

Hintergrundinformation

Die Ozeane bedecken etwa 70% der Erdoberfläche und Aufzeichnungen der Meeresoberflächentemperatur (*sea surface temperature*, SST) sind wichtig um zu verstehen, wie der Ozean mit der Erdatmosphäre in Verbindung steht. Die SST ist ein wichtiger Parameter der zur Bestimmung der globalen mittleren Temperatur beiträgt und liefert grundlegende Informationen über das globale Klimasystem und das Fortschreiten des Klimawandels [1]. Die SST ist ein wesentlicher Parameter für Wettervorhersagen und atmosphärische Modellsimulationen und ist auch für die Untersuchung mariner Ökosysteme wichtig [2]. Sie hat großen Einfluss auf die Lufttemperatur und -feuchte und damit auch auf die Bewegung der Luftmassen in der Erdatmosphäre. So können z.B. hohe Meeresoberflächentemperaturen Wirbelstürme über dem Ozean entstehen lassen bzw. diese verstärken. SST-Daten sind besonders nützlich, um das Einsetzen von El-Niño- und La-Niña-Bedingungen zu erkennen und Monsunphänomene zu erklären [3]. Die globale mittlere SST ist seit Beginn des 20. Jahrhunderts um $0,88^{\circ}\text{C}$ gestiegen, und es ist so gut wie sicher, dass sich der Anstieg während des 21. Jahrhunderts weiter fortsetzen wird [4].

Die SST kann man vor Ort (in situ) mit Hilfe von Thermometern vom Schiff, Bojen und Driftern bestimmen. Dies wurde z.B. schon im siebzehnten Jahrhundert von Benjamin Franklin bei der Kartierung des Golfstroms gemacht. Seit den 1980er Jahren wurden jedoch Satellitenmessungen für die Bestimmung der SST immer wichtiger, da sie einen globalen Blick auf die SST und deren Änderungen erlauben [2, 3, 5]. Ähnlich wie bei einem Infrarot-Fieberthermometer wird hierbei die Temperatur nicht direkt gemessen, sondern aus Messungen von Infrarot- oder Mikrowellen-Strahlung bestimmt, die von dem beobachteten Körper aufgrund seiner Temperatur abgestrahlt wird. Bei dieser Art der Strahlung handelt es sich um Licht dessen Wellenlänge größer ist, als die von dem Licht, welches wir mit unseren Augen wahrnehmen können. Anders als in dem durch unsere Augen beobachtbaren sichtbaren Spektralbereich mit Wellenlängen von etwa 380nm bis 780nm, ist die Atmosphäre im infraroten Spektralbereich mit Wellenlängen ab etwa $4\mu\text{m}$ größtenteils relativ undurchsichtig. Es gibt jedoch einige sogenannte atmosphärische Fenster (z.B. bei etwa $11\mu\text{m}$ - $12\mu\text{m}$), in denen die Atmosphäre durchsichtig genug ist, um die Erdoberfläche beobachten zu können (Abbildung 1, unten). Bei diesen Wellenlängen messen z.B. auch die Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR, [6, 7]). Es handelt sich dabei um Instrumente die seit Ende der 1970er Jahre auf verschiedenen NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, [8, 9]) und EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites, [10, 11]) Satelliten unter Anderem zur Bestimmung der SST eingesetzt werden.

Wie verändert sich die Meeresoberflächentemperatur aufgrund des Klimawandels?

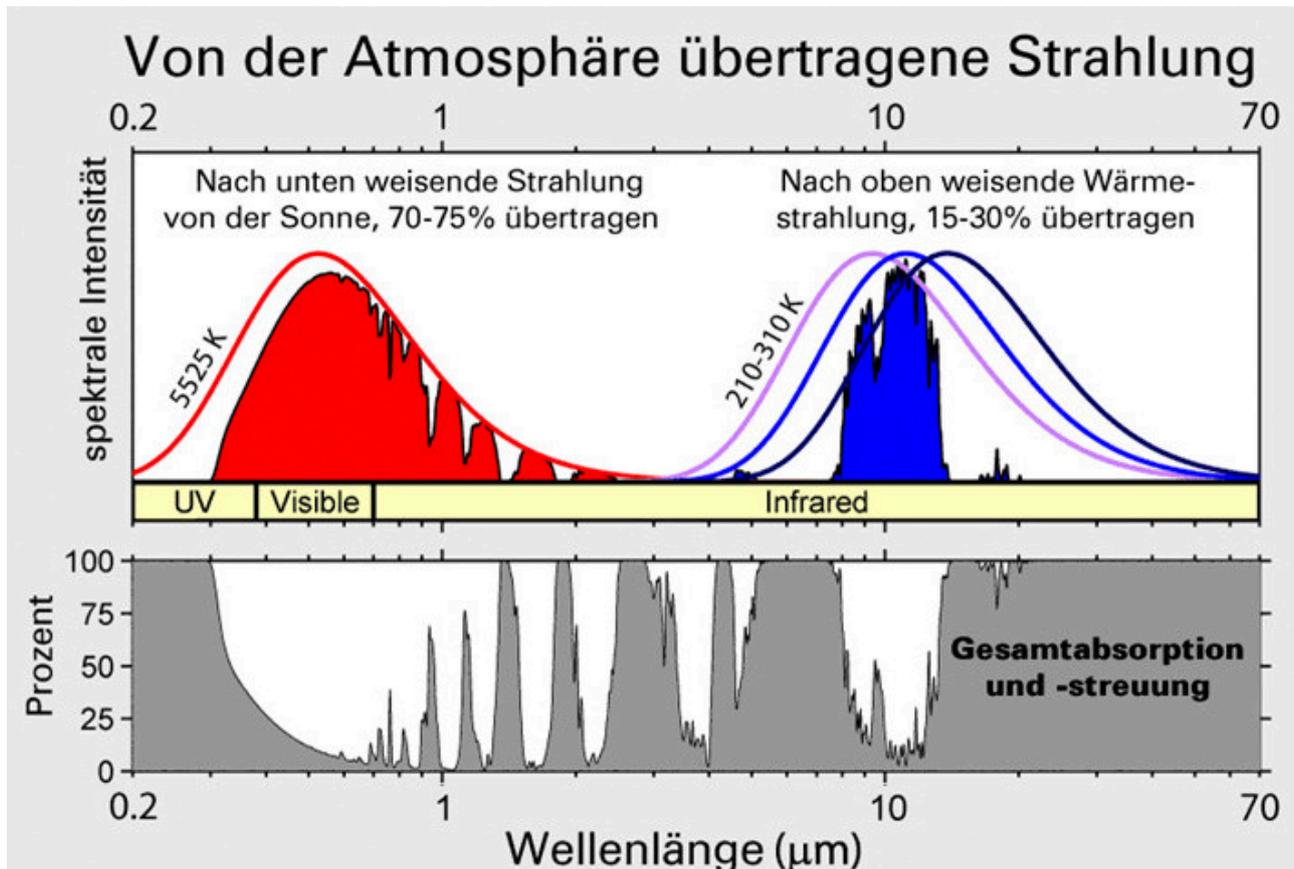


Abbildung 1: Von der Atmosphäre übertragene Strahlung als Funktion der Wellenlänge. Oben: Kurzwellige Sonnenstrahlung in rot und langwellige Wärmestrahlung der Erde und der Atmosphäre in blau. Unten: Anteil absorbierter Strahlung. Verändert nach: https://de.wikipedia.org/wiki/Idealisiertes_Treibhausmodell#/media/Datei:Atmospheric_Transmission_de.png.

