

Das Wasser steigt

Dr. Markus Nielbock



Abbildung 1: Malé, die Hauptstadt der Malediven, hat über 120 000 Einwohner und befindet sich nur 1 Meter über dem Meeresspiegel (Shahee Ilyas, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Male-total.jpg>, „Male-total“, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode>).

Altersspanne

12 – 16 Jahre

Materialien

- Transparente Schüssel (Glas oder Kunststoff)
- Rundkolben (250 ml, Enghals)
- Gummistopfen (\varnothing 29 bis 35 mm) mit Bohrung (\varnothing 7 mm)
- Etwas Glyzerin als Schmiermittel
- Glasrohr mit kleinem Durchmesser (8 mm, Länge: 250 mm)
- Helle Lampe oder Strahler
- Wasser
- Thermometer
- Wasserlöslicher Filzstift

Stichworte

Meeresspiegel, Klimawandel, globale Erwärmung, thermische Ausdehnung, Radaraltimetrie, Copernicus, Fernerkundung, Wasser, Thermometer

Zusammenfassung

Der Klimawandel ist eine der größten Herausforderungen der Menschheit. Mit ihm einher geht eine ständige Zunahme der mittleren, globalen Temperaturen – sowohl der Luft als auch der Ozeane. Neben dem Abschmelzen der Landeismassen führt alleine die Ausdehnung des Wassers unter seiner Erwärmung zu einem merklichen Anstieg der Meeresspiegel. In diesem Arbeitsblatt erkunden die Schülerinnen und Schüler durch eigene, unmittelbare Erfahrung in Experimenten und durch elementare Rechnungen diesen Beitrag zum globalen Anstieg der Meere.

1 Aktivität 1: Wo ist die Wärme hin?

1.1 Materialien

- Transparente Schüssel (Glas oder Kunststoff)
- Helle Lampe oder Strahler
- Wasser

1.2 Versuchsaufbau

Fülle den Behälter zur Hälfte mit Wasser. Positioniere die Lampe so, dass sie den gesamten Behälter durch die kleinen Seiten durchleuchtet. Der Strahl sollte zur Hälfte über den Wasserspiegel hinweg leuchten (Abbildung 2).

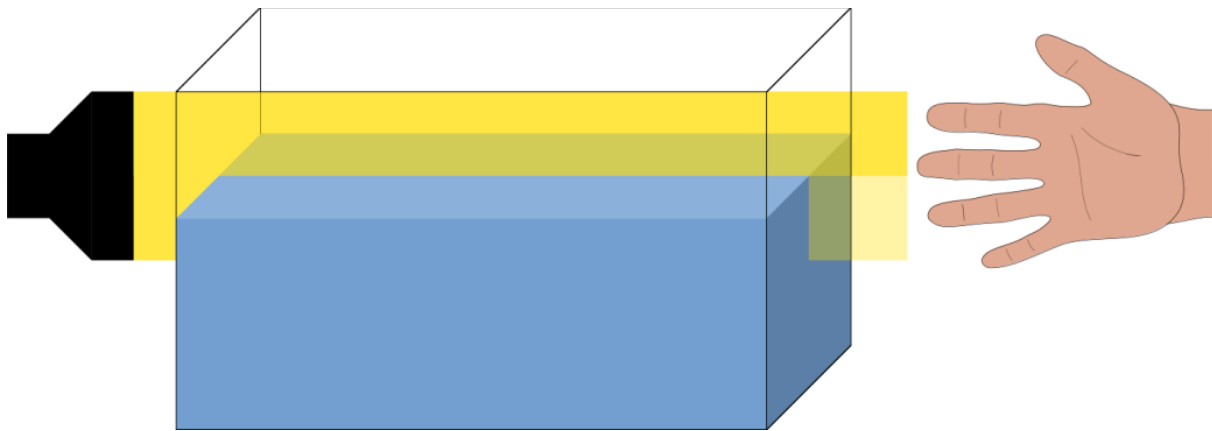


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus (M. Nielbock).

1.3 Fragen

Bevor du die Lampe einschaltest, überlege was du sehen und spüren wirst.

Wenn du deine Hand auf die der Lampe gegenüberliegenden Seite hältst, wirst du einen Unterschied oberhalb und unterhalb des Wasserspiegels spüren?

Ja, oberhalb des Wasserspiegels wird der Wärmeeindruck höher sein als darunter.

Erläutere deine Vermutung.

Das Wasser absorbiert einen Teil des Lichts.

1.4 Versuchsdurchführung

Schalte die Lampe ein. Erfühle nun, ohne den Behälter zu berühren, auf der gegenüber liegenden Seite die Wärmewirkung der Lampe oberhalb und unterhalb des Wasserspiegels. Erkläre die unterschiedlichen Sinneswahrnehmungen.

Oberhalb der Wasseroberfläche ist eine Wärmewirkung zur erfühlen. Unterhalb der Wasseroberfläche scheint die Lampe zwar hindurch, eine Wärmewirkung ist aber nicht vorhanden. Das Wasser absorbiert einen Teil der Strahlung der Lampe.

2 Experiment: Das Wasser steigt!

2.1 Materialliste

- Rundkolben (250 ml, Enghals)
- Gummistopfen (\varnothing 29 bis 35 mm) mit Bohrung (\varnothing 7 mm)
- Etwas Glyzerin als Schmiermittel
- Glasrohr mit kleinem Durchmesser (8 mm, Länge: 250 mm)
- Helle Lampe oder Strahler
- Wasser
- Thermometer
- Wasserlöslicher Filzstift

2.2 Fragen

Was sind typische Verhalten von Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen, wenn man sie erwärmt? Hast Du schon einmal einen mit Luft gefüllten Ballon gesehen, den man heizt?

Sie dehnen sich aus.

Ist dieser Effekt beim Wasser eher groß oder klein? Kannst Du ihn beobachten, wenn Du Wasser in einem Topf auf dem Herd erhitzt (nicht kochen lassen)?

Der Effekt ist klein. Er ist nicht direkt in einem Kochtopf zu beobachten.

Was bedeutet das nach Deiner Ansicht für die Ozeane auf der Erde?

Man könnte der Ansicht sein, dass der Effekt für den Anstieg der Meeresspiegel vernachlässigbar klein ist. Die nachfolgenden Aktivitäten zeigen aber, dass das nicht stimmt.

2.3 Versuchsaufbau und Durchführung



Abbildung 3: Versuchsaufbau (eigenes Werk).

1. Schiebe das Glasrohr durch den Gummistopfen. Falls nötig, benutze etwas Glyzerin als Schmiermittel.
2. Fülle den Rundkolben mit Wasser.
3. Miss die Temperatur des Wassers mit einem Thermometer (optional).
4. Verschließe den Kolben mit dem Stopfen. Achte darauf, dass sich keine Luftblasen bilden. In dem Glasrohr soll eine Wassersäule entstehen, die das Rohr zur Hälfte füllt.
5. Markiere das Niveau des Wasserspiegels im Rohr mit dem Stift.
6. Stelle die Lampe etwa 5 cm vom Rundkolben entfernt auf.
7. Falls möglich, decke das Glasrohr ab, so dass die Lampe es nicht direkt beleuchtet.
8. Schalte die Lampe ein und beobachte das Wasser im Glasrohr für etwa 10 Minuten. In der Zwischenzeit kannst du auch mit der nächsten Aufgabe beginnen.
9. Schalte die Lampe nach 10 Minuten aus und dokumentiere Deine Beobachtung.
10. Entferne den Gummistopfen und miss die Wassertemperatur (optional).

