



# Wie verändert sich die Meeresoberflächentemperatur aufgrund des Klimawandels?

## Aufgaben und Musterlösungen

Die meisten der hier gestellten Aufgaben sind mit Hilfe der folgenden interaktiven Grafiken, die zum Thema Meeresoberflächentemperatur (SST) entwickelt wurden, zu bearbeiten.

Grafik Nr.1: Mittelwerte der Meeresoberflächentemperaturen aus den Jahren 1982 bis 2020

Grafik Nr.2: Monatsmittelwerte der Meeresoberflächentemperaturen berechnet aus den Jahren 1982-2020

Grafik Nr.3: Monatliche Meeresoberflächentemperaturanomalien aus den Jahren 1982-2020 bezogen auf die Mittelwerte der Jahre 1982-2020

Grafik Nr.4: Anomalien der Jahresmittelwerte der Meeresoberflächentemperaturen aus den Jahren 1982-2020 bezogen auf den Mittelwert der Jahre 1982-2020

Grafik Nr.5: Zeitreihen der Jahresmittelwerte der Meeresoberflächentemperaturanomalien aus den Jahren 1982-2020 bezogen auf den Mittelwert der Jahre 1982-2020

Nenne drei Gründe warum es wichtig ist die SST zu beobachten?

Mögliche Antworten: i) Die SST ist ein wichtiger Parameter zur Bestimmung der globalen mittleren Temperatur (mittlere bodennahe Lufttemperatur über Land und Ozean) und somit zur Beobachtung des Klimawandels. ii) Die SST hat großen Einfluss auf die Lufttemperatur und -feuchte und ist deshalb ein wesentlicher Parameter für Wettervorhersagen und atmosphärische Modellsimulationen. iii) Die SST ist für die Untersuchung von Meeresströmungen wichtig. iv) Die SST ist für die Untersuchung mariner Ökosysteme wichtig. v) Die SST ist wichtig um Phänomene des ozeanografisch-meteorologischen Systems wie *El Niño-Southern Oscillation* zu untersuchen.

**Anforderungsbereich:** I

**Lernziel:** Themenbereiche für die die Messungen der SST besonders wichtig sind.

Nenne drei Verfahren mit denen sich die SST bestimmen lässt.

Messungen der Temperatur des oberflächennahen Meerwassers von Schiffen, Bojen, oder Driftern mit Thermometern. Messung der von der Meeresoberfläche abgegebenen Infrarot- oder Mikrowellenstrahlung mit Satelliten.

**Anforderungsbereich:** I

**Lernziel:** Bekanntheit der verbreiteten Methoden zur Bestimmung der SST.



# Wie verändert sich die Meeresoberflächentemperatur aufgrund des Klimawandels?

Beschreibe auf welcher physikalischen Grundlage sich die SST vom Satelliten bestimmen lässt.

Die Meeresoberfläche emittiert Strahlung (Licht) insbesondere mit Wellenlängen im Infrarotbereich. Die abgegebene Strahlung kann näherungsweise mit dem Planck'schen Strahlungsgesetz beschrieben werden. Dieses besagt unter anderem, dass umso mehr Strahlung abgegeben wird, je höher die Temperatur ist. Satelliten, die die SST aus Infrarotmessungen bestimmen, haben Sensoren, die im sog. atmosphärischen Fenster bei  $11\mu\text{m} - 12\mu\text{m}$  sensitiv sind, da hier die Atmosphäre relativ transparent ist.

**Anforderungsbereich:** II

**Lernziel:** Grundlagen zur Bestimmung der SST vom Satelliten.

Beschreibe anhand der interaktiven Grafik Nr.1 die klimatologische SST. Beschreibe dabei insbesondere, in welchen Breiten sie am höchsten bzw. am niedrigsten ist und diskutiere, warum dies so ist. Berechne wie groß die breitenabhängigen Unterschiede typischerweise sind?

