Der Meeresspiegel steigt – aber um wie viel?

Auswertung von Studien und zugehörigen Daten mit Hilfe der Schulmathematik

Antonius Warmeling

Der Artikel untersucht den globalen Meeresspiegelanstieg mithilfe realer Messdaten und zeigt, wie sich diese im Mathematikunterricht auswerten lassen. Er stellt damit eine Konkretisierung der Unterrichtskizze 2 im Fachbeitrag Mathematik des Orientierungsrahmens Globale Entwicklung für die gymnasiale Oberstufe dar (Engagement Global, 2025). Anhand von Satellitendaten werden lineare und quadratische Trends verglichen. Die Analyse belegt, dass der Meeresspiegel nicht nur steigt, sondern sich der Anstieg beschleunigt. Gleichzeitig wird gezeigt, wie äußere Einflüsse wie El Niño oder Vulkanausbrüche die Daten beeinflussen und mathematisch berücksichtigt werden können.

1 Einstieg

In der Fachwelt ist es klar, dass der Klimawandel menschengemacht ist. Dies lässt sich anhand von Indikatoren wie zum Beispiel dem Anstieg des Meeresspiegels nachweisen. Wir als Lehrende haben die Aufgabe, den Schüler/inne/n Handwerkszeug und Wissen an die Hand zu geben, um im öffentlichen Diskurs daten- und faktenorientiert solche Erkenntnisse zu vertreten bzw. veröffentlichte Meinungen zu analysieren. Eine Studie, in der Rohdaten so überarbeitet werden, dass nicht-anthropogene Einflüsse herausgefiltert und damit die menschlichen gemachten Veränderungen deutlich werden, kommt da gerade recht.
Obwohl in der Schule nicht das gesamte universitäre Handwerkszeug zur Verfügung steht, kann es dennoch gelingen, mit schulischen Mitteln wesentliche Erkenntnisse nachzuvollziehen. Die skizzierte Unterrichtsreihe ist eher für die Oberstufe gedacht. Wenn man die Beschleunigung als das Doppelte des Koeffizienten a_2 der quadratischen Trendfunktion $f(t)$ definiert, kann man das Thema auch schon in der 9/10 behandeln.

2 Messverfahren

Grundsätzlich gibt es zwei Verfahren, um die Höhe des Meeresspiegels zu bestimmen. Ähnlich wie bei Temperaturdaten werden Veränderung im Vergleich mit einem festgelegten Referenzwert angegeben.

2.1 Pegelmessungen

Zum Teil schon seit 100 Jahren wird an Küsten und in den Häfen an festen Stationen der Wasserstand mit Hilfe von Pegelmessung bestimmt. Früher nutzte man dafür Schwimmer, die Werte wurden abgelesen und von Hand notiert. Heute verwendet man Sensoren, die Messwerte werden automatisch und in Minuten- oder Stundenabständen festgehalten.

Langfristige Mittelwerte dienen als Bezugsgröße. Da sich das Land und damit auch die Messstationen heben und senken, müssen die Beobachtungswerte mittels GPS-Messungen zu den Landbewegungen korrigiert werden.

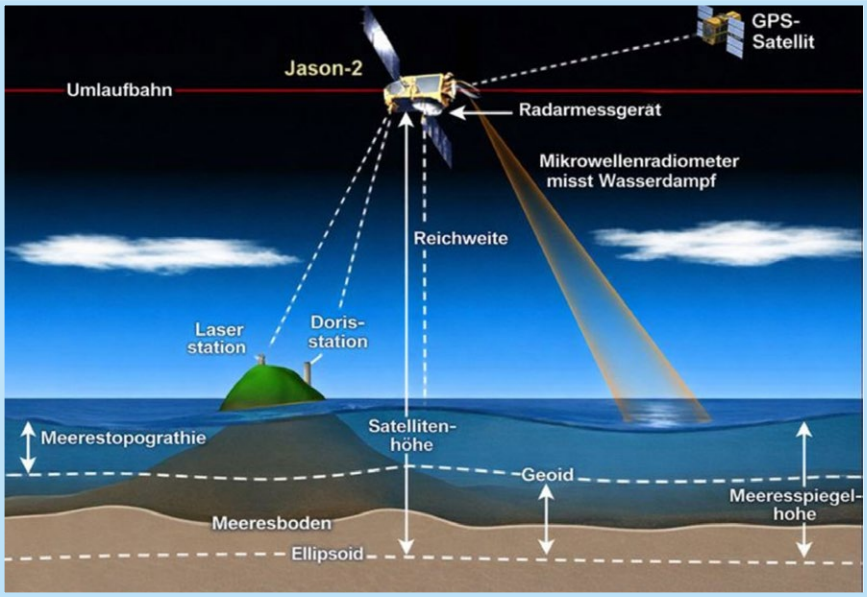


Abb. 1. das Verfahren der Altimetermessung (Quelle: Center for Satellite Application and Research), mit KI eingedeutscht

2.2 Satellitenaltimetrie

Für die Bestimmung der globalen mittleren Meeresspiegelhöhe (GMSL, engl. *Global Mean Sea Level*) werden seit Ende 1992 vorwiegend Satellitenmessungen ausgewertet. Satelliten wie TOPEX/POSEIDON oder JASON-2 senden Mikrowellen oder Laserstrahlen zur Meeresoberfläche und berechnen aus der Laufzeit die absolute Höhe (Abb. 1). Zur besseren Lesbarkeit werden in der Regel die Veränderungen gegenüber einem Referenzwert – hier der modellierten mittleren Meeresoberfläche (MSS, engl. Modeled Mean Sea Surface) – verwendet, der die mittlere Meereshöhenfläche in der Mitte eines mehrjährigen Beobachtungszeitraums beschreibt.
Jeder Punkt in der Zeitreihe der hier verwendeten Sea Level Research Group der Universität Colorado ist der flächengewichtete Mittelwert aller Anomalien der

Meeresoberflächenhöhe, die vom Altimeter in einem einzigen 10-tägigen Satellitenbahn-Wiederholungszyklus mit rund 70.000 Beobachtungswerten gemessen wurden.

