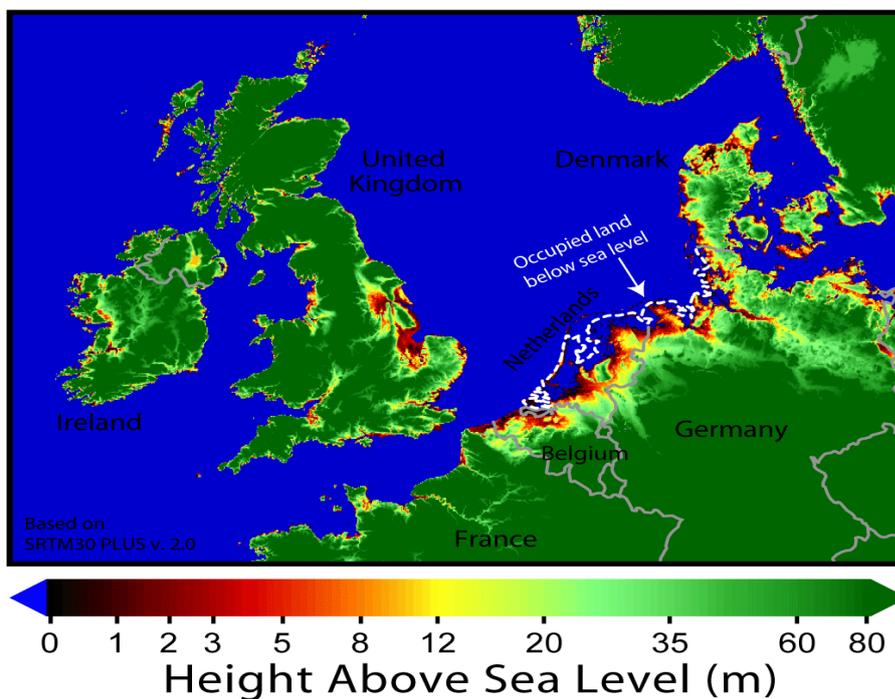


Landeshauptstadt Hannover



Sea Level Risks - North Sea



19.70

Wenn sich die Ozeane ausdehnen...

Ein geographisch-physikalisches Unterrichtsprojekt
zwischen Taschenrechner und physikalischen Kleinexperimenten

August 2014

Herausgeber: Landeshauptstadt Hannover
Schulbiologiezentrum Hannover

Titel: Wenn sich die Ozeane ausdehnen...
Ein geographisch-physikalisches Unterrichtsprojekt
zwischen Taschenrechner und physikalischen Kleinexperimenten

Titelbild: Robert A. Rohde / Global Warming Art

Arbeitshilfe 19.70

Verfasser: Ingo Mennerich

Herausgeber: Landeshauptstadt Hannover
Fachbereich Bibliothek und Schule
Schulbiologiezentrum
Vinnhorster Weg 2
30419 Hannover
Tel: 0511/168-47665
Fax: 0511/168-47352
E-Mail: schulbiologiezentrum@hannover-stadt.de
Internet: www.schulbiologiezentrum.info

Inhalt

Einige Sätze vorweg: Hannover und die "Südfriesischen Inseln"	1
Meeresspiegelanstieg durch Abschmelzen des Festlandeises (Antarktis, Grönland)	2
Meeresspiegelanstieg durch Erwärmung der Ozeane? Die Position des IPCC 2007	3
Versuch macht klug: Eine erste Annäherung an das Phänomen "Ausdehnung"	4
Empirische Werte mit Cola-Flasche, Thermometer und Messpipette	5
Tatsächliche Werte: Volumenveränderung von Wasser bei Erwärmung	6
Wie stark könnte der Meeresspiegel durch thermische Ausdehnung steigen?	7
Arbeitsblatt: Dehnen sich die Ozeane bei Erwärmung aus? Steigt dadurch der Meeresspiegel?	9
Bis in welche Tiefe erwärmt sich das Wasser?	10
• Hypsometrie: Tiefen- und Temperaturprofil der Weltmeere	
• Durchschnittliches Temperaturprofil der Weltmeere	
Wie verhält sich Wasser unter hohem Druck?	12
Verhalten sich Süß- und Salzwasser bei Erwärmung gleich?	13
Eine Hypothek für die Zukunft: Die Wärmekapazität der Weltmeere	15
Arbeitsblatt: Wie verhalten sich Luft und Wasser bei Erwärmung?	16
Quellen im Internet (Auswahl)	17

Einige Sätze vorweg: Hannover und die "Südfriesischen Inseln"

Wir fliegen gerne ans Mittelmeer oder in die Karibik. Ersatzweise geht´s ins wohltemperierte Schwimmbad, ins Badeland oder in den quirligen HotSpa. Warmes Wasser ist schön, befinden wir uns doch bei etwa 27°C Wassertemperatur im thermischen Gleichgewicht mit der Umgebung. Genau richtig: Nicht zu kalt und nicht zu warm. Wer sollte also etwas gegen so etwas wie eine "globale Erwärmung" haben? Sie könnte doch zur Folge haben, dass die nahe Nordsee so warm wird wie das ferne Rote Meer in Hurghada!

Wer nach Norderney oder Amrum fährt, trifft dort auf eher mäßige Wassertemperaturen und träumt dann vom nächsten Urlaub in Tunesien. Möglicherweise bringt uns die "globale Erwärmung" in nicht allzu ferner Zeit die Nordsee direkt vor die (hannoversche) Haustür. Vielleicht ragen dann der Kronsberg, der Benther- und Gehrdeiner Berg als "Südfriesische" Inseln" aus der zur "Südsee" gewordenen Nordsee heraus, während der Deister den Beginn des südlich angrenzenden Festlandes markiert. Das untergegangene Hannover wird zum Taucherparadies und "Mein Schiff" legt in Barsinghausen mit Kurs "Heide-Insel", dem ehemaligen Wilseder Berg ab...

Hallo, hat da jemand zu viel Phantasie? Schießt das Szenario nicht weit über die zu erwartende Realität hinaus?

Eins ist sicher: Das Festlandeis der Polkappen entlässt beim Abschmelzen Unmengen von Wasser. Ein weiterer Aspekt wird oft übersehen: Wasser dehnt sich bei Erwärmung aus. Wie stark würde der Meeresspiegel allein dadurch ansteigen?