Die klimatologische SST ist geprägt durch eine starke Breitengradabhängigkeit mit höchsten Temperaturen in den Tropen und niedrigsten Temperaturen in hohen Breiten. Der Grund hierfür sind Unterschiede im Einfallswinkel mit dem die Sonnenstrahlung auf die Erdkugel trifft. Typischerweise ist die tropische SST etwa  $30^\circ\text{C}$  höher als die SST in der Nähe der Pole. Neben der Breitengradabhängigkeit kann man in der klimatologischen SST auch einige Meeresströmungen wie z.B. den Golfstrom und das Aufsteigen von kaltem Tiefenwasser erkennen.

**Anforderungsbereich:** II+III

**Lernziel:** Großräumige Eigenschaften der klimatologischen SST.

Beschreibe anhand der interaktiven Grafik Nr.2 wie sich die klimatologische SST im Jahresverlauf ändert. Beschreibe dabei insbesondere, in wie weit sich die unterschiedlichen Monate ähneln und wie das Band der höchsten SST im Jahresverlauf wandert? Diskutiere den Grund dafür.

Auf den ersten Blick ähneln die klimatologischen Monatsmittelwerte der SST stark dem klimatologischen Mittelwert (Grafik Nr.1). Das Breitengradband der höchsten SST folgt im Jahresverlauf etwas verzögert dem höchsten Sonnenstand. Bei genauerer Betrachtung kann man jahreszeitliche Variationen einzelner Gebiete erkennen. Die jahreszeitlichen Unterschiede sind jedoch kleiner als die breitengradabhängigen Unterschiede.

**Anforderungsbereich:** II+III

**Lernziel:** Jahreszeitliche Variationen der klimatologischen SST.



# Wie verändert sich die Meeresoberflächentemperatur aufgrund des Klimawandels?

Bestimme mit Hilfe der interaktiven Grafik Nr.2 den jährlichen Maximal- und Minimalwert der SST in der Nähe der Azoren. Nenne die geografische Länge und Breite, die Du dafür verwendet hast. Diskutiere, warum die monatlichen Karten der SST große Ähnlichkeiten haben? Nenne eine Methode mit der sich die Jahreszeitlichen Unterschiede besser sichtbar machen lassen?

Länge:  $-28,1^{\circ}\text{O}$ . Breite:  $38,1^{\circ}\text{N}$ . Maximum:  $296,523^{\circ}\text{C}$  (August). Minimum:  $289,147^{\circ}\text{C}$  (März). Die Karten sehen für alle Monate ähnlich aus, da die Jahreszeitlichen Variationen deutlich kleiner sind, als die Breitengradabhängigen Unterschiede. Die jahreszeitlichen Unterschiede werden deutlicher, wenn man die Anomalie zum langjährigen Mittel bildet.

**Anforderungsbereich:** I+II+III

**Lernziel:** Jahreszeitliche Variationen der klimatologischen SST. Sichtbarmachen von kleinen Unterschieden durch Berechnen der Anomalie.

Erkläre, wie die Anomalie der SST, die in der interaktiven Grafik Nr.3 gezeigt wird, aus den Daten von Grafik Nr.2 und Grafik Nr.1 bestimmt werden kann. Diskutiere welche Vor- und Nachteile es hat die Anomalie der Monatesmittelwerte anstelle der Monatsmittelwerte selbst zu zeigen. Berechne mit Hilfe von Grafik Nr.3 und Grafik Nr.1 die klimatologische SST im November in der Nähe von Hawaii (Länge:  $-156,6^{\circ}\text{O}$ ; Breite:  $20,2^{\circ}\text{N}$ ) und überprüfe das Ergebnis mit Hilfe von Grafik Nr.2.