Standardmäßig werden die Beobachtungswerte aufgrund verschiedener Einflussfaktoren korrigiert. In erster Linie sind das saisonale Effekte und die *glaziale isostatische Anpassung* (GIA). Letztere entsteht dadurch, dass die Ozeanbecken im Laufe der Zeit größer werden, weil durch die Rückbildung der mehrere Kilometer dicken Eisschichten immer noch Mantelmaterial aus dem Becken auf das Land wandert. Damit werden die Becken größer und enthalten mehr Wasser. Der dadurch erzielte Meeresspiegeleffekt wird durchschnittlich mit etwa −0,3 mm/Jahr angegeben, d.h. die gemessenen Änderungen vergrößern sich dadurch um 0,3 mm/Jahr.

3 Trendlinien und Bestimmtheitsmaß veranschaulichen

Falls Trendlinien und Regression im Unterricht noch nicht behandelt wurden, können von der Homepage des Autors (Adresse am Ende des Beitrages) dynamische GeoGebra-Dateien unter der Überschrift Trendfunktionen heruntergeladen werden, mit deren Hilfe die Begriffe zumindest anschaulich eingeführt werden können. Um im Sachzusammenhang zu bleiben und gleichzeitig den Überblick nicht zu verlieren, wird wie in Fock, Heinz, Lehrmann, Just und Siller (2025) ein Minidatensatz von sechs Beobachtungen aus dem Originaldaten zur Meeresspiegelhöhe ausgewählt. Die zugehörige Punktewolke mit drehbarer Gerade kann für eine erste Diskussion zunächst im Plenum an die Wand projiziert werden. Dafür steht die Datei *regression0.ggb* zur Verfügung. Klickt man das Kontrollkästchen an, so werden die vertikalen Abstände der Punkte von der Geraden als Impuls zur Bewertung der Anpassung angezeigt.

Sollen die Lernenden das Kriterium „Summe der Abstände“ selbst entdecken, so können sie mit der Datei *regression1.ggb* experimentieren. Dabei legen sie zunächst per Augenmaß eine Gerade durch die Punktewolke. Nach der Aktivierung des Kontrollkästchens *Differenzen anzeigen* wird die Summe der Residuen angezeigt. Sie erkennen, dass die Summe immer Null ist und damit diese Summe nicht als Kriterium genutzt werden kann. Gleichzeitig erhalten sie damit aber nachträglich eine Erklärung dafür, warum der Schwerpunkt als Drehpunkt gewählt wurde.
Aktivieren sie danach auch das Kontrollkästchen *Abstände anzeigen*, wird die Summe der Absolutwerte angezeigt. Durch Bewegen des Ziehpunkts können sie die minimale Summe und damit die zugehörige Geradengleichung ermitteln. Daneben werden manchmal auch die orthogonalen Abstände der Datenpunkte von der Ausgleichsgeraden genannt, weil die aus dem Geometrieunterricht bekannt sind. Abgesehen davon, dass die orthogonalen Abstände mathematisch schwerer zu bestimmen sind, haben die vertikalen Abstände (Absolutbeträge der Residuen) den Vorteil, dass die beiden y-Werte zum selben Zeitpunkt gehören. Dies ist bei den orthogonalen Abständen in der Regel nicht so.

Die Lernenden werden das Prinzip der minimalen Quadratsumme nicht unbedingt als Kriterium für die gute Anpassung an die Datenwolke nennen. Nachdem sie aber mit den vertikalen Abständen experimentiert haben, könnte ein Hinweis auf die Nicht-Negativität der Quadratflächen und der stärkeren Berücksichtigung von Ausreißern eine Begründung für dieses Kriterium liefern. Dass die Betragsfunktion im Gegensatz zur Summe der Abweichungsquadrate nicht überall differenzierbar ist, kann an dieser Stelle diskutiert werden, wenn die fachlichen Voraussetzungen bekannt sind. Mit Hilfe von *regression2.ggb* können sich die Schüler/innen das Prinzip veranschaulichen. Der Vergleich der so ermittelten Funktionsgleichung mit der aus der Summe der vertikalen Abstände ermittelten zeigt an, dass die Lage der Ausgleichsgeraden von der Wahl des Kriteriums abhängig ist. Die über die Summe der Abweichungsquadrate ermittelte Geradengleichung wird zunächst interpretiert und dann für einen späteren Vergleich notiert. Streng genommen gilt das hier skizzierte Verfahren nur für die lineare Regression. Um andere Trendlinien bestimmen zu können, muss man die Daten zunächst linearisieren (Böer, 2005). Dies dürfte aber nur in der Oberstufe und in Kursen mit erhöhtem Anforderungsprofil sinnvoll sein.

Um auch noch das Bestimmtheitsmaß anschaulich zu erläutern, experimentieren die Lernenden anschließend mit *regression3.ggb*. Verglichen werden dabei die Abstände der Punkte und die der zugehörigen Geradenpunkte. Zieht man die Gerade in die optimale Lage, so wird dies durch einen Wechsel der Geradenfarbe angezeigt. Zunächst kann man sehen, dass die beiden Abstände sich annähern. Da die gesamte und die erklärte Streuung als Summe der Abweichungsquadrate definiert ist, kann man sich diese anzeigen lassen. Damit wird die Definition des Bestimmtheitsmaßes angegeben und für diesen Fall auch der konkrete Wert für R^2 berechnet. Bei der Besprechung dieser Arbeitsphase sollte herausgearbeitet werden, dass die Definition nur dann Sinn macht, wenn das Minimum der Abweichungsquadrate vorliegt.

