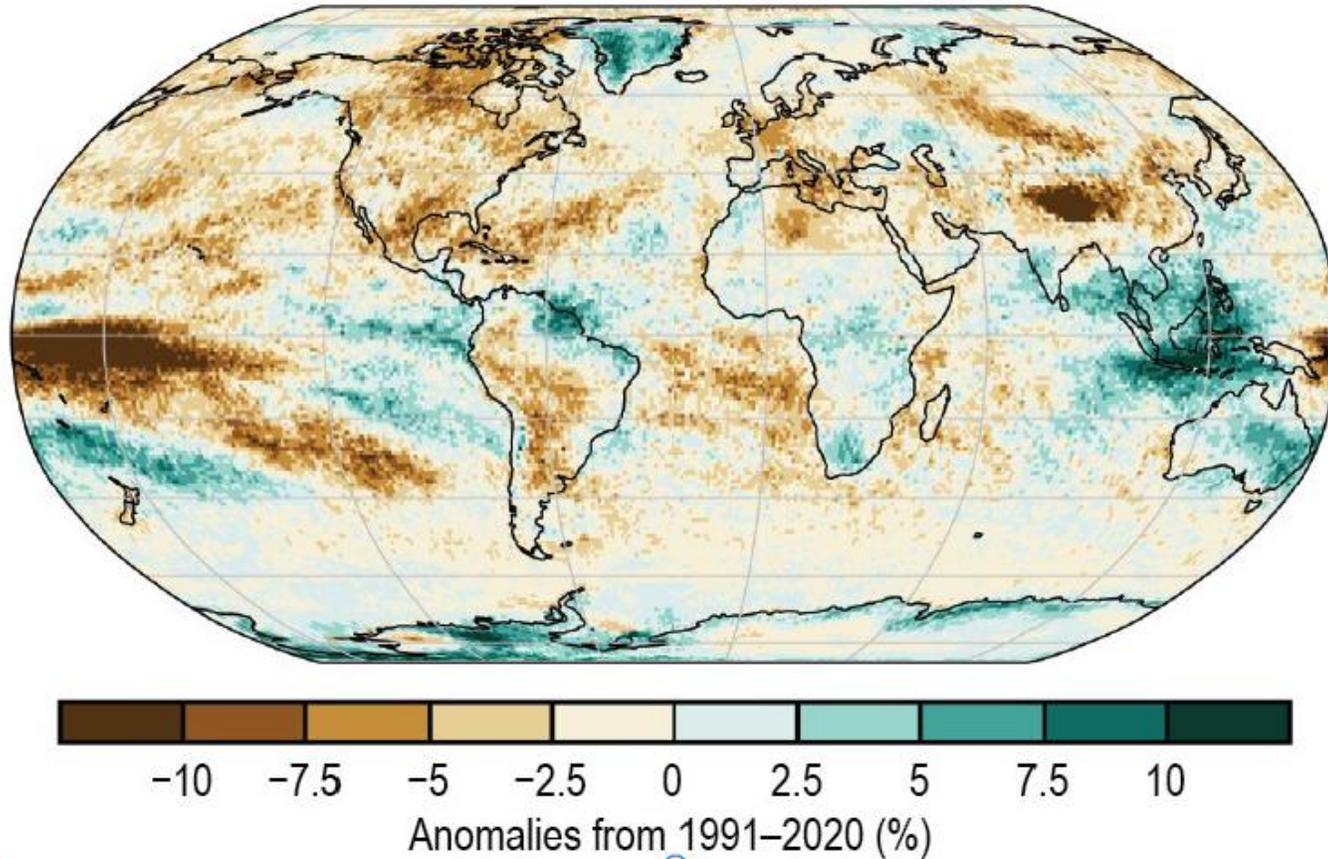
# Beobachtete Veränderungen der Solareinstrahlung