2.4 Ergebnis

Wie stark ist das Wasser im Glasrohr gestiegen?

Einige Zentimeter.

Wie sehr hat sich die Temperatur verändert?

Sehr wenig. Deutlich unter 5°C.

Diskutiere das Ergebnis in Deiner Gruppe. Erkläre die Beobachtung.

Die Lampe hat dem Wasser Wärme(energie) zugeführt. Die führt neben einem leichten Anstieg der Temperatur zu einer Zunahme des Volumens. Da das Volumen im Kolben endlich ist, steigt das Wasser im Glasrohr an. Dieser Vorgang entspricht der Funktionsweise einer Thermometers.

Welche Schlüsse lassen sich daraus für die Erde, insbesondere die Ozeane ziehen?

Da die Ozeane den Großteil der auf die Erde treffende Sonnenenergie absorbieren, erwärmen sie sich mit der Zeit. Die aufgenommene Wärme führt zu einer Volumenzunahme. Dies macht sich in einem Anstieg der Meeresspiegel an den Küsten bemerkbar.

3 Übung: Das kann man auch rechnen!

Anhand von zwei theoretischen Szenarien soll rechnerisch der Einfluss der Temperatur auf die Ausdehnung von Wasser untersucht werden. Die Tabelle 1 gibt die Dichte von Wasser¹ bei Temperaturen zwischen 0°C und 31°C an (siehe auch Abbildung 18).

Tabelle 1: Dichte von Wasser bei verschiedenen Temperaturen.

Temperatur ϑ in °C	Dichte ρ in $\frac{\text{g}}{\text{dm}^3}$	Temperatur ϑ in °C	Dichte ρ in $\frac{\text{g}}{\text{dm}^3}$
0	999,844	16	998,944
1	999,902	17	998,776
2	999,943	18	998,597
3	999,967	19	998,406
4	999,975	20	998,205
5	999,966	21	997,993
6	999,943	22	997,771
7	999,904	23	997,539
8	999,850	24	997,297
9	999,783	25	997,045
10	999,702	26	996,784
11	999,607	27	996,513
12	999,499	28	996,233
13	999,379	29	995,944
14	999,246	30	995,646
15	999,101	31	995,340

Dazu soll ausgenutzt werden, dass

$$m = \rho \cdot V,$$

wobei die Masse des Wassers eine Konstante ist. Somit gilt:

$$\rho_0 \cdot V_0 = \rho_1 \cdot V_1 \Leftrightarrow \frac{\rho_0}{\rho_1} = \frac{V_1}{V_0}$$

Wenn man also die Dichte des Wassers zu verschiedenen Temperaturen kennt (Tabelle 1), kann man die Änderung des Volumens ausrechnen. Die Anfangsbedingungen werden mit dem Index 0 und die Endbedingungen mit dem Index 1 bezeichnet.

3.1 Aufgabe 1

1 Liter (= 1 dm³) Wasser wird von 10°C auf 20°C aufgeheizt.

Wie groß ist das Volumen nach der Temperaturänderung?

$$\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow m = \rho \cdot V = \rho_{10} V_{10} = \rho_{20} V_{20}$$

¹ Wir nehmen hier die Werte für Süßwasser. Salzwasser hat eine höhere Dichte und zeigt stärkere Dichteänderungen bei Wärmezufuhr. Die Wirkung auf die Meere ist also tatsächlich etwas größer als in diesem Beispiel. Realistische Dichten von Salzwasser sind erhältlich unter: <http://www.csgnetwork.com/h2odenscalc.html>

$$\Leftrightarrow V_{20} = \frac{\rho_{10}}{\rho_{20}} V_{10}$$

$$V_{20} = \frac{999.702 \frac{\text{g}}{\text{dm}^3}}{998.205 \frac{\text{g}}{\text{dm}^3}} 1 \ell \approx 1.0015 \ell$$

Wie hoch ist der prozentuale Anstieg?

$$\frac{(V_{20} - V_{10})}{V_{10}} = \frac{1 \ell - 1.0015 \ell}{1 \ell} = 0.0015 = 0.15\%$$

Das Volumen hat sich um 0,15% vergrößert.

3.2 Aufgabe 2

Stelle dir eine Wassersäule des Ozeans von 3 800 m Tiefe vor, dessen Grundfläche 1 m² beträgt. Diese Tiefe entspricht in etwa der mittleren Tiefe der Ozeane der Erde.

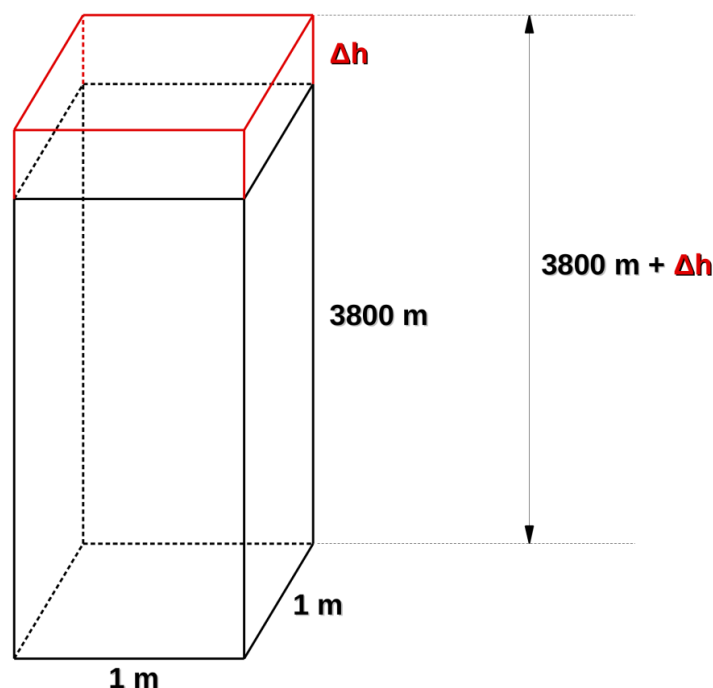


Abbildung 4: Skizze zur Aufgabe 2. Sie zeigt eine Wassersäule mit einer Höhe von 3 800 m und einer Grundfläche von 1 m x 1 m (Marco Türk).

Welches Volumen hat diese Wassersäule? Gib das Volumen in m³ und Liter an.

$$V = 1 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} \cdot 3800 \text{ m} = 3800 \text{ m}^3 = 3800 \cdot (10 \text{ dm})^3 = 3800 \cdot 1000 \cdot \text{dm}^3 = 3800000 \ell$$

Nehmen wir an, das Wasser hätte im Mittel eine Temperatur von 5°C. Welches Volumen hätte die Wassersäule, wenn sie auf 6°C aufgeheizt wird?

$$V_6 = \frac{\rho_5}{\rho_6} V_5 = \frac{999.966 \frac{\text{g}}{\text{dm}^3}}{999.943 \frac{\text{g}}{\text{dm}^3}} 3800 \text{ m}^3 = 3800.087 \text{ m}^3$$

Um wie viel steigt der Meeresspiegel?