Kann man das in der Schule experimentell erforschen? Können Schülerinnen und Schüler solche Experimente selbst "erfinden" und gegebenenfalls optimieren? Lassen sich die im Kleinen gewonnenen Ergebnisse auf die reale Welt übertragen?

Wir wollen Sie mit dieser Arbeitshilfe dazu anregen, genau dieses einmal auszuprobieren. Und eins sei vorweg gesagt: Die Erkenntnisse, die man aus den Experimenten und Rechnereien ziehen kann deuten auf eine Zukunft hin, die sich von dem "phantastischen" Szenario gar nicht so stark

unterscheidet. Wir Norddeutschen sind stark betroffen: Das Titelbild dieser Arbeitshilfe macht das sehr deutlich.

Wenn wir hier einen forschenden Ansatz zum "Meeresspiegelanstieg" propagieren ist uns bewusst, dass wir keine wirkliche Wissenschaft betreiben und viele Dinge stark vereinfachen. Genauere Prognosen überlassen wir den Fachleuten.

Was wir aber erreichen möchten ist, dass Schülerinnen und Schüler, ausgehend von als eigenen, als "brennend" empfundenen Fragen selbst naturwissenschaftliche Methoden entwickeln und zu Lösungen finden.

Das ist, ganz kurz gefasst, die Philosophie der "inquiry based scientific education" (IBSE) der wir uns seit Jahren verpflichtet fühlen und die wir in dem EU-Projekt "Biodiversität und Klimawandel" mit großem Erfolg praktisch umgesetzt haben.

Wir hoffen, dass Ihnen diese "Arbeitshilfe" auch in diesem Sinne eine Hilfe ist.

Meeresspiegelanstieg durch Abschmelzen des Festlandeises (Antarktis, Grönland)

Wir haben im Rahmen mehrerer Unterrichtsprojekte versucht, mit Schülerinnen und Schülern den durch das vollständige Abschmelzen des grönländischen und antarktischen Festlandeises hervorgerufenen Meeresspiegelanstiegs zu berechnen. Die mit dem Taschenrechner ermittelten Werte stimmen gut mit den Ergebnissen des IPCC oder der Max-Planck-Gesellschaft überein.

Daten (Ozeane, Festlandeis), Alle Daten: Wikipedia

Ozeane/Meere:	
Fläche	362033000 km ²
Durchschnittliche Tiefe	3,73 km
Volumen	1349930000 km ³

Antarktis:	
Vom Eis bedeckte Fläche:	13856000 km ²
Durchschnittliche Dicke des Eises	1,9 km
Volumen des Festlandeises	26370000 km ³

Grönland	
Vom Eis bedeckte Fläche	1710000 km ²
Durchschnittliche Dicke des Eises	1,6 km
Volumen des Festlandeises	2850000 km ³

1 m ³ Eis =	0,917 m ³ Wasser
------------------------	-----------------------------

Eine einfache Überschlagsrechnung ergibt:

Wird den Ozeanen das Schmelzwasser des antarktischen und grönländischen Gletschereises hinzugefügt ergibt sich eine Volumenzunahme um

$$\frac{(26370000 \text{ km}^3 + 2850000 \text{ km}^3) \times 0,917}{1349930000 \text{ km}^3} \times 100 = 1,98\%$$

Bezogen auf eine Durchschnittstiefe von 3730 m würde der Meeresspiegel um

$$\frac{3730 \text{ m}}{100} \times 1,98\% = 74 \text{ m ansteigen}$$

Meeresspiegelanstieg durch Erwärmung der Ozeane? Die Position des IPCC 2007

Das IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) stellt im Synthesebericht "Klimaänderungen 2007" fest:

- "Risiken großräumiger Singularitäten: Es besteht ein hohes Vertrauen darin, dass seine globale Erwärmung über viele Jahrhunderte hinweg zu einem Meeresspiegelanstieg allein wegen der **Wärmeausdehnung** führen würde, der als sehr viel größer projiziert wird, als über das 20. Jahrhundert betrachtet. Damit verbunden wären Verluste von Küstenregionen und weitere Auswirkungen."*
- "Der Meeresspiegelanstieg ist bei Erwärmung unvermeidbar. Die **Wärmeausdehnung** würde unabhängig vom bewerteten Stabilisierungsniveau viele Jahrhunderte nach einer Stabilisierung der THG**-Konzentrationen anhalten, was einen endgültigen Meeresspiegelanstieg erzeugen würde, der viel größer wäre als für das 21. Jahrhundert projiziert."*

Tabelle SPM.6. Charakteristika von post-TAR-Stabilisierungsszenarien sowie die daraus resultierende langfristige globale Gleichgewichtstemperatur und die Komponente des Meeresspiegelanstiegs ausschließlich durch Wärmeausdehnung. (Tabelle 5.1)^a

Kategorie	CO ₂ -Konzentration bei Stabilisierung (2005 = 379 ppm) ^b	CO ₂ -Äq.-Konzentration bei Stabilisierung einschließlich THG und Aerosole (2005 = 375 ppm) ^b	Jahr maximaler CO ₂ -Emissionen ^{a,c}	Änderung globaler CO ₂ -Emissionen im Jahr 2050 (% der Emissionen in 2000) ^{a,c}	Mittlerer globaler Gleichgewichtstemperaturanstieg über die vorindustriellen Werte unter der Verwendung einer „bestmöglichen Abschätzung“ der Klimasensitivität ^{d,e}	Mittlerer globaler Gleichgewichtsmeeresspiegelanstieg über die vorindustriellen Werte nur aus Wärmeausdehnung ^f	Anzahl bewerteter Szenarien
	ppm	ppm	Jahr	Prozent	°C	Meter	
I	350 - 400	445 - 490	2000 - 2015	-85 bis -50	2,0 - 2,4	0,4 - 1,4	6
II	400 - 440	490 - 535	2000 - 2020	-60 bis -30	2,4 - 2,8	0,5 - 1,7	18
III	440 - 485	535 - 590	2010 - 2030	-30 bis +5	2,8 - 3,2	0,6 - 1,9	21
IV	485 - 570	590 - 710	2020 - 2060	+10 bis +60	3,2 - 4,0	0,6 - 2,4	118
V	570 - 660	710 - 855	2050 - 2080	+25 bis +85	4,0 - 4,9	0,8 - 2,9	9
VI	660 - 790	855 - 1130	2060 - 2090	+90 bis +140	4,9 - 6,1	1,0 - 3,7	5

*) Hervorhebungen durch den Autor, **) THG = Treibhausgase

Greenpeace Magazin 03.09, "Der Pegel steigt":

- Die größte Wirkung hat derzeit nicht etwa zusätzlich ins Weltmeer fließendes Schmelzwasser, sondern die „thermische Ausdehnung“ des bereits in den Ozeanen befindlichen Wassers. Dessen Volumen vergrößert sich mit steigender Temperatur, vor allem in warmen Meeren. Der Effekt lässt sich relativ präzise berechnen: Mit 1,6 Millimetern jährlich ging laut IPCC in der Dekade 1993 bis 2003 etwa die Hälfte des Pegelanstiegs auf sein Konto.