Für jeden Bildpunkt wird die monatliche Anomalie der SST aus der Differenz von der monatlichen SST und der mittleren SST bestimmt (Grafik Nr.3 = Grafik Nr.2 - Grafik Nr.1). Vorteil: In der Anomalie werden kleine Abweichungen vom Mittelwert sichtbar, da die dominierende Breitengradabhängigkeit entfernt wird und es so möglich ist eine Farbskala mit einem kleineren Wertebereich zu verwenden. Nachteil: Die Anomalie zeigt nur die Differenz zum Mittelwert. Klimatologische November SST nahe Hawaii:

$298,734^{\circ}\text{C}$  (Grafik Nr.1) +  $0,619^{\circ}\text{C}$  (Grafik Nr.3) =  $299,353^{\circ}\text{C}$  (Grafik Nr.2)

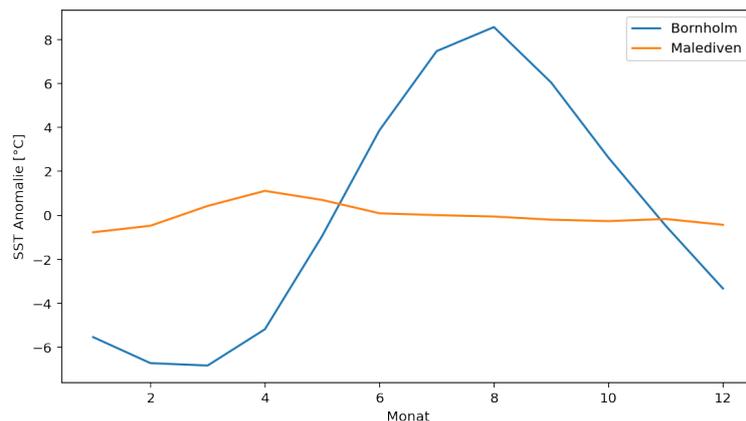
**Anforderungsbereich:** II+III

**Lernziel:** Berechnen von Anomalien.

# Wie verändert sich die Meeresoberflächentemperatur aufgrund des Klimawandels?

Bestimme anhand der in Grafik Nr.3 gezeigten Monatsanomalien der SST in welchen Regionen es besonders große und besonders kleine jahreszeitliche Schwankungen der SST gibt. Diskutiere mögliche Gründe. Zeichne den klimatologischen Jahresgang der SST-Anomalie nahe Bornholm und nahe der Malediven und nenne die dafür verwendeten Längen- und Breitengrade.

Besonders große jahreszeitliche Schwankungen gibt es in mittleren Breiten insbesondere in der Nähe vieler Küsten und in den Binnenmeeren. Besonders kleine jahreszeitliche Schwankungen gibt es z.B. in den Tropen und in sehr hohen Breiten insbesondere auf offenem Ozean. Gründe: Die jahreszeitliche Variation der Sonneneinstrahlung ist in mittleren Breiten am größten. Eine geringere Wassertiefe und weniger großräumige Zirkulation führt dazu, dass die Ozeanoberfläche besser erwärmt bzw. abgekühlt werden kann. Verwendete Längen- und Breitengrade: Bornholm (14,3°O; 55,1°N), Malediven (73,6°O; 3,2°N). Die folgende Abbildung wurde mit Python in der online verfügbaren Jupyter-Notebook-Umgebung <https://cocalc.com/features/jupyter-notebook> mit dem unter der Abbildung gelisteten Code erzeugt. Dieser enthält auch die aus Grafik Nr.3 entnommenen Daten.



```
# import benötigter module
from matplotlib import pyplot as plt
# daten aus grafik nr. 3
Monat = [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]
ssta_born = [-5.541, -6.724, -6.833, -5.183, -0.938, 3.867, 7.471, 8.564, 6.040, 2.625, -0.475, -3.331]
ssta_male = [-0.771, -0.475, 0.427, 1.113, 0.699, 0.093, 0.009, -0.054, -0.199, -0.263, -0.167, -0.430]
# erstellen des plots
fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 5))
ax.plot(monat, ssta_born, label='Bornholm')
ax.plot(monat, ssta_male, label='Malediven')
ax.set_xlabel('Monat')
ax.set_ylabel('SST Anomalie [°C]')
ax.legend()
plt.show()
```

**Anforderungsbereich:** II+III

**Lernziel:** Verständnis von jahreszeitlichen Schwankungen der SST. Recherche von Längen- und Breitengraden. Erzeugung einfacher Grafiken.