Je nach Messmethoden gibt es übrigens Unterschiede, was genau man unter der SST versteht. So repräsentieren in situ Messungen z.B. häufig eine Wasserschicht von bis zu 20 Metern Tiefe, während das von Satelliten gemessene Infrarot-Signal aus einer Tiefe von weniger als 1mm kommt [2, 3].

Die hier verwendeten SST Daten stammen vom Europäischen Copernicus Climate Change Service (C3S, [12, 13, 14, 15, 16]) und basieren auf Infrarot-Messungen der Satelliteninstrumente ATSR (Along Track Scanning Radiometer, [17]), AVHRR und SLSTR (Sea and Land Surface Temperature Radiometer, [18]). Diese befinden sich auf verschiedenen Satelliten, die von den Organisationen ESA (European Space Agency, [19]), EUMETSAT und NOAA betrieben werden. Da die genannten Satelliteninstrumente die SST unter anderem nur bei wolkenfreiem Himmel messen können, entstehen Datenlücken, welche in dem verwendeten Datenprodukt mittels Interpolation gefüllt wurden. Die verwendeten C3S SST Daten liegen täglich auf einer regulären Plate-Carrée-Projektion [20] mit einer Auflösung von $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ vor. Für die hier vorgestellten

Wie verändert sich die Meeresoberflächentemperatur aufgrund des Klimawandels?

interaktiven Clim4Edu Browsergrafiken wurden daraus monatliche Mittelwerte mit einer Auflösung von $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ erstellt, die den Zeitraum 1982 – 2020 abdecken [21].

Abbildung 2 zeigt die aus diesen Daten bestimmte mittlere SST der Jahre 1982 bis 2020. Man erkennt einige bekannte Meeresströmungen, wie z.B. den warmen Golfstrom vor der Ostküste der USA [22] oder das vor der Westküste von Südafrika aufsteigende kalte Tiefenwasser [23]. Am deutlichsten sticht jedoch hervor, dass die SST in hohen Breiten in der Nähe der Pole etwa 30°C geringer ist als in den Tropen, was daran liegt, dass das wärmende Sonnenlicht umso schräger auf die Meeresoberfläche trifft, je weiter man sich vom Äquator entfernt.

Wie man am Vergleich der klimatologischen (mittleren) Monatsmittelwerte von Februar und August sieht (Abbildung 3), sind selbst jahreszeitliche Änderungen im Vergleich dazu relativ klein; d.h. die Abbildungen wirken auf den ersten Blick sehr ähnlich.

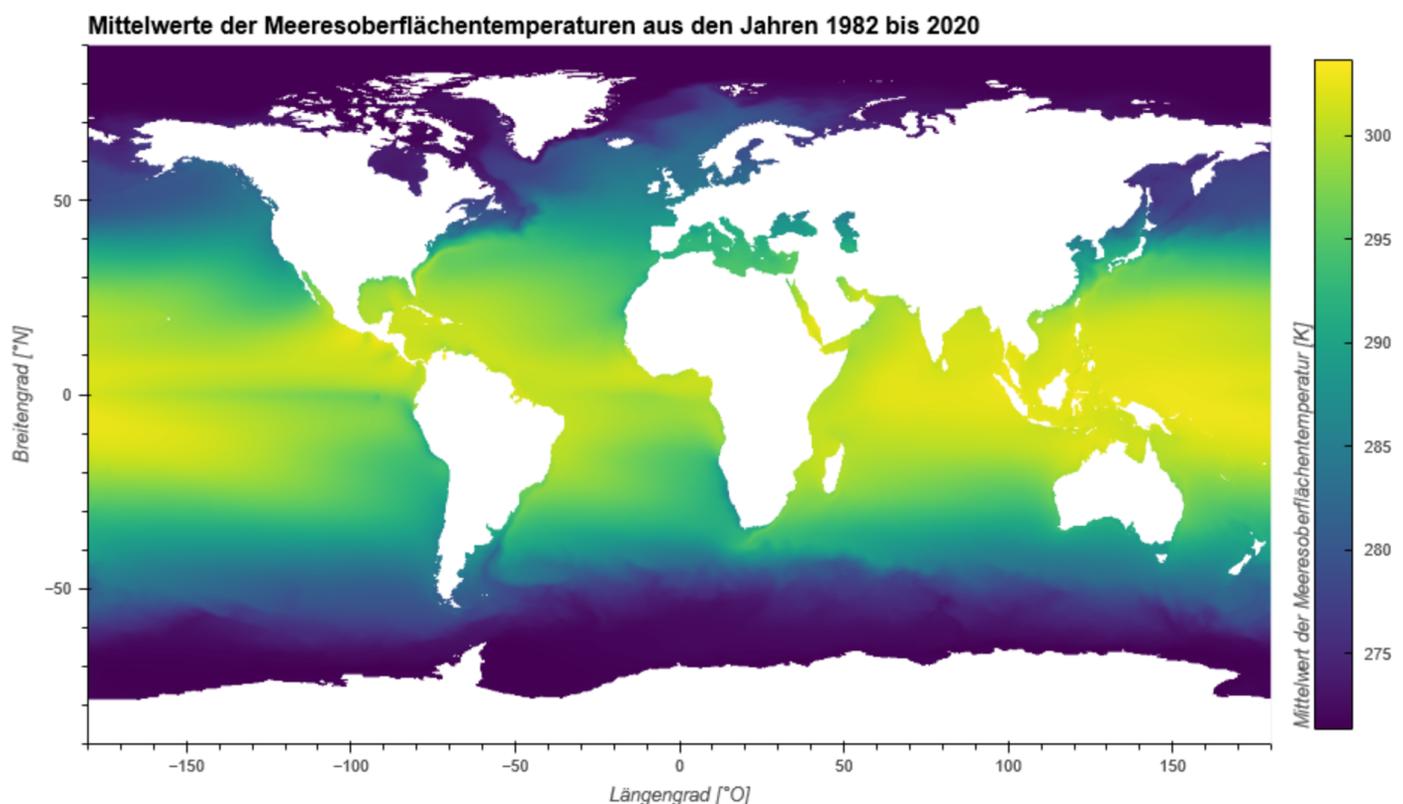


Abbildung 2: Mittelwerte der Meeresoberflächentemperaturen aus den Jahren 1982 bis 2020. Datenherkunft: Copernicus Climate Change Service [C3S, 12, 13, 14, 15, 16]. Auswertung und Abbildung: S. Arndt [21].

Wie verändert sich die Meeresoberflächentemperatur aufgrund des Klimawandels?

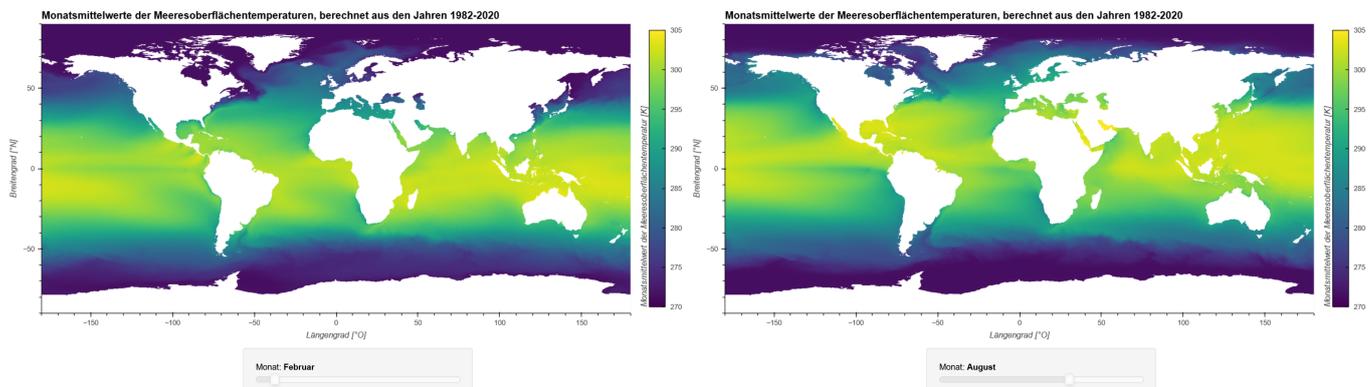


Abbildung 3: Klimatologische (mittlere) Monatsmittelwerte der Meeresoberflächentemperaturen aus den Jahren 1982 bis 2020 für Februar (links) und August (rechts). Datenherkunft: Copernicus Climate Change Service [C3S, 12, 13, 14, 15, 16]. Auswertung und Abbildung: S. Arndt [21].