Versuch macht klug: Eine erste Annäherung an das Phänomen "Ausdehnung"

Eine Schale wird randvoll mit kaltem Wasser aus dem Kühlschrank gefüllt und stehen gelassen. Nach einigen Stunden hat das Wasser die Umgebungstemperatur angenommen.

Was wird geschehen?

Wasser dehnt sich, so wie andere Stoffe auch, bei Erwärmung aus.

Eine gleichbleibende Anzahl Wassermoleküle nimmt einen größeren Raum ein:

Bei unveränderter **Masse** nimmt das **Volumen** zu (dabei nimmt die **Dichte** ab!).

Läuft das Wasser nun über oder nicht?

Daran knüpfen sich weitere Fragen:

- Wie stark dehnt sich Wasser aus?
- Hängt das von der "Menge" Wasser ab?
- Oder der Größe der Schale?
- Oder ihrer Form?
- Wird die Ausdehnung durch die Verdunstung (über)kompensiert?

Der kleine, in jeder Küche durchführbare Versuch eröffnet eine globale Perspektive:

Unsere Erde ist in erster Linie von Wasser bedeckt und das Volumen der Ozeane ist deutlich größer als die der über dem Meeresspiegel liegenden Landmassen. (Globus/Hypsometrische Kurve, s.u.)

Nun sagen die Klimaforscher, es solle wärmer werden.

Steigt der Meeresspiegel durch die Erwärmung der Ozeane?

Ja, das tut er! Und die Wissenschaft hat einen Namen dafür:

Thermosterischer Meeresspiegelanstieg.

Die Frage ist nur:

- In welcher Größenordnung bewegt er sich?
- In welcher Relation steht er zu anderen Ursachen des Anstiegs, z.B. der Gletscherschmelze?

Und schließlich: Sollte, was sehr wahrscheinlich ist, die oben genannte Schale nicht überlaufen,

- wäre das dann ein Beweis für die Nichtexistenz dieses Phänomens?
- Liegt es möglicherweise an der zwischenzeitlichen Verdunstung?
- Oder haben wir vielleicht die falsche Methode gewählt?
- Und: Gibt es dann eine bessere?

Um Wasserverluste durch Verdunstung auszuschließen kann man eine mit Wasser gefüllte Flasche verschließen, in den Kühlschrank stellen, den und anschließend ins Warme stellen. Dehnt sich das Wasser aus? Steigt der Wasserpegel?

Nicht jede Flasche zeigt den Effekt gleich gut. Besonders gut geeignet sind solche mit langem schmalen Hals, z.B. Weinflaschen.

Vielleicht wird den Schülerinnen und Schülern bei diesen Einstiegsversuchen auch schon deutlich, dass ein größeres Wasservolumen eine entsprechend größere (absolute) Ausdehnung zur Folge hat und dass man den Querschnitt des "Messbereichs" stark verengen muss.

Empirische Werte mit Cola-Flasche, Thermometer und Messpipette

Wie stark dehnt sich Wasser durch Erwärmung aus?

Das lässt sich empirisch ermitteln, indem man ein bestimmtes, genau abgemessenes Volumen Wasser um eine bestimmte Temperatur erwärmt. Die Ausdehnung ist relativ zum Gesamtvolumen nur gering und nur sicht- und messbar, wenn der Wasserspiegel, wie bei einem Thermometer, auf einen kleinen Querschnitt verengt wird. Man muss dem mit Wasser gefüllten Gefäß also ein Rohr aufsetzen, am besten eine mit einer passenden Skala versehene Messpipette.



Eine einfach herzustellende Messapparatur besteht aus einer bis zum Rand mit (angefärbtem) Wasser gefüllten Flasche aus Glas oder festem Kunststoff, einem durchbohrten Stopfen, einer Messpipette und einem Thermometer.

- Das die Flasche vollständig ausfüllende Wasservolumen wird mit einem **Messzylinder** bestimmt.
- Zur besseren Sichtbarmachung des Pegels geben wir etwas **Farbstoff** ins Wasser.
- Zur Temperaturkontrolle benutzen wir ein mit einem externen **Drahtfühler** ausgestattetes **Digital-Thermometer z.B.** der Fa. GREISINGER (GTH1150). Der Drahtfühler wird von oben so durch die Messpipette geschoben, dass das messende Ende etwa in der Mitte der Flasche liegt.

Beim vorsichtigen Hineindrücken des Stopfens muss darauf geachtet werden, dass kein Wasser verloren geht. Unvermeidlich ist, dass dabei etwas Wasser in der Messpipette aufsteigt. Der Inhalt der Flasche wird im Wasserbad erwärmt und die Temperatur- und Volumenzunahme protokolliert.

Wir haben gute Resultate mit einer 0,5 Liter Coca-Cola-Flasche und einer 10ml Messpipette (0,1 ml Auflösung) erzielt. Im Bereich von 15° - 30°C lag die gemessene Volumenzunahme pro Grad Celsius zwischen 0,1ml im unteren und 0,2ml im oberen Temperaturbereich. 0,1ml bzw. 0,2 ml Volumenzunahme pro Grad Celsius sind, bezogen auf in diesem Fall 540ml Flüssigkeitsvolumen