## Wie verändert sich die Meeresoberflächentemperatur aufgrund des Klimawandels?

---

Erkläre worin sich der Klimawandel in der interaktiven Grafik der Jahresanomalien der SST (Grafik Nr.4) bemerkbar macht? Schätze anhand der Karte in welcher Größenordnung sich die globale SST pro Dekade ändert. Beschreibe einige regionale Unterschiede. Vergleiche die Größe von Schwankungen die von einem Jahr zum nächsten auftreten mit dem langjährigen Anstieg?

Aufgrund des Klimawandels gibt es einen Trend zu höheren SST-Werten. Dieser macht sich durch vorwiegend negative Anomalien der SST (blaue Flächen) in den ersten Jahren ab 1982 und vorwiegend positive Anomalien der SST (rote Flächen) in den letzten Jahren bis 2020 bemerkbar. Der Trend ist jedoch überlagert durch regionale und zeitliche Schwankungen. Geschätzter Trend:  $0,05^{\circ}\text{C}/\text{Dekade}$  -  $0,25^{\circ}\text{C}/\text{Dekade}$  (tatsächlich sind es  $0,13^{\circ}\text{C}/\text{Dekade}$ ). Die jährlichen Schwankungen können regional  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  (vereinzelt auch größere Werte) erreichen und sind insofern deutlich größer als der mittlere Anstieg pro Dekade.

**Anforderungsbereich:** II+III

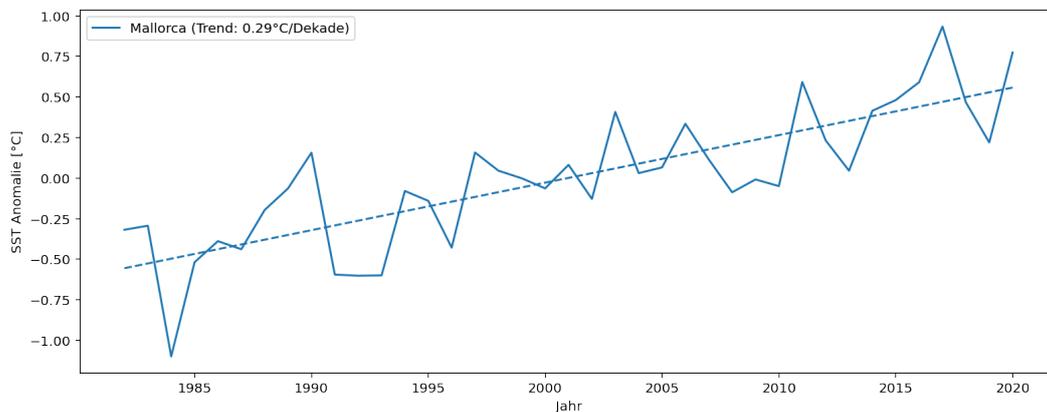
**Lernziel:** Langjähriger Trend der SST aufgrund des Klimawandels.

# Wie verändert sich die Meeresoberflächentemperatur aufgrund des Klimawandels?

Bestimme mit Hilfe von Grafik Nr.4 die SST-Anomalie für die Position 3,2°O (Länge), 39,8°N (Breite) vor der Küste von Mallorca für alle Jahre von 1982-2020 und zeichne eine Grafik aus den Daten. Berechne mit Hilfe einer linearen Regression den mittleren Anstieg pro Dekade. Vergleiche das mit dem Trend von 0.37°C pro Dekade, der sich aus Grafik Nr.5 für das Mittelmeer ergibt. Diskutiere, wie es zu dem Unterschied kommen kann?