Mit dem Klimaabkommen von Paris wurde 2015 beschlossen, dass der weltweite Temperaturanstieg möglichst auf 1,5°C, auf jeden Fall aber auf deutlich unter 2°C im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter beschränkt werden soll [24]. Daraus folgt, dass der zu erwartende SST-Anstieg aufgrund des vom Menschen verursachten Klimawandels noch einmal deutlich geringer ist, als die jahreszeitlichen Änderungen.

Um solche kleinen Änderungen sichtbar zu machen vergleicht man sie üblicherweise mit einem Normal-, oder Referenzzustand zu dem man die Anomalie x' bildet. D.h. man subtrahiert von einem konkreten Zustand x einen mittleren Zustand \bar{x} .

$$1 \quad x' = x - \bar{x} \quad .$$

Um die jahreszeitlichen Änderungen besser sichtbar zu machen, kann man z.B. den in Abbildung 2 gezeigten Mittelwert von den in Abbildung 3 gezeigten klimatologischen Monatsmittelwerten subtrahieren und erhält die in Abbildung 4 gezeigten Anomalien. In diesen lässt sich z.B. sehr einfach ablesen, dass das Mittelmeer im August etwa 6°C wärmer ist als im Jahresmittel.

Wie verändert sich die Meeresoberflächentemperatur aufgrund des Klimawandels?

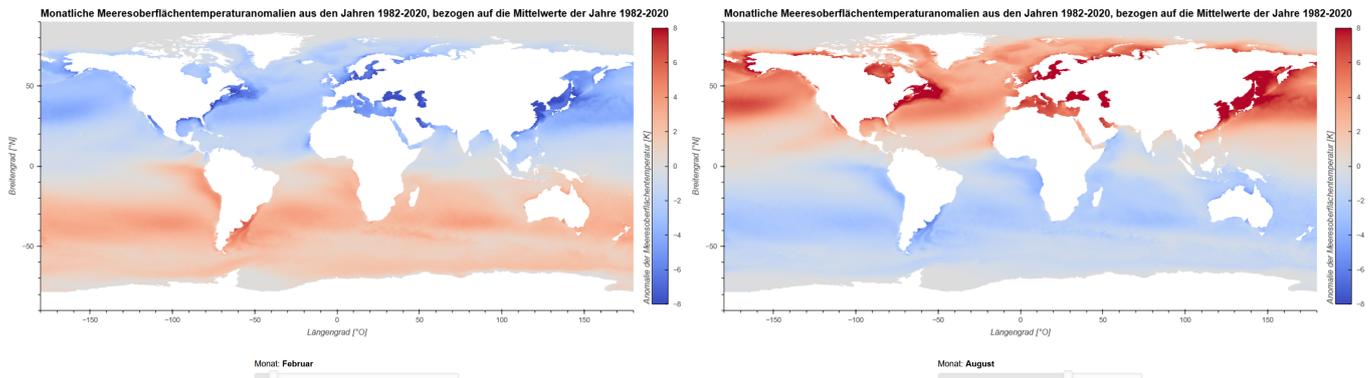


Abbildung 4: Anomalie der langjährigen Monatsmittelwerte der Meeresoberflächentemperaturen aus den Jahren 1982 bis 2020 für Februar (links) und August (rechts). Zur besseren Visualisierung wurde die Farbtabelle beschnitten. Datenherkunft: Copernicus Climate Change Service [C3S, 12, 13, 14, 15, 16]. Auswertung und Abbildung: S. Arndt [21].

Mit dem gleichen Verfahren kann man auch einzelne Jahresmittelwerte der SST mit dem langjährigen Mittel (Abbildung 2) vergleichen und erhält Abbildung 5. In dieser erkennt man nun sehr deutlich, wie sich die SST in den Jahren zwischen 1982 und 2020 geändert hat. In den ersten Jahren dominieren Temperaturen unterhalb des langjährigen Mittels (blau), während in den letzten Jahren Temperaturen oberhalb des langjährigen Mittels dominieren (rot). Aus diesen Daten lässt sich berechnen, dass die SST im Zeitraum von 1982 – 2020 im globalen Mittel um $0.013^{\circ}\text{C}/\text{Jahr}$ angestiegen ist. Wie man in Abbildung 5 sieht, gibt es jedoch regionale Unterschiede. Auf der nördlichen Hemisphäre ist der Anstieg im Mittel größer ($0.020^{\circ}\text{C}/\text{Jahr}$) als auf der südlichen ($0.008^{\circ}\text{C}/\text{Jahr}$). Besonders starke Anstiege findet man in den Binnenmeeren wie z.B. dem Mittelmeer ($0.037^{\circ}\text{C}/\text{Jahr}$) oder der Ostsee ($0.045^{\circ}\text{C}/\text{Jahr}$). Es gibt auch einige wenige Regionen mit leichten SST-Rückgängen, z.B. im Südpolarmeer ($-0.002^{\circ}\text{C}/\text{Jahr}$), die jedoch statistisch nicht signifikant sind. Der Anstieg der mittleren globalen Temperatur der bodennahen Luftschichten im Zeitraum 1979 – 2022 liegt übrigens mit $0.019^{\circ}\text{C}/\text{Jahr}$ etwas über dem der hier berechneten globalen SST [25]. Abbildung 6 zeigt den zeitlichen Verlauf der SST-Anomalie für verschiedene Regionen. Auch in dieser Abbildung ist zu erkennen, dass die Temperaturanstiege regionale Unterschiede aufweisen und dass es von Jahr zu Jahr Schwankungen gibt, die jedoch von einem generellen Anstieg überlagert sind.

Wie verändert sich die Meeresoberflächentemperatur aufgrund des Klimawandels?