Die Volumenänderung beträgt:

$$\Delta V = V_6 - V_5 = 0.087 \text{ m}^3$$

Berücksichtigt man die Grundfläche der Wassersäule von $A = 1 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} = 1 \text{ m}^2$, beträgt die Höhenänderung Δh :

$$\Delta h = \frac{\Delta V}{A} = \frac{0.087 \text{ m}^3}{1 \text{ m}^2} = 0.087 \text{ m} = 8.7 \text{ cm}$$

Was bedeutet dieses Ergebnis für die realen Meeresspiegel, wenn die globale Erwärmung weiter anhält?

Der Anstieg der Meeresspiegel durch die Wärmeausdehnung von Wasser ist ein kleiner, aber nicht zu vernachlässigender Anteil der gesamten Zunahme.

4 Hintergrundinformationen

4.1 Die Sonne

Die Sonne ist die Hauptenergiequelle im Sonnensystem. Abhängig vom Abstand von der Sonne ist die Erwärmung mal stärker und mal schwächer. Im Sonnensystem befindet sich die Erde in einem günstigen Abstand, der es erlaubt, Wasser in großem Maße flüssig zu erhalten. Man kann berechnen, welche Temperatur die Oberfläche der Erde alleine durch die Beleuchtung durch die Sonne hätte. Lässt man den Einfluss der Atmosphäre weg, so beträgt die mittlere globale Durchschnittstemperatur -18°C . Gemessen werden jedoch ca. 15°C . Dieser gewaltige Unterschied kommt daher, dass bei der Berechnung zusätzliche Faktoren nicht berücksichtigt werden.

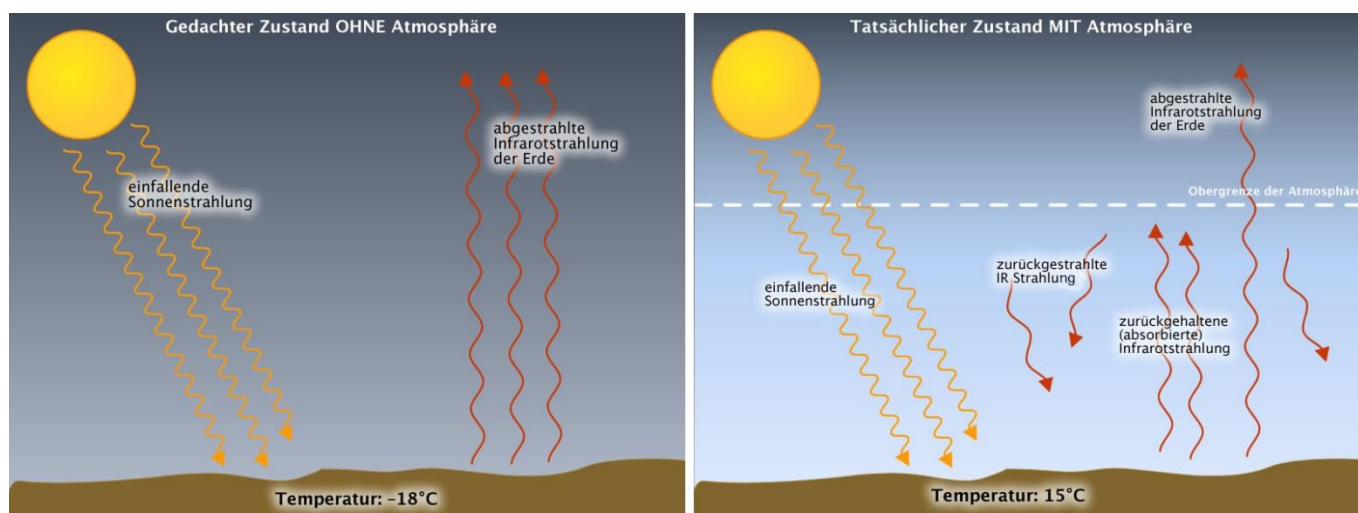


Abbildung 5: Oberflächentemperatur der Erde ohne und mit Atmosphäre (links: Andreas Kalt, <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Einstrahlung-ausstrahlung-ohne-atmosphaere.jpg>, <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode>; rechts: Retemirabile, <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Einstrahlung-ausstrahlung-mit-atmosphaere.jpg>, <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode>).

4.2 Der natürliche Treibhauseffekt

Die vereinfachte, theoretische Berechnung der Durchschnittstemperatur beruht unter anderem darauf, dass die Erde die absorbierte Sonnenstrahlung zu einem gewissen Maß wieder an den Weltraum abgibt. Diese Energie trägt in dieser Betrachtung also nicht zur Erwärmung bei. Tatsächlich ist die Erdatmosphäre jedoch in der Lage, einen Anteil der vom Erdboden abgestrahlten Energie aufzufangen und zu speichern (Abbildung 5). Hierbei spielen insbesondere sogenannte Treibhausgase eine Rolle, die die vom Erdboden abgegebene Wärmestrahlung für kurze Zeit absorbieren und wieder in alle Richtungen – auch zum Erdboden hin – abgeben. Das führt zu einer zusätzlichen Erwärmung, da gerade die Abstrahlung der Wärmestrahlung an das Weltall reduziert wird. Die Atmosphäre wirkt also im Prinzip wie eine Decke und sorgt so für eine höhere Temperatur. Man spricht daher auch von einem Treibhauseffekt.

Ein Treibhaus, Glashaus oder Gewächshaus erzeugt klimatische Bedingungen, die sich von der Umgebung unterscheiden. Das Glas lässt die Sonnenstrahlung hinein. Sie trifft auf den Boden und wärmt ihn auf (Abbildung 6). Dabei wird Wärmestrahlung (Infrarotstrahlung) erzeugt. Das Glas lässt diese Strahlung jedoch nicht durch. Sie ist im Treibhaus gefangen und wärmt es weiter auf. Dieser Effekt ist auf der Erde bis zu einem gewissen Grad gewünscht, um lebensfreundliche Bedingungen zu erhalten.



Abbildung 6: Wirkweise eines Treibhauses. Einfallendes Sonnenlicht beleuchtet den Boden und erwärmt ihn. Die resultierende Wärmestrahlung kann das Glas nur schlecht passieren. Sie verbleibt im Treibhaus und heizt es auf ([user:Jürgi-würgi, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gartengewächshaus.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gartengewächshaus.JPG), gemeinfrei).

4.3 Das Wasser als Wärmespeicher

Aus eigener Erfahrung wissen wir, dass Wasser deutlich träger als Luft mit einer Erhöhung der Temperatur auf Erwärmung reagiert. Wenn wir einen Herd einschalten, merken wir, dass die Luft über der Herdplatte nahezu unmittelbar erwärmt wird. Um einen Topf mit Wasser zum Kochen zu bringen, benötigt es aber einige Minuten, obwohl die Rate, mit der ihm Energie zugeführt wird, dieselbe ist. Daher kann Wasser effektiver Wärme aufnehmen und speichern als Luft. Übertragen auf die Erde wirken die Ozeane also als Wärmespeicher, die die globale Erwärmung regulieren. Tatsächlich absorbieren sie mehr als 90% der von der Erde aufgenommenen Wärme (Abbildung 7).