$$\frac{0,1\text{ml}}{540\text{ml}} \times 100 = 0,019\%$$

$$\text{bzw. } \frac{0,2\text{ml}}{540\text{ml}} \times 100 = 0,037\%$$

Tatsächliche Werte: Volumenveränderung von Wasser bei Erwärmung

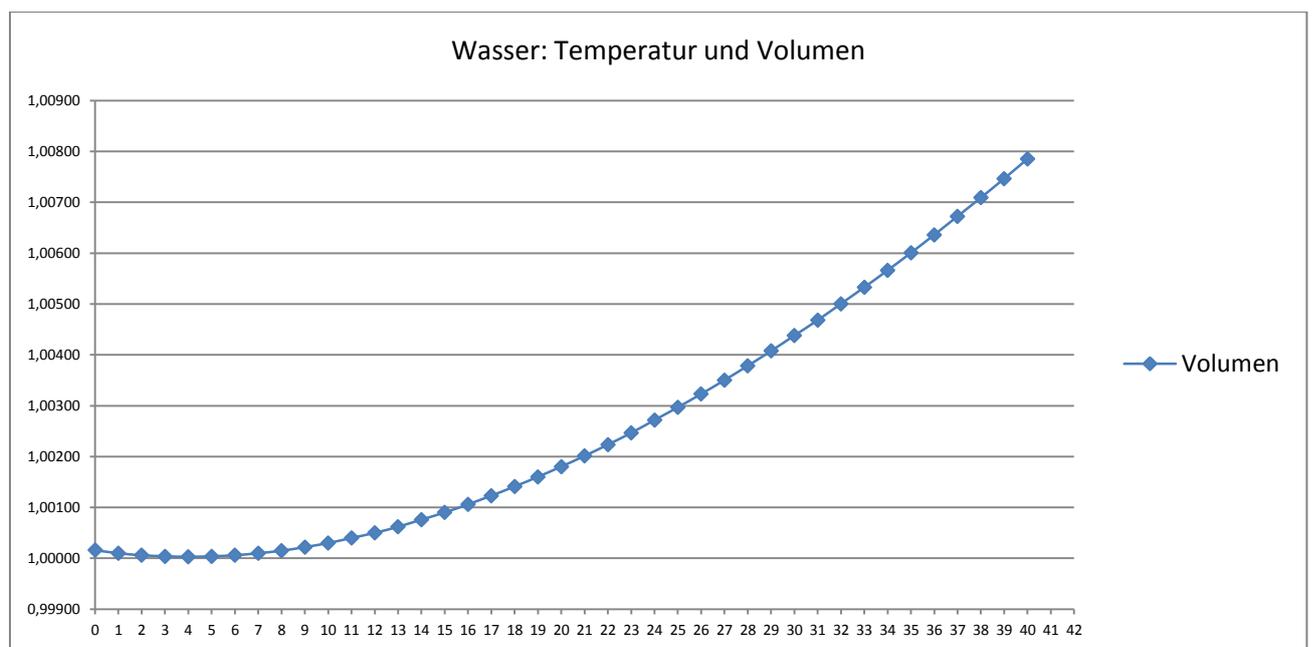
Die Tabelle zeigt die Standardwerte für das Volumen und die Volumenveränderung ($\Delta V/^\circ\text{C}$ bzw. $\Delta V\%/^\circ\text{C}$) von 1000ml Wasser in einem Temperaturbereich zwischen 0 und 40°C.

Dabei wird deutlich,

- dass Wasser bei 4°C seine größte Dichte, d.h. das geringste Volumen einnimmt (Anomalie des Wassers)
- dass (flüssiges) Wasser sich oberhalb und unterhalb von 4°C ausdehnt
- dass die Ausdehnung nicht linear verläuft
- dass die Ausdehnung in einer Größenordnung von hundertstel Prozent pro Grad liegt

T°C	Volumen (ml)	$\Delta V_{\text{ml}}/^\circ\text{C}$	$\Delta V\%/^\circ\text{C}$	T°C	Volumen (ml)	$\Delta V_{\text{ml}}/^\circ\text{C}$	$\Delta V\%/^\circ\text{C}$
0	1000,16	0,00	0,000	20	1001,80	0,20	0,020
1	1000,10	0,06	0,006	21	1002,01	0,21	0,021
2	1000,06	0,04	0,004	22	1002,23	0,22	0,022
3	1000,04	0,02	0,002	23	1002,47	0,23	0,023
4	1000,03	0,01	0,001	24	1002,72	0,25	0,025
5	1000,04	0,01	0,001	25	1002,97	0,25	0,025
6	1000,06	0,02	0,002	26	1003,23	0,26	0,026
7	1000,10	0,04	0,004	27	1003,50	0,27	0,027
8	1000,15	0,05	0,005	28	1003,78	0,28	0,028
9	1000,22	0,07	0,007	29	1004,08	0,29	0,029
10	1000,30	0,08	0,008	30	1004,38	0,30	0,030
11	1000,40	0,10	0,010	31	1004,68	0,30	0,030
12	1000,50	0,10	0,010	32	1005,00	0,32	0,032
13	1000,62	0,12	0,012	33	1005,33	0,32	0,032
14	1000,76	0,14	0,014	34	1005,66	0,33	0,033
15	1000,90	0,14	0,014	35	1006,01	0,34	0,034
16	1001,06	0,16	0,016	36	1006,36	0,35	0,035
17	1001,23	0,17	0,017	37	1006,72	0,36	0,036
18	1001,41	0,18	0,018	38	1007,09	0,36	0,036
19	1001,60	0,19	0,019	39	1007,47	0,38	0,038
				40	1007,85	0,39	0,039

Quelle: Excel-Datei, Ingo Mennerich



Quelle: Excel-Kurve, Ingo Mennerich

Ideale Werte bei einer Messapparatur mit einer 0,5L Coca-Cola-Flasche (540ml)

Hier wurden die obigen Standardwerte umgerechnet auf das Fassungsvermögen einer Halbliter-Flasche Coca-Cola (etwa 540 ml) und davon ausgegangen, dass das Wasser eine Starttemperatur von 0°C hat.