Der Meeresspiegel steigt jedes Jahr etwas schneller – und der Zuwachs könnte bis zum Jahr 2100 mehr als das Doppelte bisheriger Prognosen erreichen. Das haben Wissenschaftler anhand von Satellitenmessungen errechnet. Seit 1993 stieg der Meeresspiegel im weltweiten Durchschnitt jährlich um etwa 3 Millimeter.
Die nun gemessene Beschleunigung könnte dazu führen, dass der Anstieg im Jahr 2100 zehn Millimeter pro Jahr beträgt. Das berichtet die Forschergruppe um Steve Nerem von der University of Colorado in Boulder. Bis zum Ende des Jahrhunderts könnte demnach der Durchschnittspegel an den Küsten um 65 Zentimeter höher liegen als 2005. Die Wissenschaftler berücksichtigten verschiedene Faktoren, die den globalen Meeresspiegel beeinflussen, wie z.B. das Klimaphänomen El Nino im Pazifik. Nach Berücksichtigung aller Daten errechnete das Team eine jährliche Beschleunigung des Globalen Meeresspiegelanstiegs um 0,08 Millimeter.

Kasten 1. Artikel zum Meeresanstieg, gekürzt und leicht verändert nach Frankfurter Rundschau vom 17.2.2018

Nach einer solchen Einführung kann man die in Excel zur Verfügung stehenden Trendlinien nutzen. Mit einem Rechtsklick auf die Datenwolke wird ein Kontextmenü eingeblendet, in dem man den Trendfunktionstyp auswählt. Weiter kann man wählen, ob man Funktionsterm und/oder Bestimmtheitsmaß sowie gegebenenfalls auch noch eine Vorwärts- oder Rückwärtsprognose angezeigt bekommen möchte.

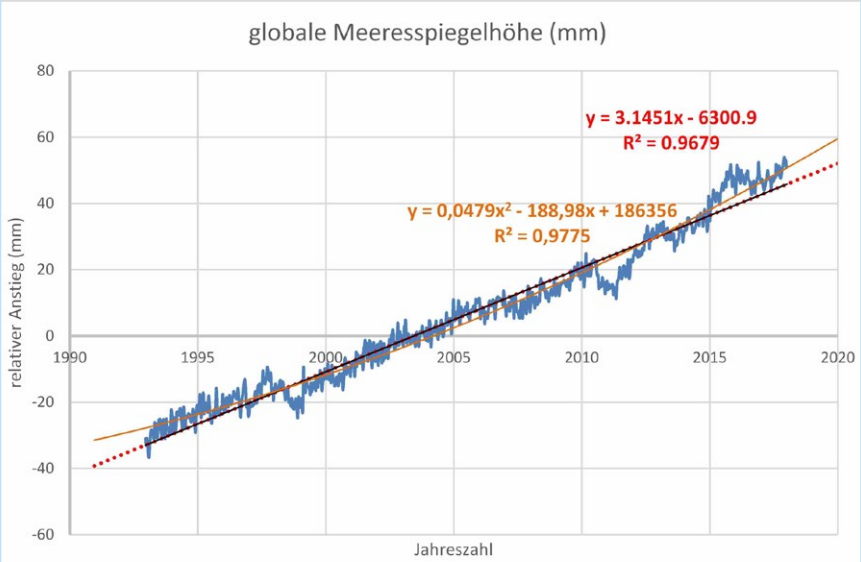


Abb. 3. Zeitreihe zur Meeresspiegelhöhe mit linearer und quadratischer Trendfunktion

4 Daten

2018 veröffentlichten Nerem et al. eine Studie (Kasten 1), in der sie die Veränderungen der globalen Meeresspiegelhöhe seit 1992 untersuchten. Die Daten stammen von den Topex – und Jason-Satellitenmissionen der Nasa (USA) und Cnes (Frankreich), die ersten Messungen dieser Art starteten Ende 1992. Die Bezugsgröße ist die mittlere globale Meeresspiegelhöhe in der Mitte des Messzeitraums. In den veröffentlichten Daten sind saisonale Effekte und die glaziale isostatische Anpassung schon herausgerechnet. Da die Datei als Textdatei angeboten wird (https://sealevel.colorado.edu/files/2018_rel1/sl_ns_global.txt), wurde sie in eine Exceldatei *gmsl_global_bis2018.xlsx* umgewandelt, erhältlich unter der am Ende des Beitrages angegebenen Adresse.

5 Erste Darstellung und Auswertung der Punktewolke

Die Datei *gmsl_global_bis2018.xlsx* enthält die Spalten *Zeitpunkt* als gerundete Dezimalzahl und die *relative Höhe* in mm (Abb. 2). Die Lernenden erhalten als erstes den Auftrag, in Kleingruppen die Entwicklung der globalen Meeresspiegelhöhe in einem Punktediagramm darzustellen. Libre office calc und ähnliche frei verfügbare Programme stellen das Diagramm ebenso problemlos dar wie Excel. GeoGebra dagegen geht wegen der großen Datenmenge relativ schnell „in die Knie“ und hängt sich dann z.B. bei der quadratischen Regression auf. Dessen Nutzung wird daher hier nicht empfohlen.

Zeitpunkt	relative Höhe (mm)
1992.96	−31
1992.985	−33.1
1993.001	−30.9
1993.039	−33

Abb. 2. Ausschnitt aus der Tabelle *gmsl_global_bis2018.xlsx*

Um Bedienungshürden zu minimieren, enthält die Datei eine fünfschrittige Anleitung bis hin zur Verkleinerung der Datenpunkte. Sie setzt dennoch voraus, dass die Lerngruppe schon grundlegende Arbeitsschritte in dem genutzten Programm kennt. Die fertigen Diagramme sollten auf jeden Fall eine aussagekräftige Überschrift und Achsenbeschriftungen enthalten. Den Schüler/inne/n ist freigestellt, weitere „Verschönerungen“ vorzunehmen.