Wohin geht die Erderwärmung?

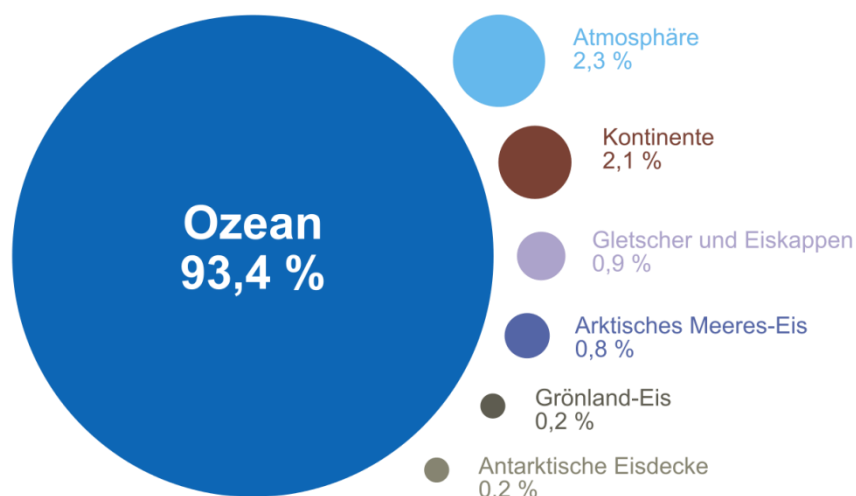


Abbildung 7: Die Grafik zeigt, welche Bereiche der Erde zu welchem Anteil Wärme aufnehmen. Der größte Beitrag geht in die Ozeane. (Furfur, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wohin_geht_die_Erderwärmung.svg, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode>).

4.4 Das Wetter und das Klima

Die tägliche Veränderung von atmosphärischen Bedingungen und Geschehnissen nennen wir Wetter. Um das Wetter zu erfassen, nimmt man Messungen vor. Man misst die Lufttemperatur, den Luftdruck, die Luftfeuchtigkeit und den Niederschlag. Hierfür gibt es bereits seit über 200 Jahren Wetterstationen, die jeden Tag das Wetter aufzeichnen.

Die Temperatur schwankt zwischen Tag und Nacht. Will man den Tag als Ganzes beschreiben, benutzt man die mittlere Temperatur. Das ist die Temperatur, die allen gemessenen Temperaturen am nächsten kommt. Man berechnet ihn, indem man alle Werte addiert und durch ihre Anzahl teilt. Weiterhin verändert sich die Temperatur über das Jahr hinweg wegen der Jahreszeiten. Auch hier bestimmt man den Mittelwert aller Tagestemperaturen, um einen Wert zu bekommen, der für das gesamte Jahr steht.

Zudem sind die Wetterabläufe nicht in jedem Jahr gleich. Es gibt mal warme und mal kalte Sommer. Auch solche mit viel oder wenig Regen. Beobachtet man das Geschehen jedoch über eine lange Zeit hinweg – sagen wir, über 30 Jahre – und berechnet auch über diesen Zeitraum die Mittelwerte, so erhalten wir eine Aussage darüber, wie typischerweise die Bedingungen an einem bestimmten Ort sind. Das nennt man dann das Klima. Das Klima ist also ein Maß für die typischen Bedingungen eines Orts oder einer Region. Das Wetter schwankt um diese Werte.

Wenn alles seine Ordnung hat, dürften sich also die langfristigen Werte nicht ändern. Das Wetter mag mal so und mal so sein; und auch von Jahr zu Jahr mag es Unterschiede geben. Allerdings müsste auf längere Sicht das Klima stabil bleiben.

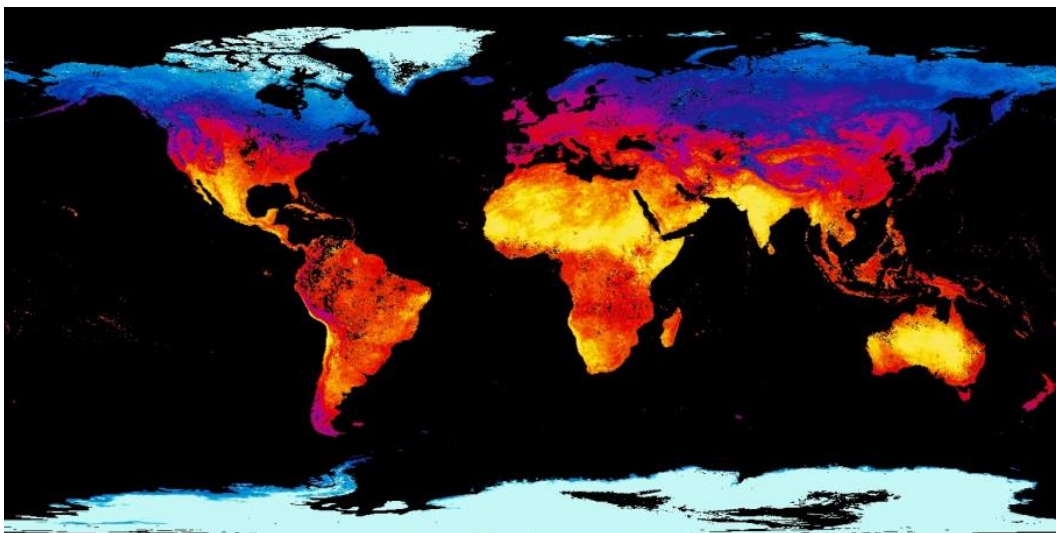


Abbildung 8: Karte der globalen Verteilung der Lufttemperatur nahe der Erdoberfläche für Ende März 2017. Die Karte wurde aus Daten des Erdbeobachtungssatelliten TERRA der NASA erstellt, die während einer Woche gesammelt wurden. Die Farben repräsentieren Temperaturen von -25°C bis $+45^{\circ}\text{C}$ (NASA Earth Observation, https://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MOD11C1_E_LSTDA).

4.5 Die globale Erwärmung

Nun messen wir jedoch seit einiger Zeit einen deutlichen Anstieg der Temperaturen. Hierzu fasst man die Messungen aller Wetterstationen der Welt zusammen und ermittelt einen Wert, der für die gesamte Erde steht. Inzwischen ermöglichen spezielle Satelliten, die Verteilung der Temperatur sehr schnell zu erfassen (Abbildung 8).

Seit einigen Jahrzehnten stellt man fest, dass die über die Erde und über viele Jahre gemittelten Temperaturen stetig zunehmen. Abbildung 9 zeigt den Verlauf seit 1880. Für jedes Jahr ist ein schwarzer Punkt eingetragen. Man sieht auch, dass die Werte von Jahr zu Jahr schwanken. Die rote Kurve ist eine geglättete Version der Daten, die jährliche Schwankungen abschwächt. Hier hat man für jedes Jahr einen fünfjährigen Mittelwert genommen. Man sieht deutlich, dass spätestens seit Mitte der 1970er Jahre die Temperaturen steigen. Das Klima scheint sich also zu verändern. Man spricht daher vom Klimawandel. Gerade die letzten Jahre waren in dieser Weise sehr extrem. Nie hat man seit Beginn der Wetteraufzeichnungen so warme Jahre gemessen.