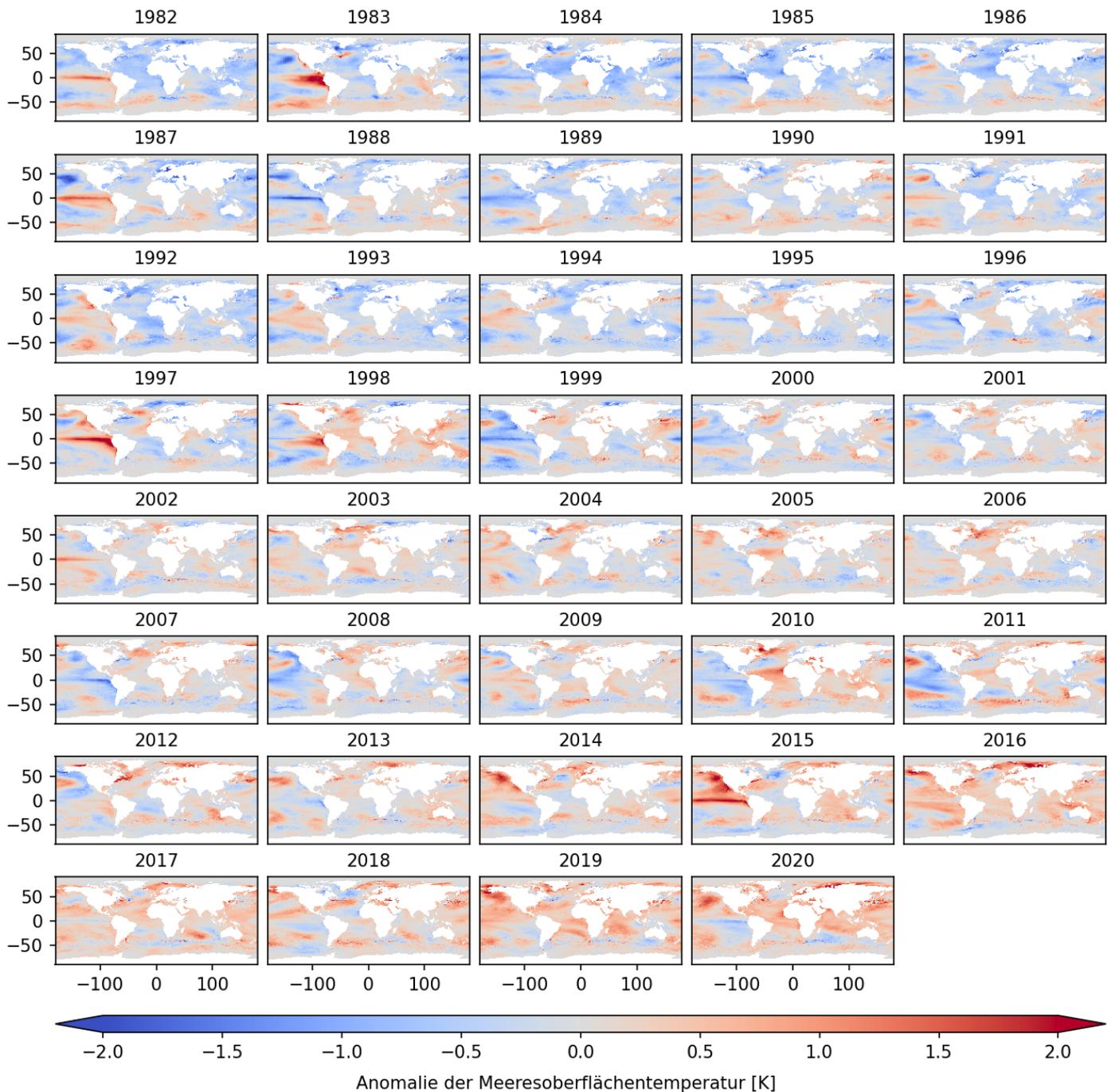


Abbildung 5: Anomalie der Jahresmittelwerte der Meeresoberflächentemperaturen der Jahre 1982 bis 2020. Zur besseren Visualisierung wurde die Farbtabelle beschnitten. Datenherkunft: Copernicus Climate Change Service [C3S, 12, 13, 14, 15, 16]. Auswertung und Abbildung: S. Arndt [21].

Wie verändert sich die Meeresoberflächentemperatur aufgrund des Klimawandels?

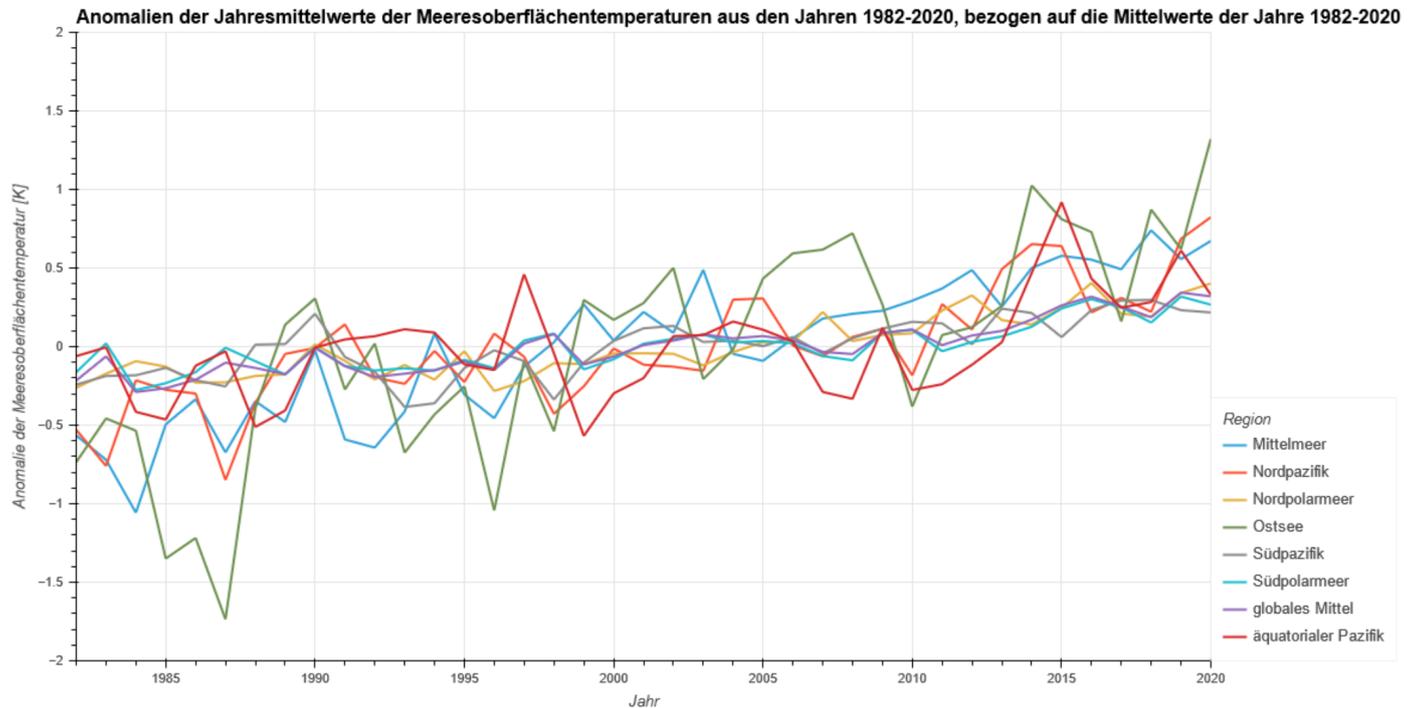


Abbildung 6: Anomalie der Jahresmittelwerte der Meeresoberflächentemperaturen der Jahre 1982 bis 2020 für verschiedene Regionen. Datenherkunft: Copernicus Climate Change Service [C3S, 12, 13, 14, 15, 16]. Auswertung und Abbildung: S. Arndt [21].

Abbildung 5 zeigt auch, dass es regional und von Jahr zu Jahr große Unterschiede gibt. Neben dem generellen Anstieg der SST kann man so z.B. auch Phänomene wie El Niño oder La Niña beobachten [26]. Es handelt sich dabei um unregelmäßig wiederkehrende Erwärmungen (El Niño) oder Abkühlungen (La Niña) der SST im tropischen östlichen Pazifik die mit Störungen der normalen Meeresströmungen und Wettermuster einhergehen und das globale Klima beeinflussen. Am meisten sind jedoch die an den Pazifik angrenzenden Ländern von Südamerika und Süd-Ost Asien betroffen, in denen es z.B. zu Dürren, Überschwemmungen und Auswirkungen auf die Fischerei kommen kann. Als Beispiel für ein ausgeprägtes El Niño Ereignis zeigt Abbildung 7 die Anomalie der Meeresoberflächentemperaturen des Jahres 1997 im tropischen östlichen Pazifik. In wie weit sich Phänomene wie El Niño oder La Niña und die damit einhergehenden meteorologischen Bedingungen im Rahmen des Klimawandels verändern werden ist noch nicht vollständig erforscht.