T°C	Volumen ml	ΔVml/°C	ΔV%/°C	T°C	Volumen ml	ΔVml/°C	ΔV%/°C
0	540,09	0,00	0,000	21	541,09	0,11	0,021
1	540,05	0,03	0,006	22	541,21	0,12	0,022
2	540,03	0,02	0,004	23	541,33	0,12	0,023
3	540,02	0,01	0,002	24	541,47	0,14	0,025
4	540,02	0,01	0,001	25	541,60	0,14	0,025
5	540,02	0,01	0,001	26	541,74	0,14	0,026
6	540,03	0,01	0,002	27	541,89	0,15	0,027
7	540,05	0,02	0,004	28	542,04	0,15	0,028
8	540,08	0,03	0,005	29	542,20	0,16	0,029
9	540,12	0,04	0,007	30	542,36	0,16	0,030
10	540,16	0,04	0,008	31	542,53	0,16	0,030
11	540,22	0,05	0,010	32	542,70	0,17	0,032
12	540,27	0,05	0,010	33	542,88	0,17	0,032
13	540,34	0,06	0,012	34	543,06	0,18	0,033
14	540,41	0,08	0,014	35	543,24	0,19	0,034
15	540,49	0,08	0,014	36	543,43	0,19	0,035
16	540,57	0,09	0,016	37	543,63	0,20	0,036
17	540,67	0,09	0,017	38	543,83	0,20	0,036
18	540,76	0,10	0,018	39	544,03	0,20	0,038
19	540,87	0,10	0,019	40	544,24	0,21	0,039
20	540,97	0,11	0,020				

Bei einer Erwärmung von 540 ml von 18° auf 21°C beträgt die prozentuale Ausdehnung

0,019%
0,020%
0,021%

0,060%

Damit läge der Anstieg aller Ozeane bei

$$(3730\text{m} * : 100) \times 0,06 = 2,24\text{m}$$

*) Durchschnittliche Tiefe der Ozeane

Wie stark könnte der Meeresspiegel durch thermische Ausdehnung steigen?

Der Pegel eines Gewässers würde sich, eine gleichmäßige und durchgehende Erwärmung in allen Tiefen vorausgesetzt, je Grad Celsius um den oben genannten prozentualen Betrag erhöhen.

Für den durchschnittlich 2 m tiefen hannoverschen Maschsee folgt daraus ein Anstieg von z.B.

$$\frac{2\text{m}}{100} \times 0,019\% = 0,00038\text{m} \quad \text{oder} \quad \frac{2\text{m}}{100} \times 0,030\% = 0,0006\text{m}$$

im Bereich von 18-19°C bzw. 30-31°C also um nur kaum messbare 0,4 - 0,6 mm.

Würde die globale durchschnittliche Meerestiefe von 3730 m gleichmäßig um 1°C erwärmt ergäbe sich bei den gleichen Temperaturintervallen ein Anstieg von

$$\frac{3730\text{m}}{100} \times 0,019\% = 0,71\text{m} \quad \text{bzw.} \quad \frac{3730\text{m}}{100} \times 0,030\% = 1,12\text{m}$$

Achtung:

Dies gilt allerdings ausdrücklich nur unter der unwahrscheinlichen Bedingung, dass der gesamte Wasserkörper gleich warm ist, sich um den gleichen Betrag (1°C oder 1K) erwärmt, es sich um Süßwasser handelt und in allen Tiefen der gleiche Druck herrscht wie an der Oberfläche.

Man sieht schon hier: Der "thermosterische Meeresspiegelanstieg" ist viel komplexer als bisher gedacht.

Dehnen sich die Ozeane bei Erwärmung aus? Steigt dadurch der Meeresspiegel?

Ein **Thermometer** enthält Quecksilber oder gefärbten Alkohol.
Beide Stoffe dehnen sich bei Erwärmung aus. Je wärmer der Stoff, desto größer das Volumen.
Beim **Thermometer** steigt und fällt die Flüssigkeit in einem, mit einer **Skala** versehenen **Steigrohr**.

- Dehnt sich **Wasser** auch aus? Wenn ja, um welchen (prozentuellen) Betrag?
- Denke dir mit den bereitgestellten Materialien eine Methode aus, um das herauszufinden!
- Welche Konsequenzen hätte die durch den "Klimawandel" (Erderwärmung) verursachte Volumenzunahme des Meerwassers auf den Meeresspiegel?

Material:

- Glasflasche
- Stopfen (durchbohrt)
- Messpipette (Steigrohr)
- Gummischlauch
(zum Abdichten, nur wenn Bohrung des Stopfens zu groß ist!)
- Digital-Thermometer mit Drahtfühler

Hinweis:

- Der Drahtfühler des Thermometers lässt sich vorsichtig (!) von oben durch die Messpipette schieben.
- Es soll nur die Ausdehnung des Wassers, nicht die der Luft gemessen werden! Daher muss die Flasche vollständig mit Wasser gefüllt werden.



Lassen sich deine Ergebnisse auf den Maschsee übertragen?

Maschsee	
Fläche	800000 m ²
Durchschnittliche Tiefe	2 m

Um welchen Betrag stiege das Niveau des Maschsees, wenn das Wasser um _____°C wärmer würde?

Lassen sich deine Ergebnisse auf die Ozeane der Erde übertragen?

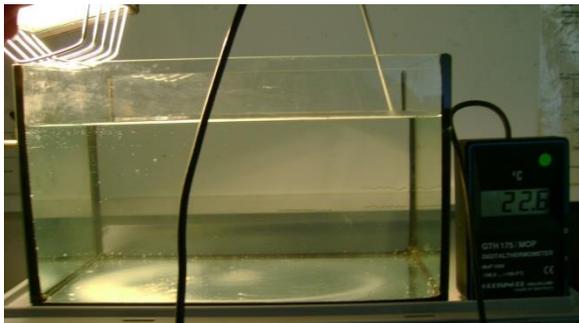
Ozeane/Meere:	
Fläche	362033000 km ²
Durchschnittliche Tiefe	3,73 km

Um welchen Betrag stiege das Niveau der Ozeane, wenn das Wasser um _____°C wärmer würde?
Erwärmt sich der Ozean überall und in jeder Tiefe um den gleichen Betrag?

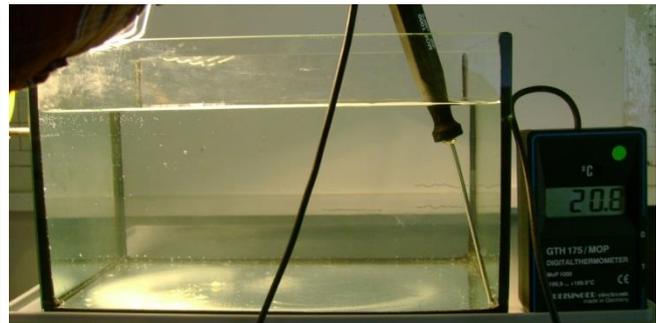
Bis in welche Tiefe erwärmt sich das Wasser?