Der Anstieg beträgt 0.29°C/Dekade. Dies ist etwas weniger als der Anstieg von 0.37°C/Dekade, der für das ganze Mittelmeer beobachtet wird. Innerhalb des Mittelmeers gibt es regionale Unterschiede im Trend, die dazu führen können, dass der Trend an einzelnen Stelle vom mittleren Trend abweicht. Die regionalen Unterschiede können real sein, jedoch auch an Ungenauigkeiten der Messungen liegen.

Die folgende Abbildung wurde mit Python in der online verfügbaren Jupyter-Notebook-Umgebung <https://cocalc.com/features/jupyter-notebook> mit dem unter der Abbildung gelisteten Code erzeugt. Dieser enthält auch die aus Grafik Nr.4 entnommenen Daten.



```
# import benötigter module
from matplotlib import pyplot as plt
import numpy as np
from scipy.stats import linregress
# daten aus grafik nr. 4
jahr=np.arange(1982, 2021)
ssta_mal = [-0.318, -0.293, -1.098, -0.518, -0.388, -0.438, -0.196, -0.063, 0.157, -0.594, -0.601, -0.599, -0.079, -0.140, -0.428,
0.158, 0.046, -0.001, -0.063, 0.082, -0.128, 0.408, 0.031, 0.066, 0.335, 0.115, -0.087, -0.008, -0.049, 0.592, 0.233, 0.046, 0.415,
0.481, 0.591, 0.934, 0.467, 0.220, 0.774]
# berechnung des trends mit hilfe linearer regression
a_mal, b_mal, _, _, _ = linregress(jahr, ssta_mal)
# erstellen des plots
fig, ax = plt.subplots(figsize=(13, 5))
col_mal = next(plt.gca()._get_lines.prop_cycler)['color']
plt.plot(jahr, ssta_mal, color=col_mal, label=f'Mallorca (Trend: {10*a_mal:0.2f}°C/Dekade)')
plt.plot(jahr, a_mal*jahr + b_mal, color=col_mal, linestyle='--')
ax.set_xlabel('Jahr')
ax.set_ylabel('SST Anomalie [°C]')
ax.legend()
plt.show()
```

## Anforderungsbereich: II+III

**Lernziel:** Langjähriger Trend der SST aufgrund des Klimawandels. Illustration einer Zeitreihe von Daten. Lineare Regression.



## Wie verändert sich die Meeresoberflächentemperatur aufgrund des Klimawandels?

---

Die interaktive Grafik Nr.5 zeigt die für verschiedene Regionen gemittelten Anomalien der SST für die Jahre 1982-2020. Schätze den globalen SST-Anstieg pro Dekade. Nenne eine Region, die einen kleineren Anstieg hat. Nenne zwei Regionen mit einem besonders großen Anstieg. Diskutiere, wie es zu regionalen Unterschieden kommen kann.

Geschätzter Trend:  $0,11^{\circ}\text{C}/\text{Dekade}$  -  $0,16^{\circ}\text{C}/\text{Dekade}$  (tatsächlich sind es  $0,13^{\circ}\text{C}/\text{Dekade}$ ). Kleinerer Anstieg im Südpolarmeer. Besonders große Anstiege im Mittelmeer und der Ostsee. Regionale Unterschiede können z.B. durch Unterschiede in der Sonneneinstrahlung entstehen, außerdem kann die Tiefe des Gewässers und die Anbindung an großräumige Ozeanströmungen zu Unterschieden führen.