Bei der Vorstellung eines oder zweier Gruppenprodukte kann schon die Tendenz angesprochen werden. Vom optischen Eindruck her ist anzunehmen, dass die Schüler/innen einen linearen Trend vermuten. Mit einem Linksklick auf die Datenwolke gelangt man über die rechte Maustaste und *Trendlinie einfügen* ins Auswahlmenü. Dabei ist es günstig, wenn man die Formel im Diagramm anzeigen lässt und über die Prognose die Gerade etwas verlängert (z.B. 2 Jahre). Auf die Darstellung des Bestimmtheitsmaßes kann hier zunächst verzichtet werden. Es empfiehlt sich, die aus der Formel abzuleitende Aussage zum Anstieg des Meeresspiegels auch ausformulieren zu lassen.

Bis 2010 passt die Trendgerade ganz gut, dann gibt es Verwerfungen. Insbesondere liegen in den letzten drei Jahren alle Beobachtungswerte oberhalb der Geraden. Das gilt auch für die ersten 5 bis 6 Jahre. Dies führt zur Diskussion, ob noch andere Trendlinien sinnvoll sind. Manchmal kommt auch der Vorschlag zwei Trendgeraden zu bestimmen, einmal bis 2010 und einmal ab 2010. Dazu fügt man in das Diagramm über *Daten auswählen* zwei zusätzliche Datenreihen für 1992 bis 2010 bzw. für 2011 bis 2018 ein, für die man dann getrennt die Geraden einzeichnen lassen kann.

Auf die Idee, die Trendgerade oben und unten etwas „nach oben zu biegen“ – sprich einen quadratischen Trend anzunehmen, kommen sicher nicht so viele. In diesem Fall kann die Lehrperson darauf hinweisen, dass die Autoren der Studie, in der die Daten verwendet wurden, von einem quadratischen Zusammenhang ausgehen. Wenn man diese Trendfunktion nun nutzt, sieht man, dass sie insgesamt besser zur Datenwolke zu passen scheint. Dies kann man auch nachweisen, wenn man für beide Funktionen das Bestimmtheitsmaß anzeigen lässt (Abb. 3).

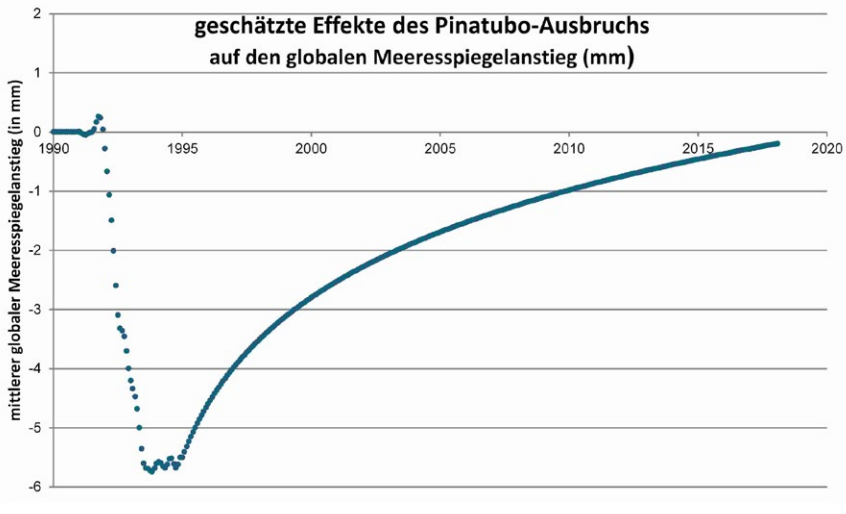


Abb. 4. Auswirkungen des Pinatubo-Ausbruches (eigene Darstellung, Daten: FASULLO, 2016)

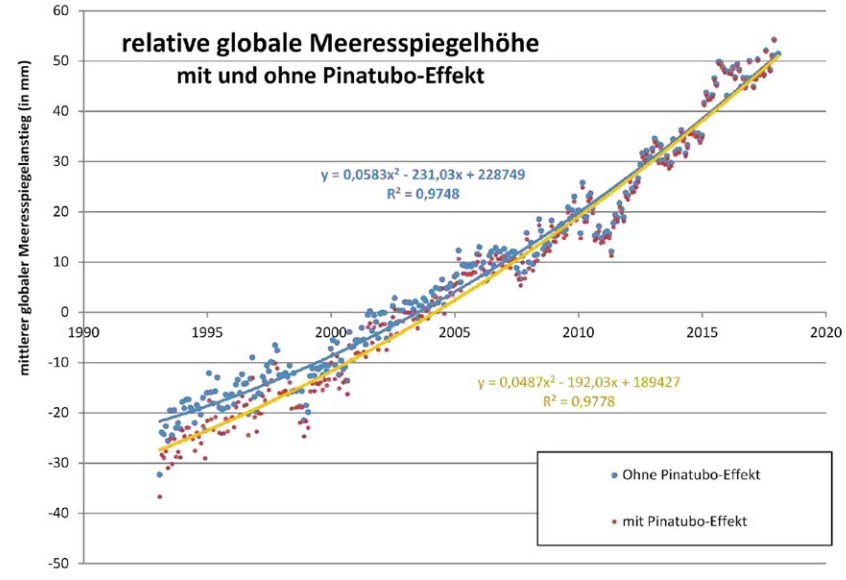


Abb. 5. Auswirkungen des Pinatubo (eigene Darstellung)

6 Datenanpassungen

Da die Autoren NEREM et al. (2018) das Ziel formulieren, den anthropogenen Einfluss auf den Klimawandel zu verdeutlichen, eliminieren sie zwei weitere Effekte, die nicht vom Menschen beeinflusst werden.