Anders als Wasser im Kochtopf wird ein Gewässer von oben her durch die Sonne bzw. warme Luft erwärmt. Warmes Wasser ist "leichter", d.h. es hat eine geringere Dichte und steigt demnach auf. Im Kochtopf verdrängt das am Topfboden erhitze (konvektiv) aufsteigende Wasser das kühlere Oberflächenwasser, das dann entsprechend absinkt. Solche Konvektionsvorgänge spielen in von oben her erwärmten Gewässern keine Rolle. Sie zeigen eher eine stabile Schichtung. Die Erwärmung ist abhängig von der "Farbe" (Albedo) des Wassers: Durch Trübstoffe dunkles Wasser erwärmt sich leichter als klares Wasser.

Das alles kann man mit einem kleinen Aquarium, einem Strahler und einem Thermometer untersuchen. Hier werden deutliche Temperaturunterschiede zwischen Oberfläche und Boden sichtbar. Wenn man das Wasser mit schwarzer Tinte einfärbt, wird das noch deutlicher.



Wassertemperatur an der Oberfläche



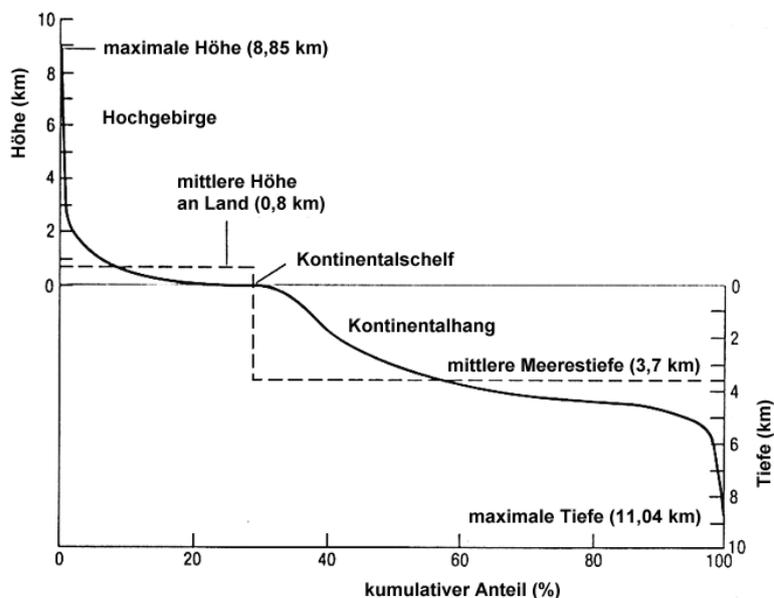
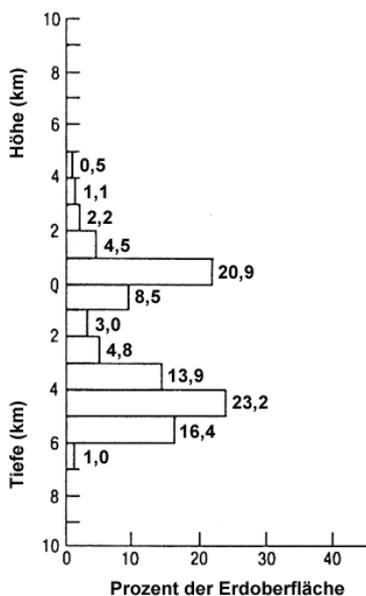
Wassertemperatur am Grund (Fotos: Ingo Mennerich)

Hypsometrie: Tiefen- und Temperaturprofil der Weltmeere

Schon beim Eintauchen in einen Baggersee merkt man: Nur die Oberfläche des Gewässers wird durch die Sonne erwärmt. Es wird mit zunehmender Tiefe kälter.

Das gilt natürlich erst recht für die noch viel tieferen Weltmeere.

Die Verteilung der Höhen und Tiefen auf der Erde gibt die Hypsometrische Kurve wieder:



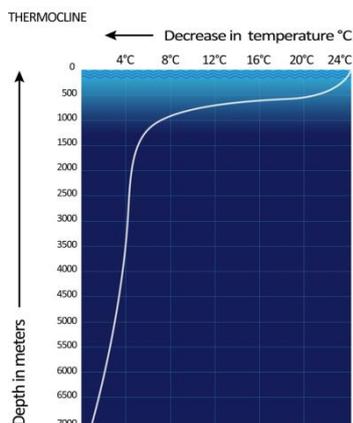
Quelle: Wikipedia, Zizzy, This file is licensed under the Creative Commons Attribution 2.0 Generic license.

Bei einer Gesamtoberfläche der Erde von 510.000.000 km² und 362033000 km² Meeresoberfläche ergeben sich die Flächen- und Volumenanteile folgender Meerestiefenbereiche:

Tiefe	Anteil % Erdoberfläche	Anteil % des Meeresfläche	Fläche km ²	Volumen km ³
-1000	8,5	12,0	43.350.000	43.350.000
-2000	3,0	4,2	15.300.000	15.300.000
-3000	4,8	6,8	24.480.000	24.480.000
-4000	13,9	19,6	70.890.000	70.890.000
-5000	23,2	32,7	118.320.000	118.320.000
-6000	16,4	23,1	83.640.000	83.640.000
-7000	1,0	1,4	5.100.000	5.100.000
-8000	-	-	-	-
-9000	-	-	-	-
-10000	-	-	-	-
-11000	-	-	-	-
	70,8	99,8	361.080.000	361.080.000

Durchschnittliches Temperaturprofil der Weltmeere

Das durchschnittliche Temperaturprofil der Ozeane zeigt die Abbildung "Thermocline":



Aus ihr geht hervor, dass die Erwärmung grob geschätzt nur in den oberen 700 m stattfindet.

Bei einer Gesamtfläche von 362033000 km² beträgt das Volumen des bis 700 m tiefen Wassers stark vereinfacht allerhöchstens 253423100 km³, also nur etwa 1/5 des Gesamt-Ozeanvolumens von 1349930000 km³

Wenn wir grob vereinfachend davon ausgehen, dass sich nur diese 700 m dicke Schicht ausdehnt ergäbe sich eine (thermosterische) Meeresspiegelerhöhung von

$$\frac{700\text{m}}{100} \times 0,019\% = 0,133\text{m} \quad \text{bzw.} \quad \frac{700\text{m}}{100} \times 0,030\% = 0,21\text{m}$$

Quelle: <http://en.wikipedia.org/wiki/Thermocline#mediaviewer/File:THERMOCLINE.png>

pro °Celsius (oder Kelvin) bei 18-19°C bzw. 30-31°C.