Wie verändert sich die Meeresoberflächentemperatur aufgrund des Klimawandels?

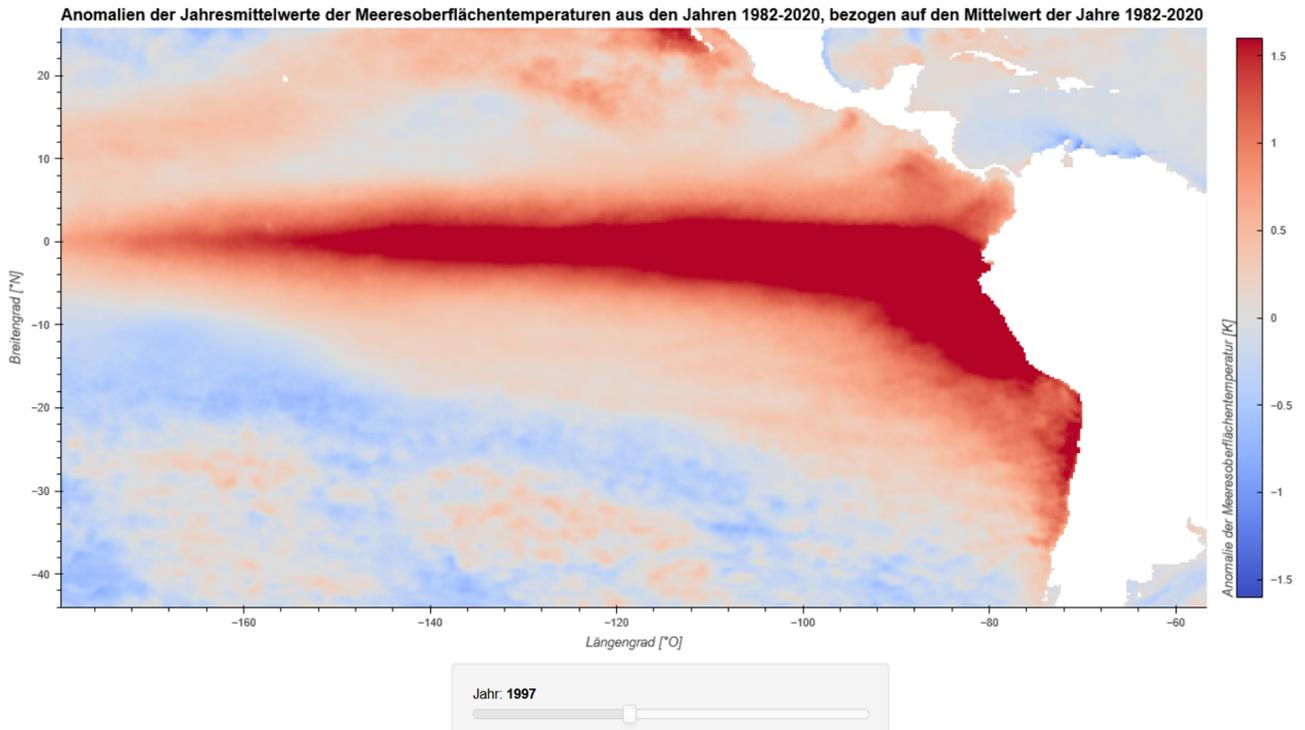


Abbildung 7: Anomalie der Meeresoberflächentemperaturen des Jahres 1997 im tropischen östlichen Pazifik mit ausgeprägtem El Niño. Zur besseren Visualisierung wurde die Farbtabelle beschnitten. Datenherkunft: Copernicus Climate Change Service [C3S, 12, 13, 14, 15, 16]. Auswertung und Abbildung: S. Arndt [21].

Weiterführende Informationen

Die Verfahren mit denen der hier verwendeten SST-Datensatz aus den Strahlungsmessungen der Satelliteninstrumente bestimmt wurde sind komplex und werden im Detail im *Algorithm Theoretical Basis Document* und der wissenschaftlichen Literatur beschrieben [15, 16]. Der theoretische Hintergrund dieser Verfahren lässt sich jedoch mit dem Planck'sche Strahlungsgesetz [27] skizzieren, welches als Näherung für die vom Ozean abgegebene Wärmestrahlung benutzt werden kann

$$2 \quad B = \frac{2 h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{h c / (\lambda k T)} - 1} \cdot$$

Hier ist $h = 6,626070040 \cdot 10^{34} \text{ J s}$ das Planck'sche Wirkungsquantum, $c = 2,99792458 \cdot 10^{10} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ die Lichtgeschwindigkeit, $k = 1,380649 \cdot 10^{23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$ die Boltzmann-Konstante, λ die Wellenlänge in m des emittierten Lichts und T die Temperatur in K .

Löst man diese Gleichung nach der Temperatur T auf erhält man:

$$3 \quad T = \frac{h c}{\lambda k} \frac{1}{\ln(2 h c^2 / (\lambda k B) + 1)} \cdot$$

Setzt man in diese Gleichung für B die vom Satelliten im atmosphärischen Fenster bei der Wellenlänge λ gemessene Strahlung ein, erhält man eine erste Näherung für die SST. Die letztendlich verwendeten Verfahren sind komplexer und analysieren z.B. die abgegebene Strahlung bei unterschiedlichen Wellenlängen, da sie unter Anderem den Einfluss der Atmosphäre korrigieren müssen, um die hohen Genauigkeitsanforderungen zu erfüllen.

Material

Für die Erarbeitung der Lernziele stehen den SuS mehrere interaktive browserbasierte Grafiken zur Verfügung die es ihnen ermöglichen Schritt für Schritt verschiedene Aspekte in dem verwendeten SST-Datensatz sichtbar zu machen und quantitativ zu untersuchen. Einige der Grafiken sind relativ groß so dass es sein kann, dass der Browser etwas länger für den Download und die Darstellung benötigt.

Langjährige Mittelwerte

Abbildung 8 ist eine Beispielsicht der interaktiven Browsergrafik zur Anzeige der langjährigen (1982 – 2020) Mittelwerte der SST. Die Grafik basiert auf Daten in einer regulären Plate-Carrée-Projektion [20] mit einer Auflösung von $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, d.h. entlang der Breitenkreise gibt es 1440 Bildpunkte und entlang der Längengrade 720. Rechts neben der Farbtabelle befinden sich Schalter um verschiedene Tools zu aktivieren oder zu deaktivieren. Diese lassen es zu, innerhalb der Grafik zu Zoomen und den Ausschnitt zu verschieben. Außerdem können mit Hilfe des *Hovertools* einzelne Werte exakt abgelesen werden. Die Grafik ist etwa 5MB groß. Anhand dieser Grafik können die SuS die großskaligen Muster der SST kennenlernen und sich mit der Steuerung der interaktiven Grafik vertraut machen.