6.1 Der Ausbruch des Pinatubo

Der Ausbruch des Mount Pinatubo auf den Philippinen im Jahr 1991 gehört zu den stärksten Vulkanausbrüchen des 20. Jahrhunderts. Riesige Aschewolken gelangten bis in die Stratosphäre und führten über mindestens zwei Jahre zu einer deutlichen Abkühlung der globalen Durchschnittstemperatur um $0{,}5\ °C$. Das hatte ebenfalls Auswirkungen auf die Meeresoberflächentemperatur und damit auf den globalen Meeresspiegelanstieg. FASULLO, NEREM & HAMLINGTON (2016) haben die daraus resultierenden Veränderungen der mittleren globalen Meeresspiegelhöhe abgeschätzt (Abb. 4). Subtrahiert man diese von den NEREM-Daten, so erhält man eine Schätzung der Meeresspiegelhöhe ohne den Vulkanausbruch. Wie nicht anders zu erwarten sind die Auswirkungen vor allem in den ersten Jahren erheblich. (Abb. 5)

Vergleicht man die beiden quadratischen Trendfunktionen, so stellt man fest, dass die Beschleunigung um $0{,}02\ \mathrm{mm/a^2}$ abgenommen hat. Laut Studie sind es sogar $0{,}033\ \mathrm{mm/a^2}$.

6.2 Der ENSO–Effekt

Der ENSO (El Niño-Southern Oscillation) ist ein Zirkulationssystem im tropischen Pazifik. Er ist einer der wichtigsten Klimaphänomene, durch die global sowohl Temperatur als auch Niederschlag und damit auch die globale Meeresspiegelhöhe beeinflusst werden. In der El Niño-Phase erwärmen sich die Meeresoberflächen im zentralen und östlichen Pazifik. Bei den La Niña-Ereignissen werden entsprechende Abkühlungen gemessen. Da die Warmphasen alle zwei bis sieben Jahre auftreten, spricht man auch von einem quasi-periodischen Effekt mit interannueller Variabilität. Viele weitere Informationen findet man auf der Webseite von KURT G. BALDENHOFER.

Über den ENSO-Index werden die Schwankungen quantifiziert. Dazu werden Daten zur Meeresoberflächentemperatur und atmosphärischer Druck sowie die Walter-Zirkulation als Abweichung von einem langjährigen Mittel zu einer einzigen Zahl, dem ENSO-Index aggregiert. Ist dessen gleitender 3-Monatsmittelwert fünfmal hintereinander größer als 0,5, so spricht man von einem El Niño-, bei fünfmal hintereinander kleiner als –0,5 von einem La Niña-Ereignis.

Die lineare Trendgerade mit der Gleichung $g(\mathrm{t}) = 3{,}1451t - 6300{,}9$ (t als Zeitpunkt) beschreibt ganz gut den langjährigen Trend (bis 2010) mit einem jährlichen konstanten Anstieg von rund $3{,}1\ \mathrm{mm}$. Würde sich der Trend so fortsetzen, kann man 2100 mit einer Gesamterhöhung von $30{,}4\ \mathrm{cm}$ rechnen. Alternativ zeigt die quadratische Funktion mit der Gleichung $f(\mathrm{t}) = 0{,}0479t^2 - 188{,}98t + 186356$, dass sich der Anstieg gemäß $f'(t) = 0{,}0958t - 188{,}98$ jährlich ändert und die Beschleunigung bei $f''(t) = 0{,}0958\ \mathrm{mm/a^2}$ liegt. Bildet man $f'(2100)$, so erhält man die Prognose, dass der Meeresspiegelanstieg im Jahr 2100 bei $12{,}2\ \mathrm{mm/a}$ liegen könnte. Bis zum Ende dieses Jahrhundert würde der Meeresspiegel dann um $f(2100) = 73{,}7\ \mathrm{cm}$ ansteigen. Das passt noch nicht ganz zu den in der Studie genannten Werten von $10\ \mathrm{mm/a}$, einer Beschleunigung von $0{,}084\ \mathrm{mm/a^2}$ und einer daraus resultierenden Gesamterhöhung von $65\ \mathrm{cm}$. Diese Diskrepanz leitet zu weiteren Anpassungen über.

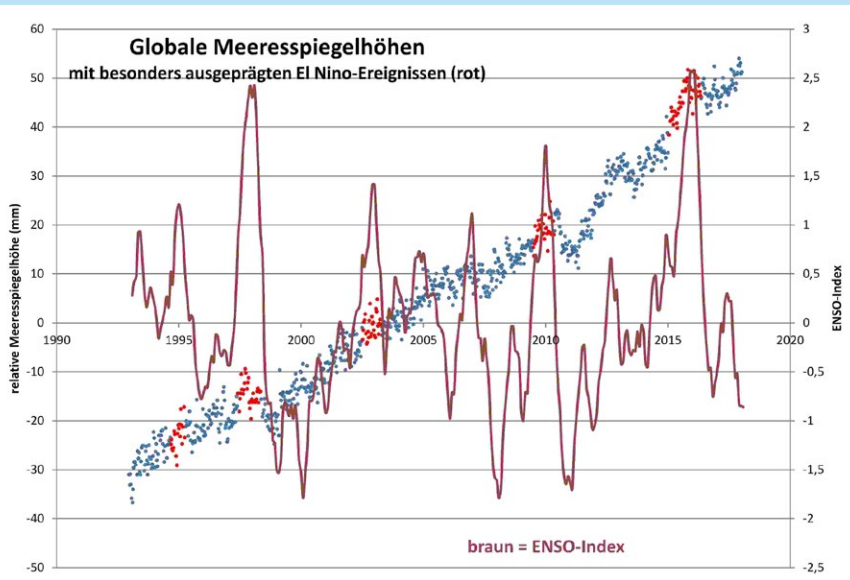


Abb. 6. Vergleich Meeresspiegelhöhen und ENSO-Index (eigene Darstellung)