Die im ersten Ansatz bei Durchwärmung des gesamten undifferenzierten Wasserkörpers ermittelten Werte von 0,71 bzw. 1,12m/K liegen um etwa das Fünffache höher.

Nach diesem Muster kann man auch mit anderen Tiefen rechnen und auf Tabellenwerte zurückgreifen:

Raumausdehnungskoeffizient γ Wasser

(bei 0 °C) -0,068	(bei 20 °C) 0,207	(bei 100 °C) 0,782
-------------------	-------------------	--------------------

Der Ausdehnungskoeffizient γ von Wasser (20°C) von 0,207 bedeutet:

1000 ml Wasser dehnt sich bei 20°C um 0,207 ml aus wenn es 1°C (1K) wärmer wird.

In Prozent ausgedrückt:

$$\frac{0,207\text{ml}}{1000\text{ml}} \times 100 = 0,0207\%$$

γ_{Wasser} entspricht den bereits oben errechneten prozentualen Werten ($\Delta V\%/^{\circ}\text{C}$).
Wassertemperatur und Ausdehnungskoeffizient:

T°C	Ausdehnungs-Koeffizient γ	T°C	Ausdehnungs-Koeffizient γ	T°C	Ausdehnungs-Koeffizient γ
0	0,00	14	0,14	28	0,28
1	0,06	15	0,14	29	0,29
2	0,04	16	0,16	30	0,30
3	0,02	17	0,17	31	0,30
4	0,01	18	0,18	32	0,32
5	0,01	19	0,19	33	0,32
6	0,02	20	0,20	34	0,33
7	0,04	21	0,21	35	0,34
8	0,05	22	0,22	36	0,35
9	0,07	23	0,23	37	0,36
10	0,08	24	0,25	38	0,36
11	0,10	25	0,25	39	0,38
12	0,10	26	0,26	40	0,39
13	0,12	27	0,27		

Die Hypsometrische Kurve erlaubt die Volumina einzelner Tiefenbereiche zu berechnen. Wenn man ihnen die entsprechenden Temperaturen und die tiefenabhängige Erwärmung zuordnet, kann man ein wesentlich differenzierteres Bild zeichnen.

Wie verhält sich Wasser unter hohem Druck?

Die folgende Tabelle (www.thermopedia.com) zeigt dass der Ausdehnungskoeffizient mit dem Wasserdruck steigt.

Lässt dieses auf den ersten Blick paradoxe Verhalten den Schluss zu, dass in der Tiefsee schon geringere Temperatursteigerungen genügen um eine höhere Ausdehnung zur Folge zu haben?

P (bar)	t (°C)								
	0	20	50	100	150	200	250	300	350
1	-0.085 2	0.206 7	0.462 3						
5	-0.083 8	0.207 2	0.462 2	0.753 9	1.024				
10	-0.082 0	0.207 9	0.462 0	0.753 0	1.022				
50	-0.067 8	0.213 3	0.460 5	0.745 5	1.007	1.347	1.936		
100	-0.049 9	0.220 1	0.458 9	0.736 6	0.990 2	1.312	1.848	3.189	
150	-0.032 0	0.227 2	0.457 4	0.728 1	0.974 0	1.281	1.772	2.883	
200	-0.014 2	0.234 3	0.456 2	0.720 0	0.958 7	1.251	1.704	2.648	6.923
250	+0.003 3	0.241 6	0.455 1	0.712 2	0.944 2	1.224	1.643	2.460	5.162
300	0.020 5	0.248 9	0.454 2	0.704 7	0.930 3	1.198	1.589	2.306	4.276
350	0.037 3	0.256 2	0.453 4	0.697 5	0.917 2	1.175	1.539	2.176	3.718
400	0.053 5	0.263 6	0.452 8	0.690 7	0.904 6	1.152	1.494	2.065	3.324
450	0.069 0	0.270 9	0.452 3	0.684 1	0.892 6	1.131	1.453	1.968	3.027
500	0.083 6	0.278 2	0.452 0	0.677 7	0.881 1	1.111	1.415	1.884	2.791
600	0.110 0	0.292 6	0.451 7	0.665 7	0.859 6	1.075	1.348	1.742	2.439
700	0.131 7	0.306 5	0.451 8	0.654 5	0.839 7	1.042	1.290	1.626	2.186
800	0.147 5	0.319 6	0.452 3	0.644 1	0.821 3	1.012	1.238	1.530	1.994
900	0.156 5	0.331 7	0.453 0	0.634 3	0.804 2	0.984 4	1.193	1.448	1.843
1000	0.157 6	0.342 6	0.454 0	0.625 2	0.788 2	0.959 4	1.152	1.377	1.720

*B in $10^{-3}/\text{K}$.

- Gegen diese Vermutung spricht, dass sich die Temperatur des Tiefenwassers unterhalb der Sprungschicht (Thermokline) praktisch nicht verändert.
- Über 90% des Meerwassers befindet sich unterhalb der Thermokline in etwa 1000 m Tiefe.
- Die Temperaturen in diesen Tiefen liegen zwischen 0 und 3 Grad Celsius.
- Weiterhin macht der hohe auflastende Druck eine Ausdehnung unmöglich. Im Gegenteil: Am Boden des mehr als 10 km tiefen Marianengrabens ist die Dichte des Wassers bei Drücken von >1000 bar etwa 5% höher als an der Oberfläche. 100 Liter Wasser werden dort zu 95 Litern komprimiert! Siehe dazu nachfolgende Tabelle (Druck/Dichte Meerwasser)
- Zu vermuten ist, dass der hohe Umgebungsdruck ein freieres und stärkeres Schwingen von Wassermolekülen unterbindet und damit eine Temperaturerhöhung unmöglich macht.

- Daraus folgt: Ohne Temperaturerhöhung findet auch keine Ausdehnung statt.

Density changes with depth (seawater 35 parts per thousand and 0 °C)		
depth (m)	pressure (decibars)	density (g/cm³)
0	0	1.02813
1,000	1,000	1.03285
2,000	2,000	1.03747
4,000	4,000	1.04640
6,000	6,000	1.05495
8,000	8,000	1.06315
10,000	10,000	1.07104

Quelle: Encyclopaedia Britannica, "Seawater", Density and pressure of seawater

In den Werten der obigen Tabelle zeigt sich die (geringe) Kompressibilität des (Meer)wassers. Wäre Wasser inkompressibel, wären Dichte und Volumen in allen Tiefen gleich. Die Encyclopaedia Britannica macht eine interessante Rechnung auf: Würde der Druck einer 4000m tiefen Wassersäule auf den bei 2000m herrschenden Druck entlastet würde sie um 36 m steigen!