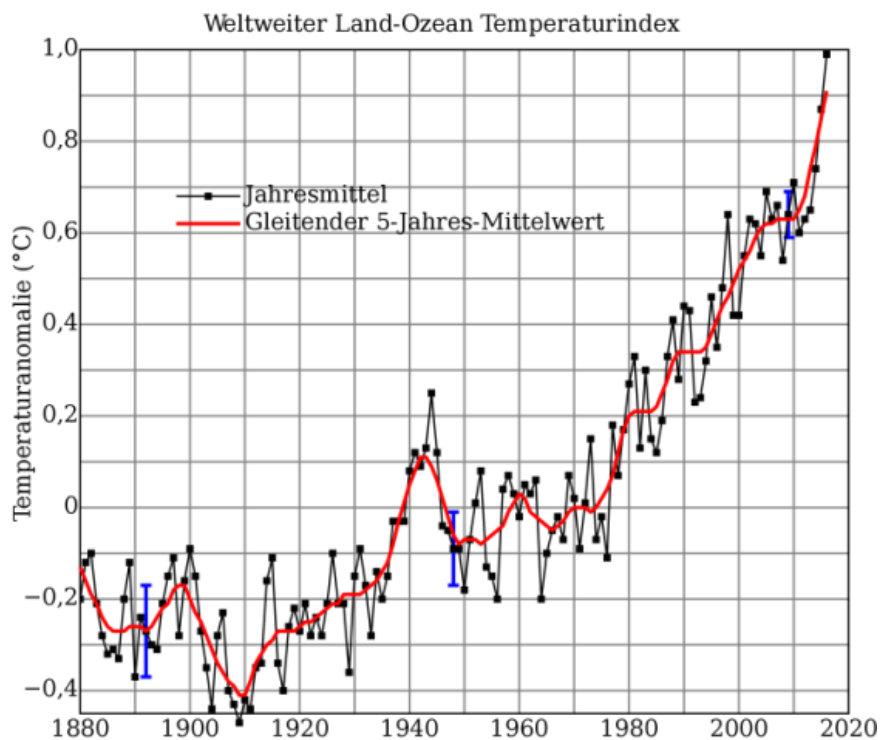


Abbildung 9: Entwicklung der weltweit gemittelten Jahrestemperatur seit 1880 (https://commons.wikimedia.org/w/index.php?lang=de&title=File%3AGlobal_Temperature_Anomaly.svg).

4.6 Der künstliche Treibhauseffekt

Wir haben bereits gesehen, dass es einen natürlichen Treibhauseffekt gibt. Er unterliegt natürlichen Schwankungen, die beispielsweise durch eine kleine Veränderung der Sonnenhelligkeit sowie eine leichte Variation des Abstands zwischen Erde und Sonne erklärt werden können. Die Geschwindigkeit des momentanen Anstiegs der Temperaturen passt aber nicht zu diesen Ursachen. Daher schauen wir uns mal die Atmosphäre etwas genauer an.

Wir stellen fest, dass die Anteile an Treibhausgasen in den letzten Jahrzehnten erheblich angestiegen sind. Abbildung 10 zeigt als Beispiel das Kohlenstoffdioxid, das bei der Verbrennung von Stoffen wie Kohle, Öl, Benzin und Gas entsteht. Inzwischen ist der Gehalt an Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre so hoch wie seit etwa 1 Millionen Jahre nicht mehr². Nahezu alle Fachwissenschaftler sind sich aufgrund der übereinstimmenden Ergebnisse ihrer Studien sicher, dass der Klimawandel, der insbesondere durch die zunehmende Erwärmung der Erde erkennbar ist, von Menschen gemacht ist.

² <http://www.sci-nexx.de/wissen-aktuell-8226-2008-05-15.html>

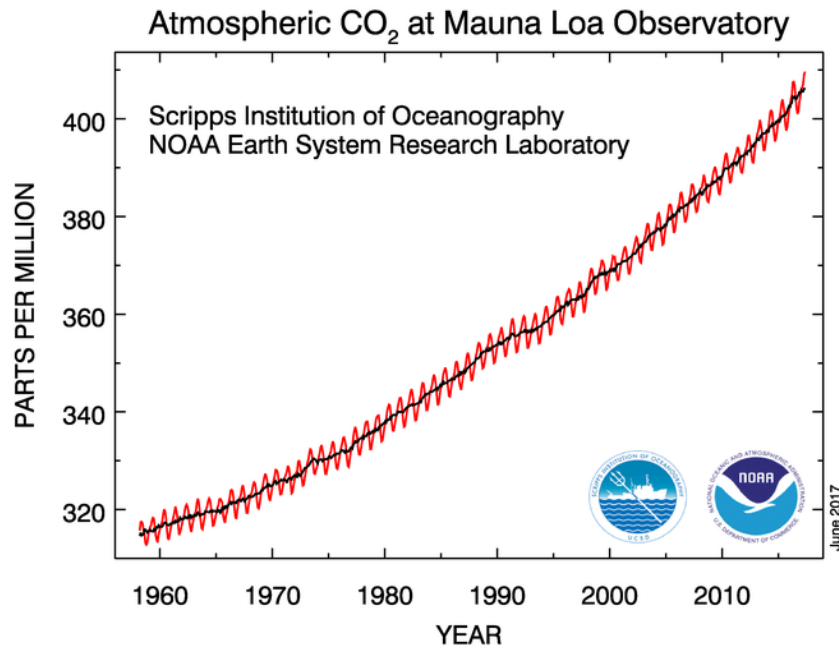


Abbildung 10: Entwicklung des Anteils von Kohlenstoffdioxid (CO₂) in der Atmosphäre an der Messstation Mauna Loa auf Hawaii. Die rote Kurve zeigt die jährliche Schwankung. In der schwarzen Kurve ist sie durch Mittelung herausgerechnet worden (NOAA, <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/full.html>).

4.7 Folgen der Erwärmung: Anstieg der Meeresspiegel

Die Folgen können vielfältig sein. Wir wollen uns hier auf den Anstieg der Meeresspiegel beschränken. Er findet bereits statt, wie Satellitenmessungen zeigen (Abbildung 11). Diese Satelliten nutzen Radar, um die Oberfläche der Erde abzutasten. Satelliten, die solchen Höhenmessungen durchführen können, sind beispielsweise CryoSat und Jason 2/3. Zu den neuesten Sonden gehört Sentinel 3, ein Flaggschiff im europäischen Erdbeobachtungsprogramm „Copernicus“, welches eine bislang unerreichte Detailschärfe erzielt.