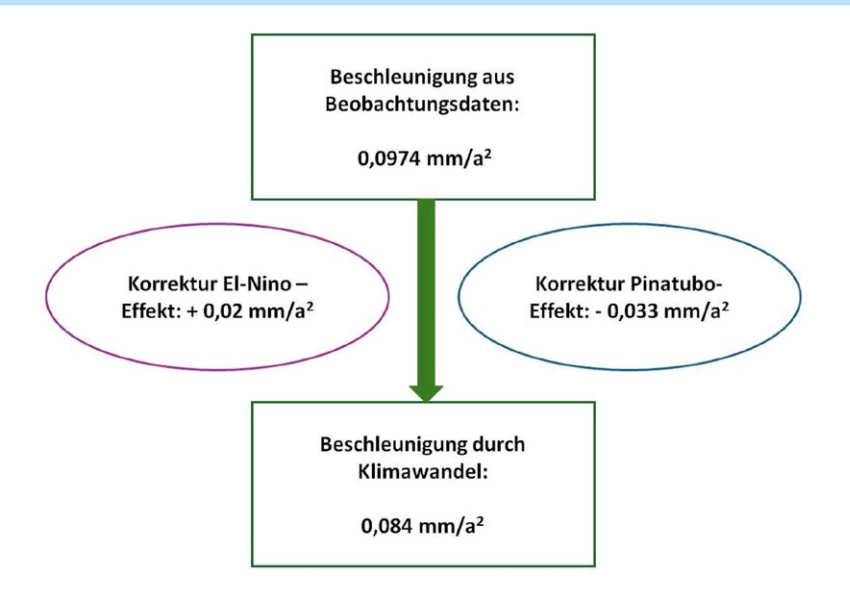


Abb. 7. Korrekturen der Beschleunigung

Die statistischen Verfahren, nach denen NEREM et al. (2018) die Effekte als Veränderungen der globalen Meeresspiegelhöhe quantifiziert habt, sind in der Schule nicht nachvollziehbar. Stellt man aber die relativen Meeresspiegelhöhen zusammen mit dem ENSO-Index in einer Grafik dar (Abb. 6), kann man feststellen, dass bei starkem El Niño „lokale Maxima“ und bei starkem La Nina „lokale Minima“ auftreten. Um es noch deutlicher zu machen, sind in Abbildung 6 für die fünf stärksten El Niño-Ereignisse die Meeresspiegelhöhen rot eingezeichnet, bei denen nach dem oben genannten Kriterium von einem El Niño-Effekt gesprochen werden kann. Physikalisch ist der Zusammenhang klar: Eine Erwärmung des Wassers führt oberhalb von 4 °C zu einer Dichteabnahme und damit zu einer Zunahme des Wasservolumens (Thermische Ausdehnung). Durch Angabe der in der Studie für diesen Effekt abgeschätzten Beschleunigungsänderung kann man aus den eigenen Daten und den Korrekturergebnissen die im Zeitungsbericht (Kasten 1) genannte Beschleunigung von $0{,}08\ \mathrm{mm/a^2}$ verifizieren (Abb. 7).

7 Überprüfung des Trends mit neueren Daten

2022 veröffentlichten NEREM, FREDERIKSE & HAMLINGTON noch einmal ein Update (Tabelle 1), weil zu dem Zeitpunkt Daten über ein 30-Jahre-Intervall vorlagen. Beobachtungen von Klimaveränderungen erfordern in der Regel mindestens 30-Jahre-Zeiträume.

Da bietet es sich an, auf der Basis der neuen Beobachtungen die These vom quadratischen Trend zu überprüfen. Dazu werden hier die auf der Webseite der Sea Level Research Group veröffentlichten Beobachtungsdaten bis Ende 2025 (*gmsl_vergleich_2018_2025.xlsx*) verwendet, für die ebenfalls saisonale Effekte und GIA herausgerechnet sind. Allerdings ist aufgrund eines veränderten Verfahrens die Bezugsgröße nun der Mittelwert der Beobachtungsdaten von 1993 bis 1999 (vorher von 1993–2018). Zum Vergleich werden deshalb die Daten von 2018 um $16{,}1\ \mathrm{mm}$ – die durchschnittliche Differenz der beiden Datensätze – angehoben. Die Abbildung 8 zeigt, dass die Zeitreihen dann ganz gut vergleichbar sind. Die eingezeichnete quadratische Trendfunktion macht deutlich, dass die neueren Daten ab 2018 leicht unterhalb des Funktionsgraphen liegen. Lässt man die quadratische Trendfunktion für die Daten von 1993 bis 2025 berechnen, so erhält man $f_2\ (t) = 0{,}0354t^2 - 138{,}83t + 136046$. Damit liegt die Beschleunigung mit etwa $0{,}071\ \mathrm{mm/a^2}$ etwas niedriger als bei den ursprünglichen Daten. Mit $f_2\ (2050) = 213$ und einer gemessenen Höhe von ca. $75\ \mathrm{mm}$ für 2020 erhält man die Prognose, dass der Meeresspiegel 2050 um $13{,}8\ \mathrm{cm}$ über dem von 2020 liegt.