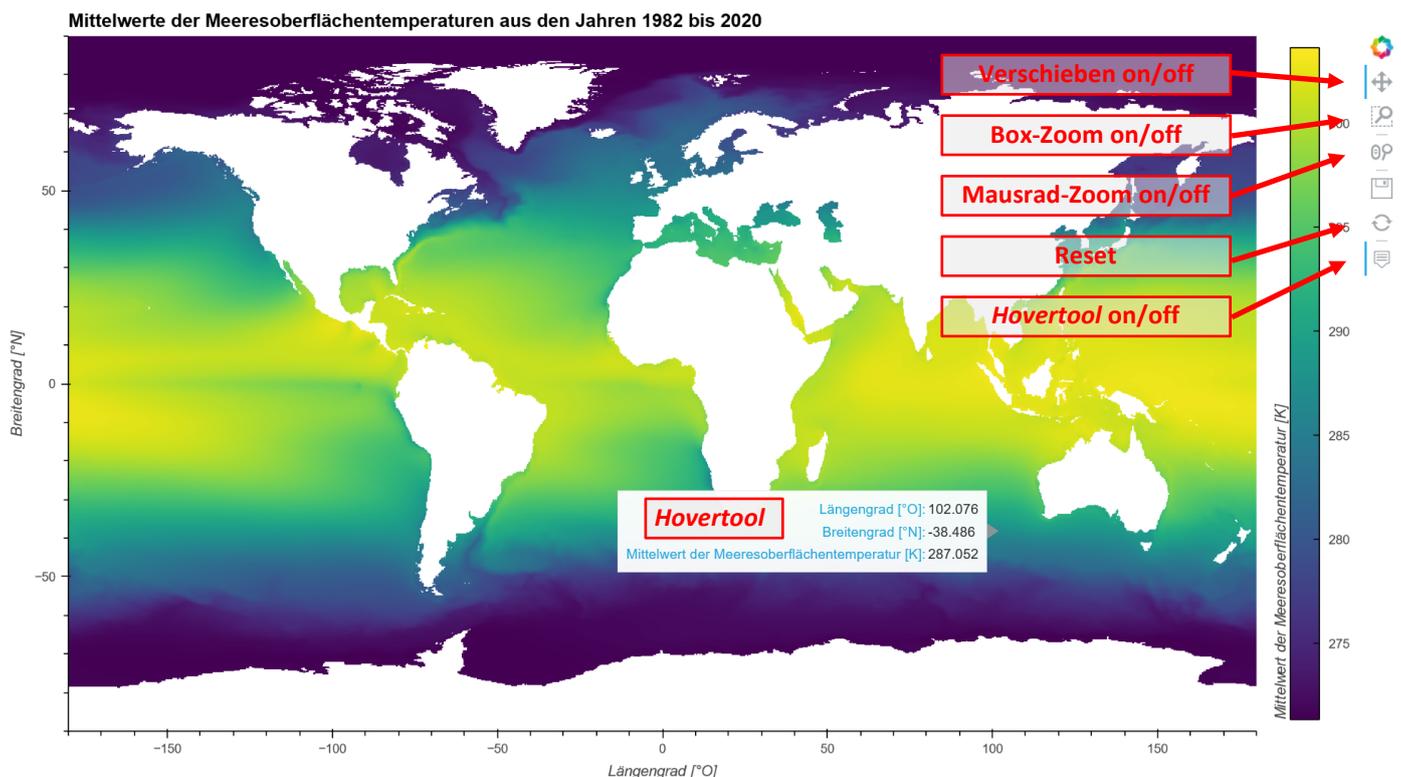


Abbildung 8: Beispielsicht der interaktiven Browsergrafik zur Anzeige der langjährigen Mittelwerte der SST. Datenherkunft: Copernicus Climate Change Service [C3S, 12, 13, 14, 15, 16]. Auswertung und Abbildung: S. Arndt [21].

Wie verändert sich die Meeresoberflächentemperatur aufgrund des Klimawandels?

Klimatologische Monatsmittelwerte

Abbildung 9 ist eine Beispielsicht der interaktiven Browsergrafik zur Anzeige der klimatologischen Monatsmittelwerte der SST. Die Abbildung enthält dieselben Steuerelemente wie Abbildung 8, darüber hinaus kann jedoch noch der anzuzeigende Monat ausgewählt werden. Dies ermöglicht den SuS klimatologische Jahresgänge an verschiedenen Orten zu untersuchen. Außerdem wird deutlich, dass die jahreszeitlichen Änderungen kleiner sind als die räumlichen Unterschiede und Änderungen aufgrund des Klimawandels mit dieser Art der Darstellung nicht mehr sichtbar wären. Die Grafik ist etwa 70MB groß.

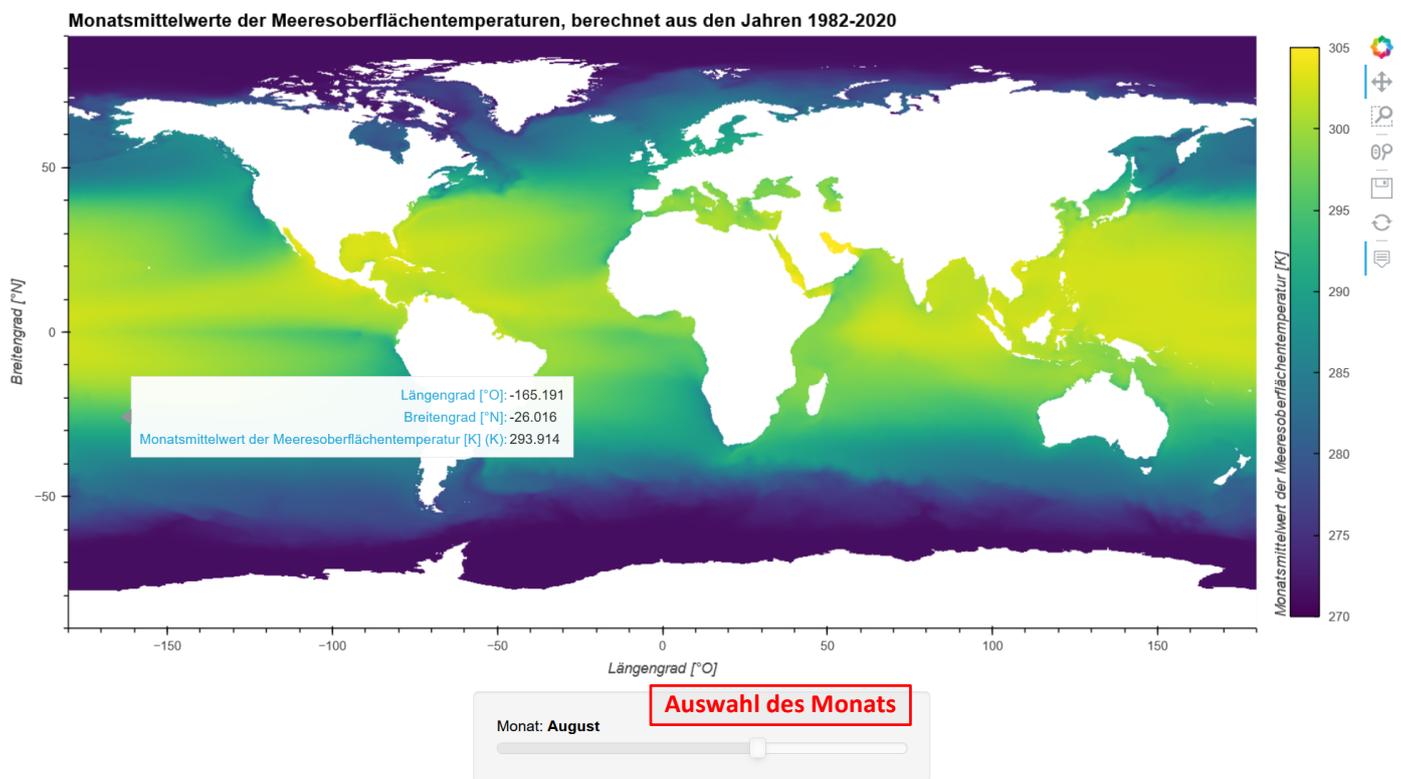


Abbildung 9: Beispielsicht der interaktiven Browsergrafik zur Anzeige der klimatologischen Monatsmittelwerte der SST. Datenherkunft: Copernicus Climate Change Service [C3S, 12, 13, 14, 15, 16]. Auswertung und Abbildung: S. Arndt [21].