Trend der Oberflächeneinstrahlung 1977-2019



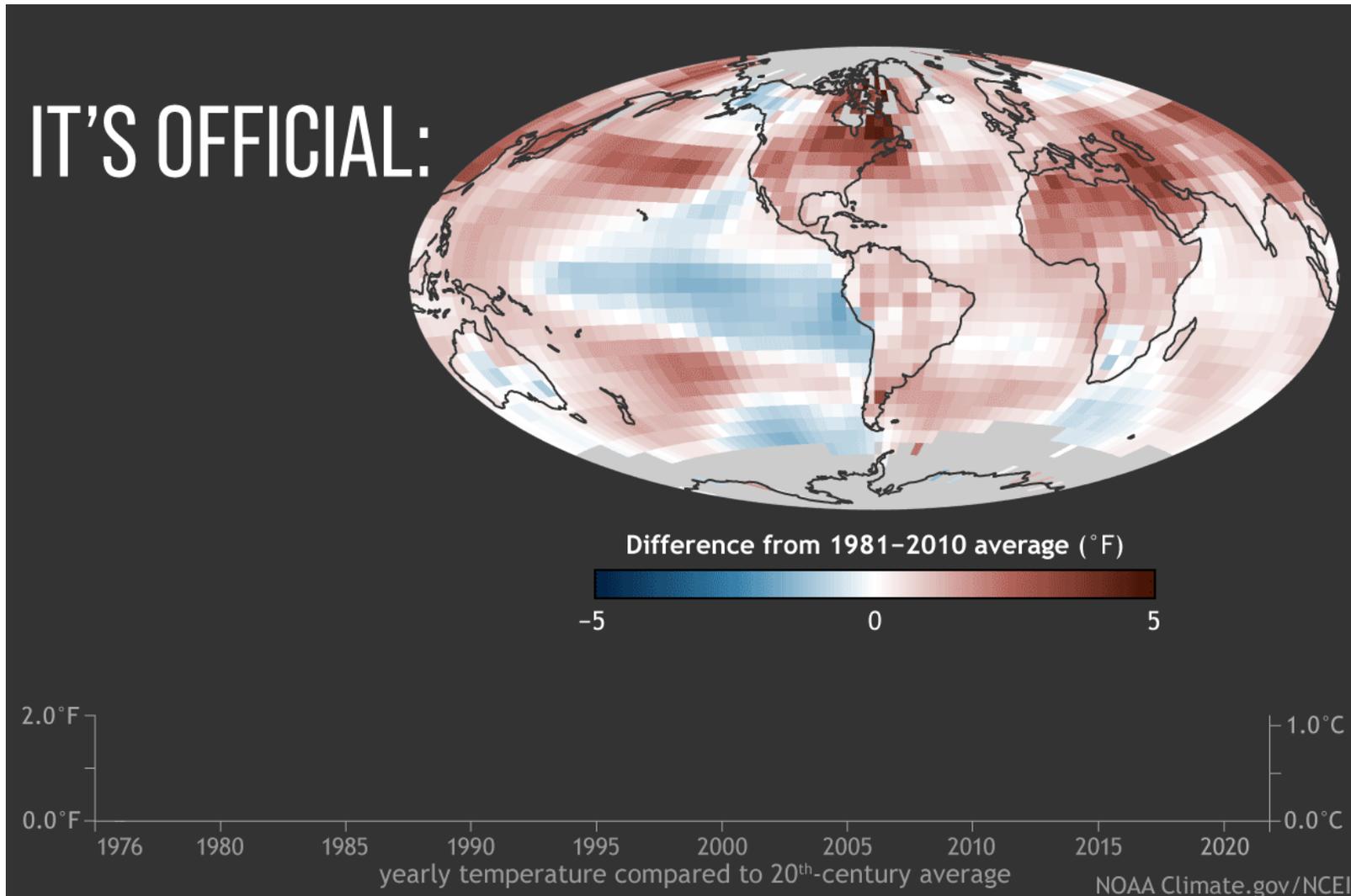
# Beobachtete deutliche Verringerung der Bewölkung

(m) Cloudiness



Aus [State of the Climate in 2022](#), der maßgeblichen jährlichen Zusammenfassung des beobachteten Klimawandels

# Beobachtete Veränderungen der oberflächennahen Temperatur



# Beobachtete Veränderungen der oberflächennahen Temperatur

Globale durchschnittliche Anomalien der Oberflächenlufttemperatur (°C; Basiszeitraum 1991-2020). In-situ-Schätzungen werden für NOAA /NCEI (Zhang et al. 2019), NASA-GISS (Lenssen et al. 2019), Berkeley Earth (Rhode und Hausfather 2020). HadCRUT5 (Morice et al. 2021), CRUTEM5 (Osborn et al. 2021) und HadSST4 (Kennedy et al. 2019) gezeigt. Reanalyse-Schätzungen werden aus ERA5 (Hersbach et al. 2020), einschließlich der vorläufigen ERA5-Rückerweiterung (Bell et al. 2021) für 1967-2021, und JRA-55 (Kobayashi et al. 2015) gezeigt. Bitte beachten Sie die Änderung der Skala der x-Achse vor/nach 2000.

Aus [State of the Climate in 2021](#), der maßgeblichen jährlichen Zusammenfassung des beobachteten Klimawandels.