Jährliche Änderung*)	Beschleunigung*)	Meeresspiegelanstieg
$3{,}3\ \mathrm{mm/a}$	$0{,}083\ \mathrm{mm/a^2}$	$16{,}4\ \mathrm{cm}$ höher als 2020
*) für den Zeitraum 1993 – 2020		

Tabelle 1. Ergebnisse der NEREM-Studie (2022)

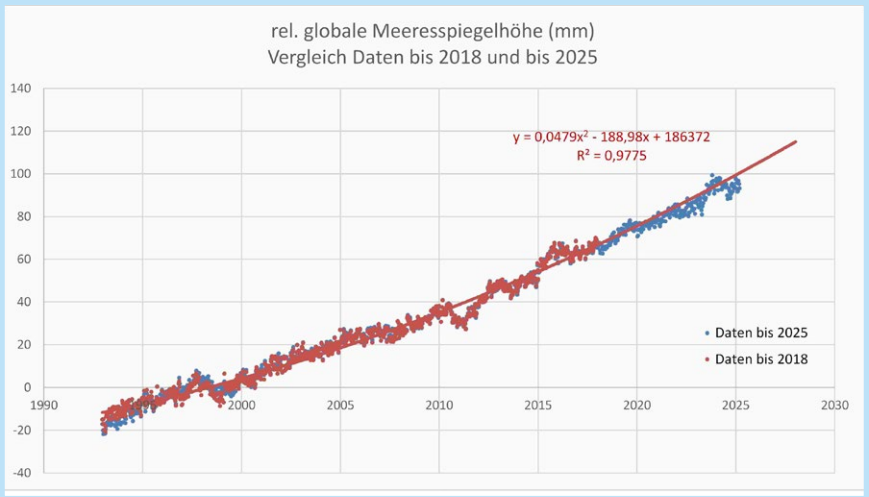


Abb. 8. Vergleich der Daten, die quadratische Trendfunktion (rot) gehört zu den Daten bis 2018.

Da aber in beiden Fällen nicht die um ENSO- und Pinatubo-Effekte herausgerechneten Daten vorliegen, kann man sich an die Studienaussage (NEREM, 2022) halten, nach der sich die Beschleunigung nach 2017 stabilisiert, wenn man Zeitintervalle von 1993 bis zu verschiedenen Endzeiten (2017, 2018 … 2022) betrachtet.

8 Trends und sachlogische Plausibilität

Wie gezeigt wurde, liefern die quadratischen Trendfunktionen eine sehr gute Anpassung an die Zeitreihen. Aber ist das Zufall oder gibt es dafür auch gute Begründungen?

Wie schon auf den vorherigen Seiten argumentiert, sind die thermische Ausdehnung des Wassers und das Abschmelzen von Landeis (Gletscher, Arktis und Antarktis) die Hauptgründe dafür. Das ist aber noch keine Begründung für die nachgewiesene Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs. Dafür braucht es den Nachweis, dass auch diese beiden Faktoren sich in der neueren Zeit dynamisch verändern.

NEREM (2018) gibt in seiner Studie an, dass er die Eisschmelze für den entscheidenden Treiber beim Meeresspiegelanstieg hält. Beim Britisch Antarctic Survey gibt es Daten zu den Eismassenverlusten auf Grönland und in der Antarktis. Die sind monatlich notiert und passen deshalb nicht zu den Meeresspiegeldaten, die einen 10-Tage-Abstand haben. Um die Korrelation zwischen beiden Größen zu untersuchen, wurde zu jedem Eismassenverlust die zeitlich jeweils passende Meeresspiegelhöhe ermittelt. Die Datei *korrelation_gmsl_eisverlust.xlsx* enthält beide Datensätze. Schon die Darstellung der kumulierten Eisverluste (Abb. 9) zeigt deutlich die wachsende Abnahme seit etwa 2016. Trägt man die Meeresspiegelhöhe gegen den Eisverlust auf, so zeigt sich, dass zwischen beiden ein sehr starker negativer Zusammenhang besteht, d.h. je mehr Eis schmilzt, umso stärker steigt der Meeresspiegel.
Die Korrelationskoeffizient beträgt $r = -0{,}9744$. Man bestimmt ihn als Wurzel des Bestimmtheitsmaßes oder mithilfe des Excel-Befehls *Korrel(Bereich1;Bereich2)*.

Und gibt es auch Hinweise auf eine verstärkte thermische Ausdehnung des Wassers? FOSTER & RAHMSTORF (2026) haben gerade erst nachgewiesen, dass sich der globale Durchschnittstemperaturanstieg nach Entfernung nicht-anthropogener Einflüsse (ENSO, Vulkanausbrüche etc.) ab etwa 2015 ebenfalls signifikant beschleunigt. Das muss sich auch auf die Temperatur des Meerwassers auswirken. Dazu kann man z.B. Daten zur Entwicklung der Global Ocean Sea Surface Temperature (SST) des Copernicus Marine Service nutzen. Die Darstellung der Zeitreihe zeigt ausgeprägte lokale Maxima und Minima, die zu den besonders starken El Niño- bzw. La Niña-Ereignissen passen. Die quadratische Trendfunktion zeigt im Vergleich mit der Trendgerade eine bessere Anpassung. Allerdings ist das Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0{,}677$ wegen der starken Schwankungen deutlich