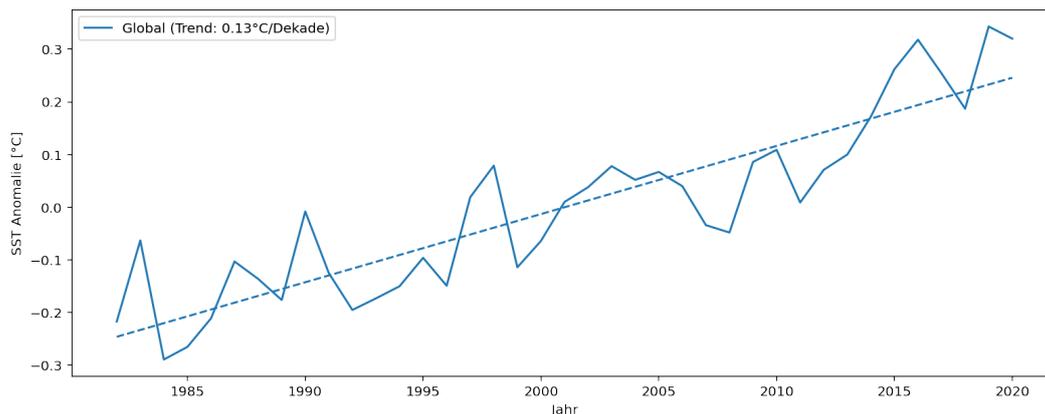
**Anforderungsbereich:** I+II+III

**Lernziel:** Regionale Unterschiede des SST Anstiegs.

# Wie verändert sich die Meeresoberflächen-temperatur aufgrund des Klimawandels?

Die interaktive Grafik Nr.5 zeigt die für verschiedene Regionen gemittelten Anomalien der SST für die Jahre 1982-2020. Bestimme für alle Jahre von 1982-2020 die globale SST Anomalie und zeichne eine Grafik aus den Daten. Berechne mit Hilfe einer linearen Regression den mittleren globalen SST-Anstieg pro Dekade. Diskutiere warum man eine lange Zeitreihe benötigt um den Anstieg zuverlässig schätzen zu können. Vergleiche den berechneten SST-Anstieg mit dem Anstieg der globalen Oberflächentemperatur (Land und Ozean) von  $0.19^{\circ}\text{C}$  pro Dekade und diskutiere, was man daraus für den Anstieg der Landoberflächentemperatur folgern kann?

Der globale SST-Anstieg beträgt  $0.13^{\circ}\text{C}/\text{Dekade}$ . Da die jährlichen Schwankungen im Vergleich zum jährlichen Anstieg groß sind benötigt man eine lange Zeitreihe um den Anstieg zuverlässig schätzen zu können. Der SST-Anstieg ist  $0.06^{\circ}\text{C}/\text{Dekade}$  kleiner als der Anstieg der globalen Oberflächentemperatur. Daraus folgt, dass die Landoberflächentemperatur schneller ansteigt als die SST. Die folgende Abbildung wurde mit Python in der online verfügbaren Jupyter-Notebook-Umgebung <https://cocalc.com/features/jupyter-notebook> mit dem unter der Abbildung gelisteten Code erzeugt. Dieser enthält auch die aus Grafik Nr.5 entnommenen Daten.



```
# import benötigter module
from matplotlib import pyplot as plt
import numpy as np
from scipy.stats import linregress
# daten aus grafik nr.5
jahr=np.arange(1982, 2021)
ssta_glo = [-0.217, -0.063, -0.289, -0.265, -0.211, -0.103, -0.136, -0.176, -0.008, -0.125, -0.195, -0.173, -0.150, -0.096, -0.149,
0.019, 0.079, -0.114, -0.064, 0.010, 0.038, 0.078, 0.052, 0.067, 0.040, -0.034, -0.048, 0.086, 0.109, 0.009, 0.071, 0.100, 0.172,
0.262, 0.318, 0.254, 0.187, 0.343, 0.320]
# berechnung des trends mit hilfe linearer regression
a_glo, b_glo, _, _, _ = linregress(jahr, ssta_glo)
# erstellen des plots
fig, ax = plt.subplots(figsize=(13, 5))
col_glo = next(plt.gca()._get_lines.prop_cycler)['color']
plt.plot(jahr, ssta_glo, color=col_glo, label=f'Global (Trend: {10*a_glo:0.2f}°C/Dekade)')
plt.plot(jahr, a_glo* jahr + b_glo, color=col_glo, linestyle='--')
ax.set_xlabel('Jahr')
ax.set_ylabel('SST Anomalie [°C]')
ax.legend()
plt.show()
```