Wie verändert sich die Meeresoberflächentemperatur aufgrund des Klimawandels?

Anomalien der klimatologischen Monatsmittelwerte

Abbildung 10 ist eine Beispielansicht der interaktiven Browsergrafik zur Anzeige der Anomalie der klimatologischen Monatsmittelwerte der SST. Hier wurde von den klimatologischen Monatsmittelwerten der SST (Abbildung 9) der langjährige Mittelwert (Abbildung 8) abgezogen um die Anomalie zu bilden. Dies macht die Jahreszeitlichen Änderungen viel deutlicher und ist auch ein geeignetes Mittel um Änderungen aufgrund des Klimawandels sichtbar zu machen. Genau wie die Browsergrafik zur Anzeige der klimatologischen Monatsmittelwerte (Abbildung 9) enthält auch diese Browsergrafik ein Steuerelement zur Auswahl des anzuzeigenden Monats. Die Grafik ist etwa 70MB groß.

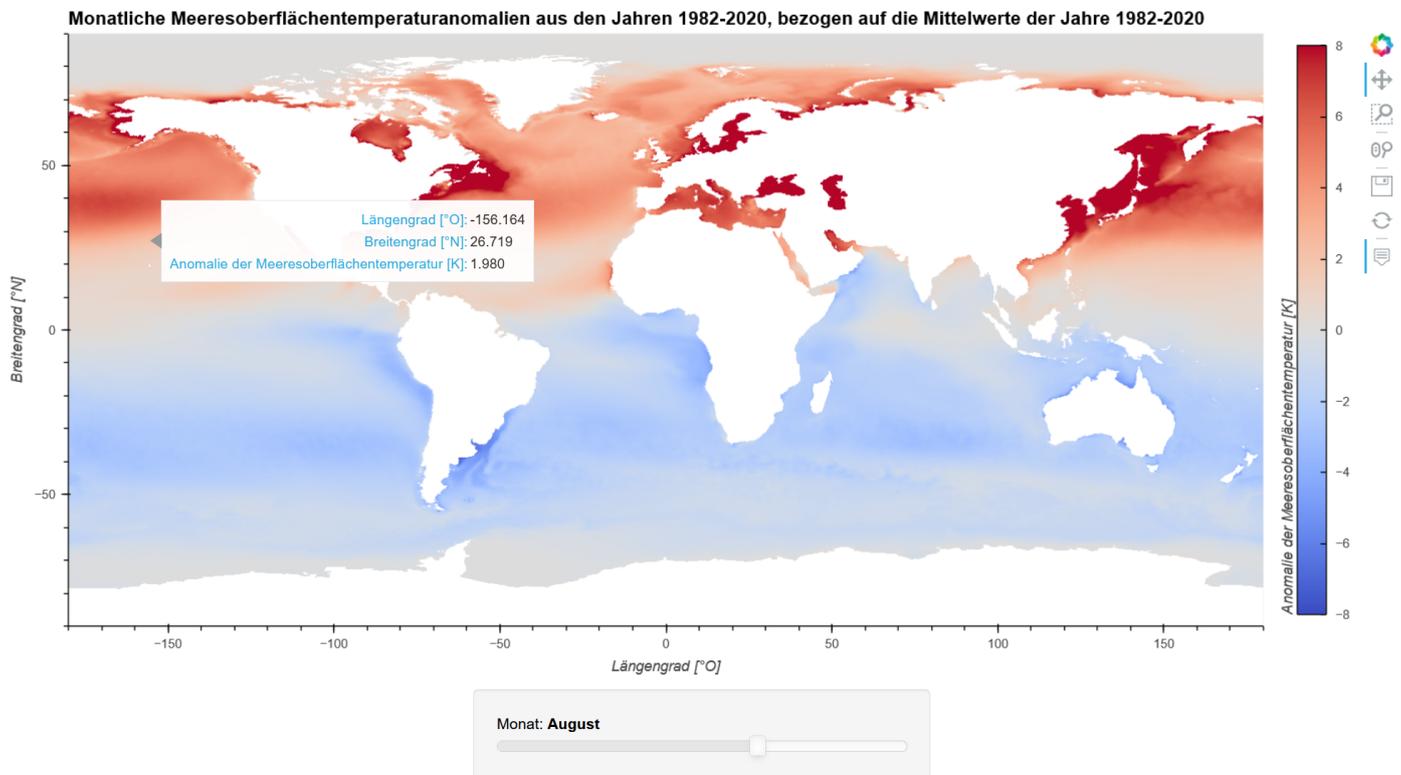


Abbildung 10: Beispielansicht der interaktiven Browsergrafik zur Anzeige der Anomalie der klimatologischen Monatsmittelwerte der SST. Datenherkunft: Copernicus Climate Change Service [C3S, 12, 13, 14, 15, 16]. Auswertung und Abbildung: S. Arndt [21].

Wie verändert sich die Meeresoberflächentemperatur aufgrund des Klimawandels?

Anomalien der Jahresmittelwerte

Abbildung 11 ist eine Beispielansicht der interaktiven Browsergrafik zur Anzeige der Anomalie der Jahresmittelwerte der SST. Hier wurde von den einzelnen Jahresmittelwerten der SST der langjährige Mittelwert (Abbildung 8) abgezogen, um die Anomalie zu bilden. Die Abbildung enthält dieselben Steuerelemente wie Abbildung 8, darüber hinaus kann jedoch noch das anzuzeigende Jahr ausgewählt werden. Die Abbildung zeigt unter Anderem den Einfluss des Klimawandels auf die SST. Man erkennt z.B. das in den ersten Jahren vorwiegend negative und in den letzten Jahren vorwiegend positive Temperatur-Anomalien vorherrschen. Darüber hinaus kann man erkennen, dass es von Jahr zu Jahr teilweise große regionale Unterschiede gibt, die z.B. aufgrund von Phänomenen wie El Niño oder La Niña entstehen. Die Grafik ist etwa 216MB groß.