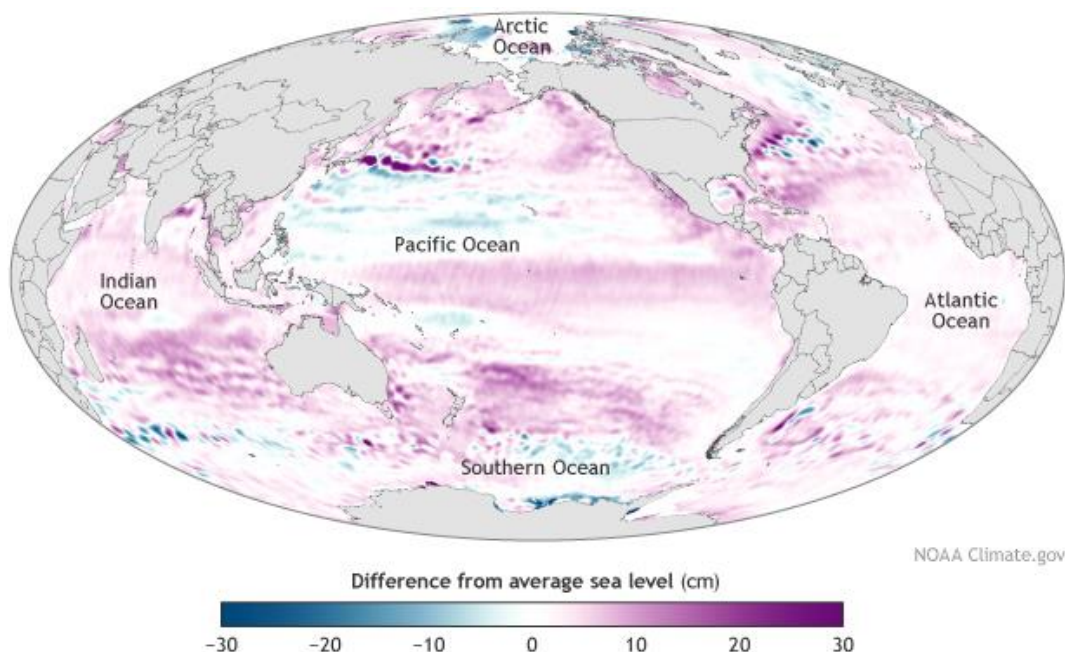


Abbildung 11: Meeresspiegel im Jahr 2014 verglichen mit dem globalen Mittelwert der Jahre 1993 bis 2013 (NOAA Climate.gov map, nach Abb. 3.25a im Bericht „State of the Climate in 2014“, <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/2014-state-climate-sea-level>).

Verknüpft man die Daten aus Beobachtungen zu verschiedenen Zeiten, lässt sich ein genereller Trend der Entwicklung der Meeresspiegel ableiten. Analysiert man alle vorhandenen Daten, erscheint es offensichtlich, dass die Ozeane bereits seit mindestens eineinhalb Jahrhunderte ansteigen. Abbildung 12 zeigt, dass die Meeresspiegel seit 1880 um etwa 23 cm (ca. 9 Zoll) gestiegen sind. Die aktuelle Rate liegt bei etwa 3 mm pro Jahr – Tendenz steigend.

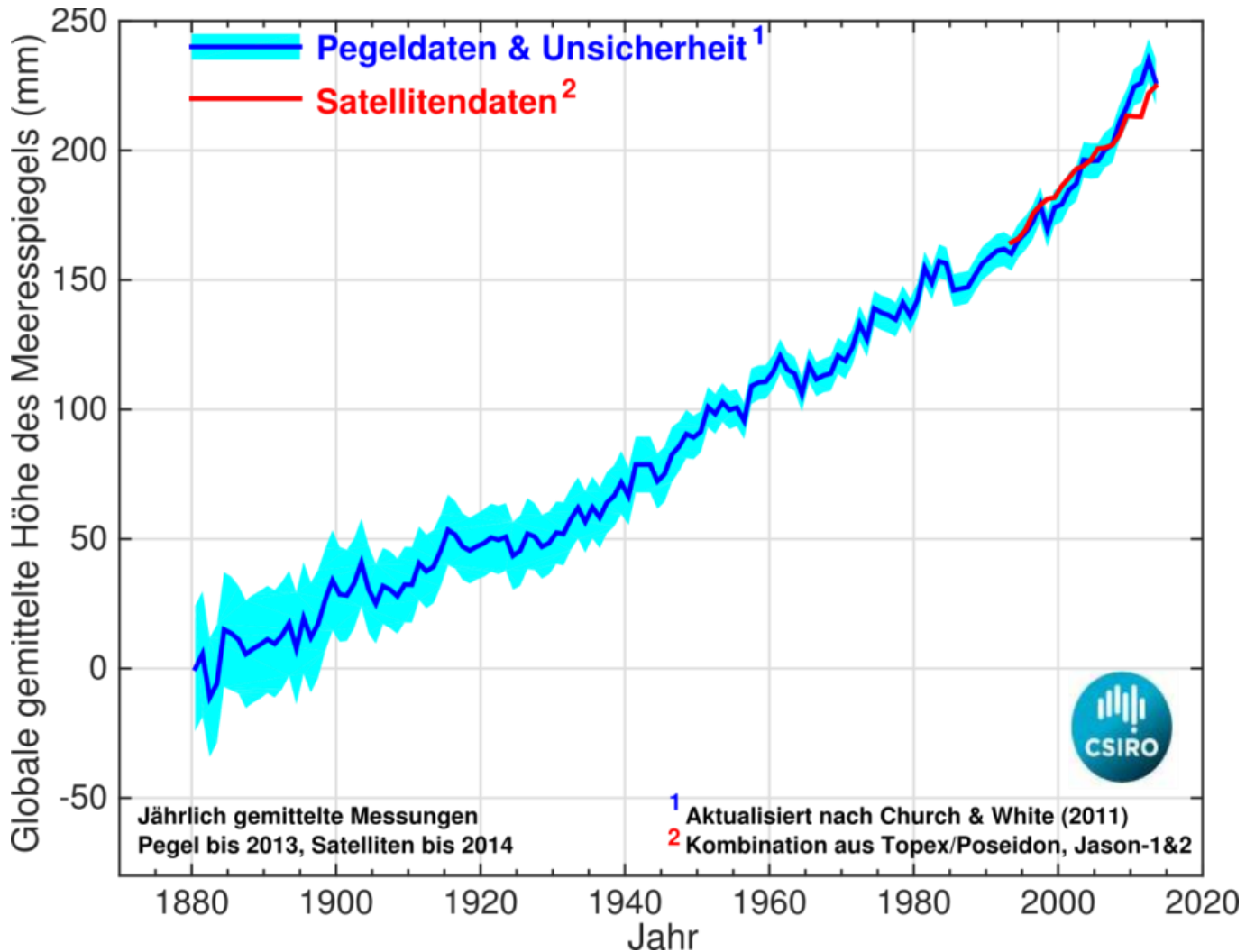


Abbildung 12: Die Grafik zeigt den Zuwachs der weltweiten Meeresspiegel seit 1880, ermittelt aus der Kombination von Langezeitmessungen mit Pegeln und aktuellen Satellitendaten (CSIRO, <http://www.cmar.csiro.au/sealevel/>, übersetzt von Markus Nielbock).