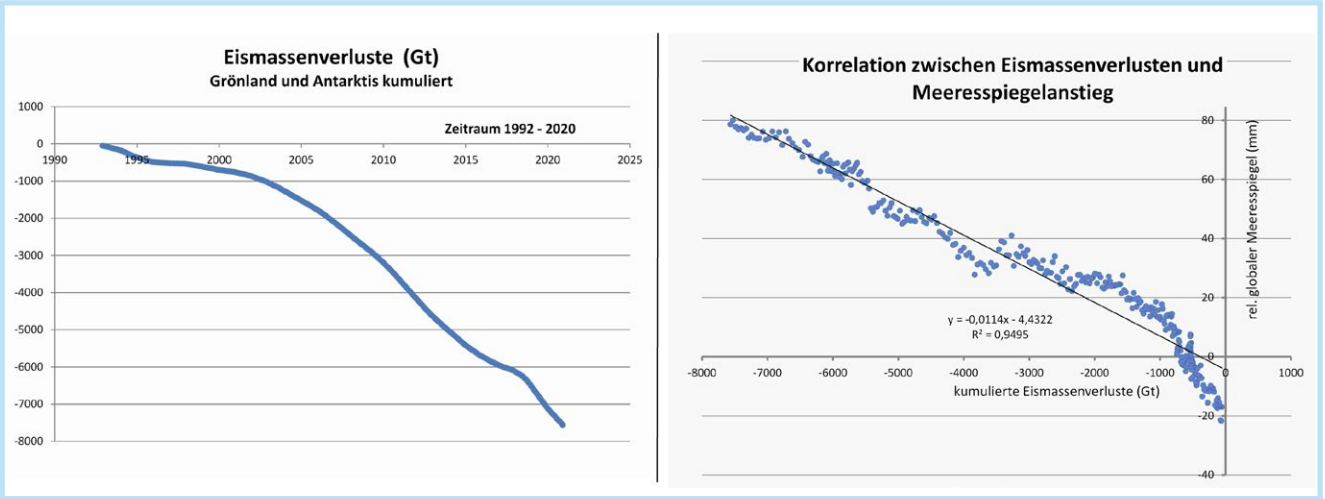


Abb. 9. Eismassenverluste in Grönland und Antarktis und die Korrelation mit dem Anstieg des globalen Meeresspiegels

kleiner als beim Eismassenverlust mit $0{,}9912$. Die Korrelation zwischen diesen zwei Größen liegt mit $r = 0{,}8432$ dennoch in dem Bereich $(r > 0{,}7)$, der auf einen starken Zusammenhang hinweist.

9 Fazit

Mit Blick auf den Titel dieses Beitrags war von Anfang an klar, dass dazu keine eindeutige Aussage möglich ist. Nerem (2022) zeigt über einen t-Test, dass die Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit größer als Null ist. Diese Untersuchungsmethoden stehen in der Schule nicht zur Verfügung. Daher zeigt der Beitrag mit Hilfe von datengestützten Trenduntersuchungen zweier bekannter Treiber des Meeresspiegelanstiegs sowie Korrelationsberechnungen zwischen ihnen und der relativen globalen Meeresspiegelhöhe auf, dass man schon von einer deutlichen Beschleunigung ausgehen kann. Die physikalischen Grundlagen weisen klar auf kausale Zusammenhänge hin.
Im Moment kommen alarmierende Informationen u.a. aus dem Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), dass sich die AMOC (Atlantic Meridional Overturning Circulation) abschwächt. Welche Veränderungen sich daraus für den Meeresspiegelanstieg ergeben könnten, ist noch gar nicht abzusehen.
Wenn nicht anders angegeben sind alle hier angegebenen Dateien auf der Homepage des Autors zu finden unter https://warmeling.de/materialien-zum-beitrag-meeresspiegelhoehe/. Unter dem Punkt „Arbeitsblätter“ gibt es vier Arbeitsblätter, die die Durchführung einer Unterrichtsreihe im hier skizzierten Sinn ermöglichen.

Literatur

Baldenhofer, K. G. *Das ENSO-Phänomen*. https://www.enso.info/enso.html.

Böer, H. (2015). Regression und Korrelation – MUED-Broschüre, ISBN 978-3-390197-67-5.

Britisch Antarctic Survey. https://data.bas.ac.uk/full-record.php?id=GB/NERC/BAS/PDC/01477.

Copericus Marine Service https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_OMI_TEMPSAL_sst_area_averaged_anomalies/files?subdataset=-global_omi_tempsal_sst_area_averaged_anomalies_202511.

Engagement Global (2025). *Orientierungsrahmen Globale Entwicklung – Bildung für nachhaltige Entwicklung in der gymnasialen Oberstufe. OR-Fachausgabe Mathematik*. https://www.engagement-global.de/de/orientierungsrahmen.

Fasullo, J., Nerem, R. & Hamlington, B. (2016). Is the detection of accelerated sea level rise imminent? *Sci Rep 6*, 31245. https://doi.org/10.1038/srep31245.

Fock, A., Heinz, C., Lehrmann, D., Just, J. & Siller, H.-S. (2025). Korrelation und Kausalität mit digitalen Werkzeugen – Ein Vergleich von Tabellenkalkulationsprogrammen und dem Visualisierungstool Gapminder, *Stochastik in der Schule 45*(3), 12–21.

Foster, G. Rahmstorf, S. (2026). Global warming has accelerated significantly. *Geophysical Research Letters, 53*, e2025GL118804. https://doi.org/10.1029/2025GL118804.

GSFC (2020). *Global Mean Sea Level Trend from Integrated Multi-Mission Ocean Altimeters*.

TOPEX/Poseidon, Jason-1, OSTM/Jason-2, and Jason-3 Version 5.0 Ver. 5.0 PO.DAAC, CA, USA. Dataset accessed [2025-12-02] at http://dx.doi.org/10.5067/GMSLM-TJ150.

NASA. *Understanding Sea Level*. https://sealevel.nasa.gov/understanding-sea-level/global-sea-level/overview/.

Nerem, R.S, Beckley, B.D., Fasullo, J.T., Hamlington, B. D., Masters, D. & Mitchum, G.T. (2018). Climate-change–driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 115*(9), *2022–2025*. https://doi.org/10.1073/pnas.1717312115.

Nerem, R. S., Frederikse, T. & Hamlington, B. D. (2022). Extrapolating empirical models of satellite-observed global mean sea level to estimate future sea level change. *Earth's Future, 10, e2021EF002290*. https://doi.org/10.1029/2021EF002290.

Antonius Warmeling, aw_hagen@online.de, unterrichtete 40 Jahre lang die Fächer Mathematik und Chemie am Fichte-Gymnasium in Hagen und engagiert sich zudem ehrenamtlich im Verein MUED e.V. Sein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Vermittlung von Bildung für Nachhaltige Entwicklung (BNE) im Mathematikunterricht.