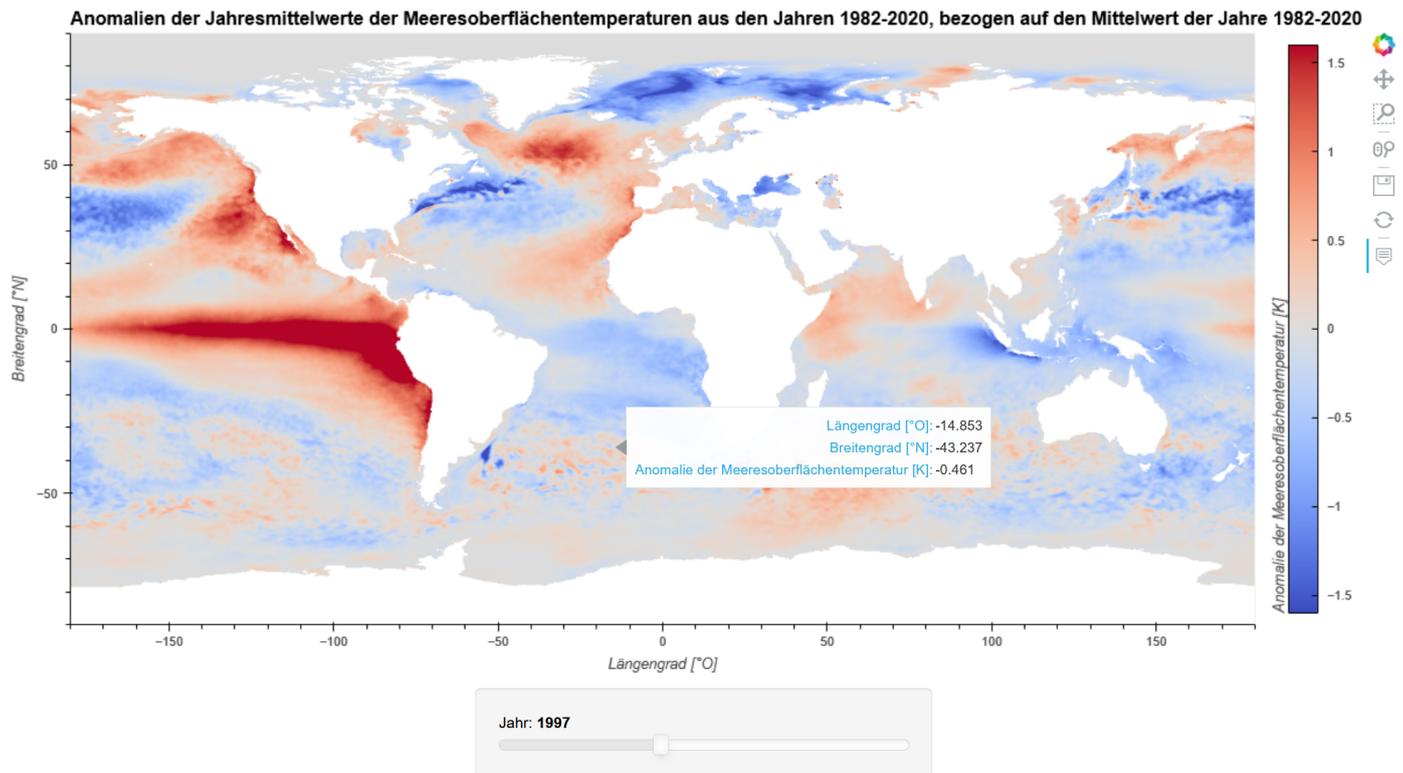


Abbildung 11: Beispielansicht der interaktiven Browsergrafik zur Anzeige der Anomalie der klimatologischen Monatsmittelwerte der SST. Datenherkunft: Copernicus Climate Change Service [C3S, 12, 13, 14, 15, 16]. Auswertung und Abbildung: S. Arndt [21].



Wie verändert sich die Meeresoberflächentemperatur aufgrund des Klimawandels?

Zeitreihen

Abbildung 6 ist eine Beispielansicht der interaktiven Browsergrafik zur Anzeige von Zeitreihen der Anomalien der Jahresmittelwerte für acht verschiedene Regionen (Mittelmeer, Nordpazifik, Nordpolarmeer, Ostsee, Südpazifik, Südpolarmeer, globales Mittel, äquatorialer Pazifik). Durch Klicken auf die Namen der Regionen in der Legende lassen sich die entsprechenden Kurven ein- und ausblenden. Aus Zeitreihen wie diesen lassen sich regionale Trends des Anstiegs der SST berechnen.

Referenzen

- 1 Chen, D., M. Rojas, B. H. Samset, K. Cobb, A. Diongue Niang, P. Edwards, S. Emori, S. H. Faria, E. Hawkins, P. Hope, P. Huybrechts, M. Meinshausen, S. K. Mustafa, G. K. Plattner, A. M. Tréguier, 2021, Framing, Context, and Methods. 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.)]. In Press.
- 2 https://en.wikipedia.org/wiki/Sea_surface_temperature
- 3 <https://de.wikipedia.org/wiki/Meeresoberfl%C3%A4chentemperatur>
- 4 Arias, P. A., N. Bellouin, E. Coppola, R. G. Jones, G. Krinner, J. Marotzke, V. Naik, M. D. Palmer, G-K. Plattner, J. Rogelj, M. Rojas, J. Sillmann, T. Storelvmo, P. W. Thorne, B. Trewin, K. Achuta Rao, B. Adhikary, R. P. Allan, K. Armour, G. Bala, R. Barimalala, S. Berger, J. G. Canadell, C. Cassou, A. Cherchi, W. Collins, W. D. Collins, S. L. Connors, S. Corti, F. Cruz, F. J. Dentener, C. Dereczynski, A. Di Luca, A. Diongue Niang, F. J. Doblas-Reyes, A. Dosio, H. Douville, F. Engelbrecht, V. Eyring, E. Fischer, P. Forster, B. Fox-Kemper, J. S. Fuglestedt, J. C. Fyfe, N. P. Gillett, L. Goldfarb, I. Gorodetskaya, J. M. Gutierrez, R. Hamdi, E. Hawkins, H. T. Hewitt, P. Hope, A. S. Islam, C. Jones, D. S. Kaufman, R. E. Kopp, Y. Kosaka, J. Kossin, S. Krakovska, J-Y. Lee, J. Li, T. Mauritsen, T. K. Maycock, M. Meinshausen, S-K. Min, P. M. S. Monteiro, T. Ngo-Duc, F. Otto, I. Pinto, A. Pirani, K. Raghavan, R. Ranasinghe, A. C. Ruane, L. Ruiz, J-B. Sallée, B. H. Samset, S. Sathyendranath, S. I. Seneviratne, A. A. Sörensson, S. Szopa, I. Takayabu, A-M. Treguier, B. van den Hurk, R. Vautard, K. von Schuckmann, S. Zaehle, X. Zhang, K. Zickfeld, 2021, Technical Summary. 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. In Press
- 5 <https://climate.copernicus.eu/climate-indicators/sea-surface-temperature>
- 6 https://www.avl.class.noaa.gov/release/data_available/avhrr/index.htm
- 7 <https://de.wikipedia.org/wiki/AVHRR>
- 8 <https://www.noaa.gov>
- 9 https://de.wikipedia.org/wiki/National_Oceanic_and_Atmospheric_Administration



Wie verändert sich die Meeresoberflächentemperatur aufgrund des Klimawandels?

- 10 <https://www.eumetsat.int>
- 11 <https://de.wikipedia.org/wiki/EUMETSAT>
- 12 <https://climate.copernicus.eu>
- 13 Copernicus Climate Change Service (C3S) (2019): Sea surface temperature daily data from 1981 to present derived from satellite observations. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI: 10.24381/cds.cf608234
- 14 Good, S., Embury, O., Bulgin, C., und Mittaz, J. (2019). ESA Sea Surface Temperature Climate Change Initiative (SST_cci): Level 4 Analysis Climate Data Record, version 2.0. Centre for Environmental Data Analysis, 22 August 2019. doi: 10.5285/aced40d7cb964f23a0fd3e85772f2d48
- 15 https://climate.esa.int/media/documents/SST_cci_ATBD_UOR_v3.pdf
- 16 <https://www.nature.com/articles/s41597-019-0236-x>
- 17 <https://earth.esa.int/eogateway/instruments/atsr>
- 18 <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-slstr/overview>
- 19 <https://www.esa.int>
- 20 <https://de.wikipedia.org/wiki/Plattkarte>
- 21 https://www.iup.uni-bremen.de/carbon_ghg/BachelorThesis/Sebastian_Arndt_Bachelorarbeit.pdf
- 22 <https://de.wikipedia.org/wiki/Golfstrom>
- 23 [https://de.wikipedia.org/wiki/Auftrieb_\(Ozeanographie\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Auftrieb_(Ozeanographie))
- 24 <https://www.bmz.de/de/service/lexikon/klimaabkommen-von-paris-14602>
- 25 <https://climate.copernicus.eu/climate-indicators/temperature>
- 26 https://de.wikipedia.org/wiki/El_Ni%C3%B1o
- 27 https://de.wikipedia.org/wiki/Plancksches_Strahlungsgesetz