Der wichtigste Grund ist derzeit das Abschmelzen von Schnee und Eis, das sich auf dem Land befindet. Eis, das auf dem Meer schwimmt, trägt kaum zum Anstieg der Meeresspiegel bei, wenn es schmilzt. Daher spielen die Vorgänge in der Antarktis und auf Grönland eine wichtige Rolle, weil sich hier das Eis auf dem Festland befindet. Auch hier tragen Satelliten dazu bei, etwas darüber zu lernen. So können bestimmte Satelliten durch Radarmessungen die Dicke von Eisschichten auf der Erdoberfläche messen und den Eintrag von Wasser in die Meere ermitteln (Abbildung 13). Sollte Grönland komplett abschmelzen, was derzeit nicht sehr wahrscheinlich ist, könnten sie um 6 Meter ansteigen³.

³ <https://www.space.com/37206-omg-nasa-mission-greenland-ice.html>

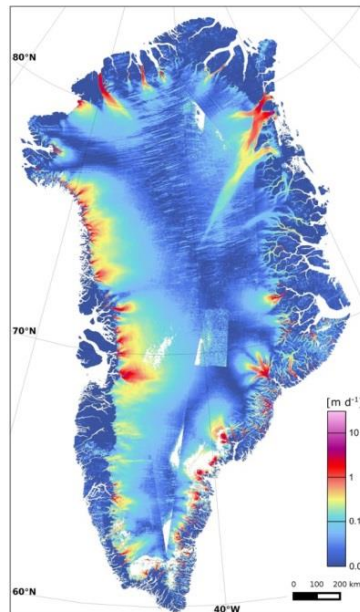


Abbildung 13: Bewegung von Gletschern auf Grönland. Das Eis gleitet mit Geschwindigkeiten von bis zu einigen Metern pro Tag ins Meer (Enthält bearbeitete Copernicus-Sentinel-Daten, 2015, ENVEO/ESA CCI/FFG, http://www.esa.int/spaceimages/Images/2015/11/ice_sheet_in_motion, <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/legalcode>).

Ein anderer Grund für den Anstieg der Meere liegt in der Erwärmung des Wassers selbst. Denn so wie die Lufttemperaturen steigen, werden auch die Ozeane immer wärmer. Sie stehen im ständigen Austausch mit der Atmosphäre. Dabei speichern die Ozeane Wärme und helfen somit, den Treibhauseffekt abzumildern.

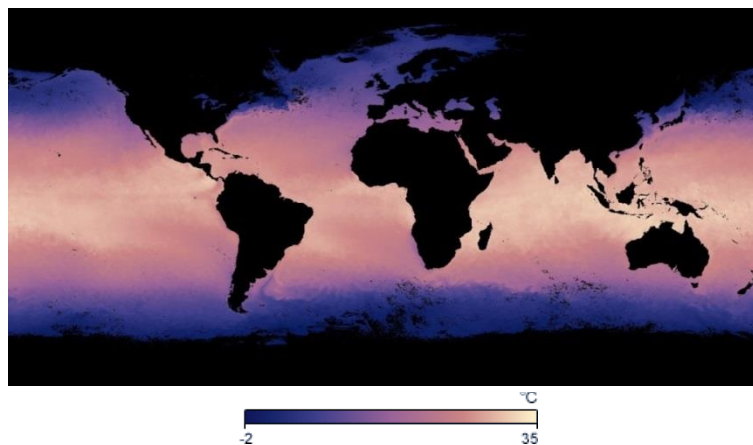


Abbildung 14: Mittlere globale Meeresoberflächentemperatur für März 2016. Die Karte basiert auf messungen mit dem MODIS-Spektrograf des Aqua-Satelliten der NASA. Der Farbbereich zeigt Temperaturen zwischen -2°C und $+35^{\circ}\text{C}$ an (NASA Earth Observations, <http://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MYD28M>).

Allerdings erwärmen sich die Ozeane vorwiegend in den oberen Schichten, also dort, wo sie der Sonnenstrahlung ausgesetzt sind und die Atmosphäre berühren. Immer wenn man Stoffe erwärmt, hat das einen Einfluss auf ihren Zustand. Ein Anstieg der Temperatur ist gleichbedeutend mit einer Zunahme der Geschwindigkeiten der Teilchen (Abbildung 15). Dadurch stoßen die Teilchen miteinander und benötigen dafür mehr Raum. Das Volumen steigt an⁴.

⁴ Diese generelle Regel stimmt nicht immer. So hat Wasser unter Normalbedingungen bei 4°C seine größte Dichte und benötigt daher in diesem Zustand das kleinste Volumen.

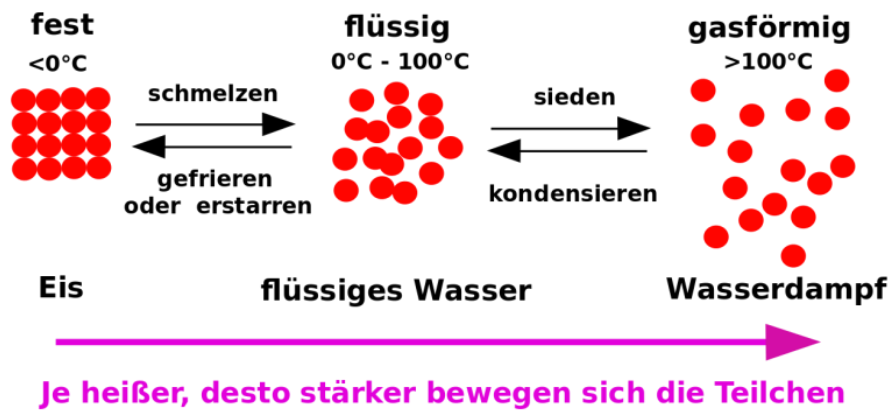


Abbildung 15: Einfluss der Temperatur auf die Bewegung der Teilchen in Flüssigkeiten und Gasen. Je höher die Temperatur, desto schneller bewegen sich die Teilchen und nehmen ein größeres Volumen ein (<https://de.wikibooks.org/wiki/Datei:Aggregatzustände.svg>, gemeinfrei).

Auf die Ozeane bezogen bedeutet das, dass ihr Wasser ein größeres Volumen einnimmt, wenn seine Temperatur zunimmt. Daher steigen auch aus diesem Grund die Meeresspiegel an. Dieser Effekt war bis vor wenigen Jahren noch der stärkste Beitrag zur Erhöhung der Meeresspiegel. Derzeit macht er jedoch nur noch etwa $\frac{1}{4}$ des Gesamtanstiegs aus. Das liegt insbesondere an der dramatischen Zunahme der Eisschmelze, ganz zuvorderst auf Grönland⁵.

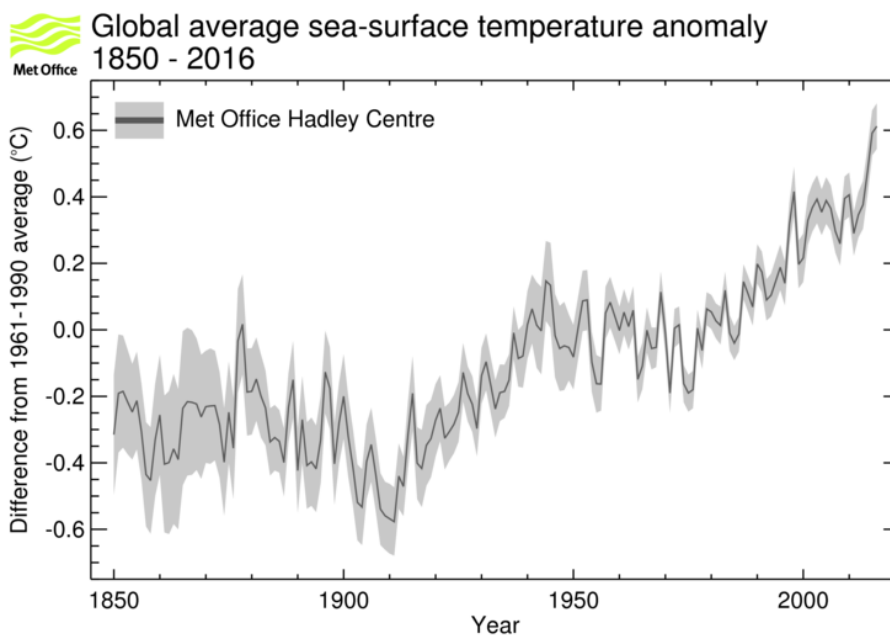


Abbildung 16: Entwicklung der weltweiten Meeresoberflächentemperatur seit 1850 bezogen auf den Mittelwert zwischen 1961 und 1990. Sie spiegelt in etwa den Anstieg der Lufttemperaturen wider (MetOffice UK, http://www.metoffice.gov.uk/binaries/content/gallery/mohippo/images/research/monitoring/compare_datasets_hadsst3_logo.png, enthält öffentliche Informationen lizenziert nach der Open Government Licence v1.0 der Vereinigten Königreichs, <http://www.nationalarchives.gov.uk/doc/open-government-licence/version/1/>).

Aktuelle Messungen und Rechnungen zeigen, dass alleine durch ihre Erwärmung, die Ozeane um etwa 1,1 mm pro Jahr zunehmen. Die Entwicklung dieses Beitrags ist in Abbildung 17 dargestellt.

⁵ Dieter Kasang, http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Ursachen_des_aktuellen_Meeresspiegelanstiegs, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/legalcode>

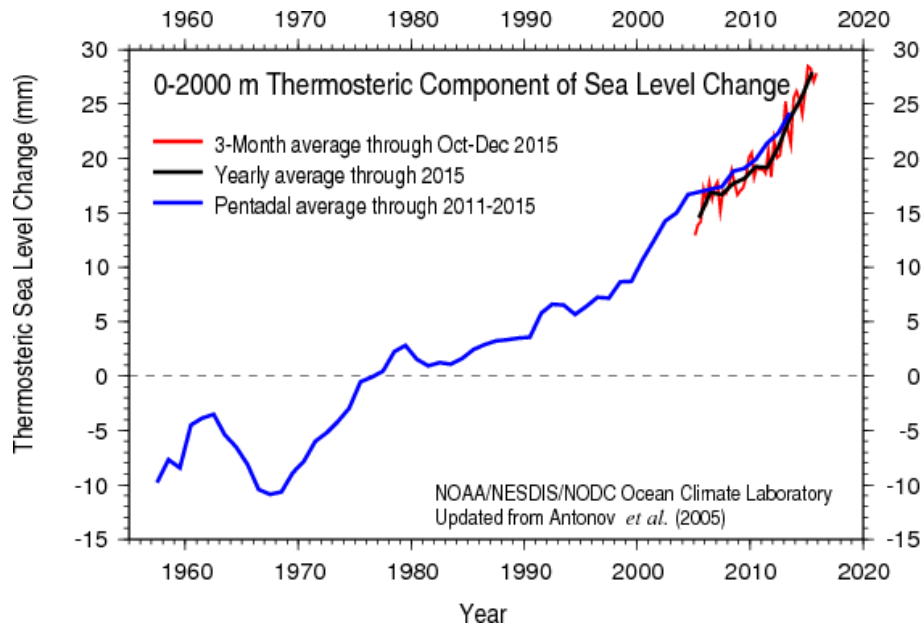


Abbildung 17: Zeitliche Entwicklung der Meereshöhe zwischen 1955 und 2015, die durch die Temperatúrausdehnung des Wassers hervorgerufen wird (http://www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT/).

4.8 Physik der Volumenausdehnung

Dieser Effekt entspricht dem Prinzip eines Flüssigkeitsthermometers. Er basiert auf dem physikalischen Prinzip, dass sich die Dichte ρ einer Flüssigkeit mit der Temperatur ändert. Die ist definiert als der Quotient aus der Gesamtmasse m und dem Volumen V , das es einnimmt.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Da sich aber die Gesamtmasse während der Erhöhung der Temperatur nicht ändert, kann man sie als konstant ansehen. Daher gilt:

$$m = \rho \cdot V$$

Da sich die Dichte mit der Temperatur ändert, muss dies auch das Volumen umgekehrt proportional dazu tun. Sinkt die Dichte, steigt das Volumen. Das Verhalten von flüssigem Wasser ist in Abbildung 18 dargestellt ($1 \text{ dm}^3 = 1 \text{ Liter}$).

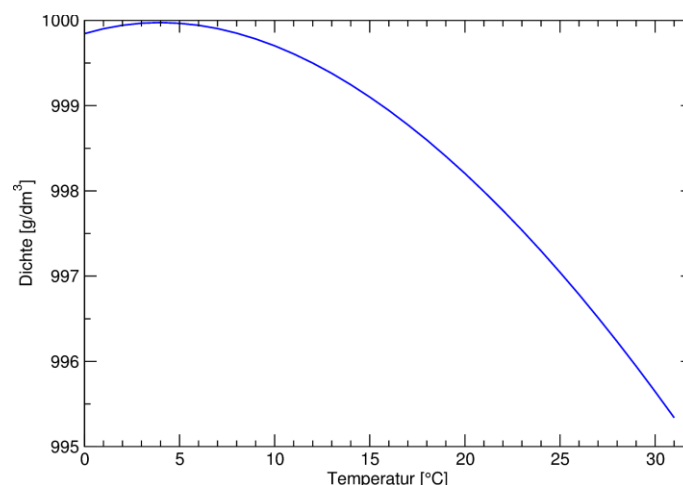


Abbildung 18: Dichte von Süßwasser bei Standarddruck für Temperaturen zwischen 0 und 31°C (nach NIST, <https://is.gd/joDUoD>).

Erklärung

Dieses Material ist in Teilen im Rahmen einer Staatsexamensarbeit von Herrn Marco Türk am Haus der Astronomie entwickelt worden. Es ist Teil einer größeren Sammlung von Unterrichtsmaterialien, die innerhalb des Bildungsprojekts „EU Space Awareness“ konzipiert wurden. „EU Space Awareness“ wird durch die Europäische Union im Rahmen des Programms „Horizonte 2020“, H2020 –COMPET–2014 mittels Förderabkommen Nr. 638653 finanziert.