Verhalten sich Süß- und Salzwasser bei Erwärmung gleich?

- Dehnt sich Leitungswasser um den gleichen Betrag aus wie "Meerwasser".
- Erwärmt sich Leitungswasser um den gleichen Betrag wie "Meerwasser"?

Meerwasser hat einen durchschnittlichen Salzgehalt von 35%. Für unsere Zwecke einsetzbares "Künstliches Meerwasser" erhält man, in dem man 3,5 g Haushaltssalz (oder Meersalz) in ein Gefäß gibt, es mit etwa 900g (=0,9 Liter) Wasser versetzt und dieses nach vollständiger Auflösung des Salzes auf 1000 ml ergänzt. Idealerweise müsste man natürlich reines, destilliertes Wasser nehmen, das ist aber für unsere Versuche nicht zwingend notwendig.

Gibt man Salz in Wasser, erscheint es auf den ersten Blick erstaunlich, dass der Wasserpegel im Gefäß nicht steigt. Das Wasser wird, was man mit einer Küchenwaage überprüfen kann, zwar um den Betrag des Salzes schwerer, das Volumen aber bleibt offenbar unverändert.

- Wiederholen wir den oben skizzierten Versuch zur thermischen Ausdehnung, nun aber mit "Meerwasser".

Nur bei sehr genauer Messung wird deutlich:
Meerwasser dehnt sich etwas stärker aus als Süßwasser.

Salzwasser weist einen etwas höheren thermischen Ausdehnungskoeffizienten auf als Süßwasser. Er steigt mit dem Salzgehalt (Salinität), mit dem auf das Wasser ausgeübten Druck und damit mit der Wassertiefe. Damit wird die Berechnung des thermischen Meeresspiegelanstiegs erheblich komplexer.

Die Werte dazu entnehmen Sie bitte der folgenden Tabelle:



Search within this book

Go

Bookbag About Us Help

Physical Properties of Sea Water

Thermal Properties of Sea Water

Thermal Expansion. The coefficient of thermal expansion, e , defined by $e = (1/\alpha_{s,p}) (\partial \alpha_{s,p} / \partial \theta)$, is obtained, at atmospheric pressure, from the terms for D in Knudsen's Hydrographical Tables, and at higher pressures from Ekman's tables or formulae (p. 57). The coefficient for sea water is greater than that for pure water and increases with increasing pressure. A few numerical values are given in Table 9, in which negative values indicate contraction with increasing temperature.

COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION OF SEA WATER AT DIFFERENT TEMPERATURES, SALINITIES, AND PRESSURES ($e \times 10^6$)

Pressure (decibars)	Salinity ‰	Temperature (°C)							
		-2	0	5	10	15	20	25	30
0.....	0	-105	-67	17	88	151	207	257	303
	10	-65	-30	46	112	170	222	270	315
	20	-27	4	75	135	189	237	282	324
	30	7	36	101	157	206	250	292	332
2,000.....	35	23	51	114	167	214	257	297	334
	40	80	105	157	202	241	278		
4,000.....	40	94	118	168	210	248	283		
	35	132	152	196	233	266			
6,000.....	40	144	162	204	240	272			
	34.85	177	194	230					
8,000.....	34.85	231	246					
10,000.....	34.85	276	287					

Quelle: University of California Press,

http://publishing.cdlib.org/ucpressebooks/view?docId=kt167nb66r&chunk.id=d3_4_ch03&toc.id=ch03&brand=eschol

Der jeweilige "coefficient of thermal expansion" wird in hier $e \times 10^{-6}$ angegeben, anders als der in Deutschland übliche Raumausdehnungskoeffizient γ mit 10^{-3} . Die Einheit ist jeweils K^{-1} . Die Druckeinheit ist "Dezibar", d.h. ein Zehntel Bar, die Einheit Salinität in Promille.

Raumausdehnungskoeffizienten γ Wasser

(bei 0 °C) -0,068	(bei 20 °C) 0,207	(bei 100 °C) 0,782
-------------------	-------------------	--------------------

Der Ausdehnungskoeffizient γ von Wasser (20°C) von 0,207 bedeutet:

1000 ml Wasser dehnt sich bei 20°C um 0,207 ml aus.

Der Wert $\gamma = 0,207$ entspricht $e = 207$

Die bisher nur für Süßwasser erfolgten Abschätzungen müssen danach noch einmal modifiziert werden:

15°C warmes Wasser mit 0% Salzgehalt hat einen Ausdehnungskoeffizienten $\gamma = 0,151$ (bei 0 Bar).

Bei 3,5% Salinität ist $\gamma = 0,214$. Damit liegt die Ausdehnung

$$\frac{(214 - 151)}{151} \times 100 = 41,7 \% \text{ höher als in dem Überschlag oben.}$$

Um die Druckabhängigkeit in der Tabelle "Thermale Ausdehnung" für unsere Fragestellungen richtig interpretieren zu können sollte man die Drücke in Tiefen umrechnen können.

Nach dem Pascal'schen Gesetz gilt: $p(h) = \rho gh$ mit den Einheiten N/m^2 (= Pa, Pascal) oder bar (1 bar = 100.000 N/m^2)

- $p(h)$ Hydrostatischer Druck, abhängig von der Höhe der darüber liegenden Wassersäule
- g Erdbeschleunigung, z.B. auf 50° Breite $g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$
- ρ (rho) Dichte, Meerwasser $\rho \approx 1035 \text{ kg/m}^3$
- h Höhe der Wassersäule

In 700 m Tiefe herrscht demzufolge ein Druck von
 $700 \text{ m} \times 1035 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \approx 7107345 \text{ N/m}^2 \approx 71,1 \text{ bar}$ oder 711 deziBar

In 3730 m Tiefe herrscht demzufolge ein Druck von

$3730 \text{ m} \times 1035 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \approx 37871996 \text{ N/m}^2 \approx 378,7 \text{ bar}$ oder 3787 deziBar

Die Abhängigkeit der Ausdehnung von Salzgehalt und Druck (Tiefe) ist unter Schulverhältnissen natürlich nicht zu ermitteln, sollte der Vollständigkeit aber erwähnt werden.

Eine Hypothek für die Zukunft: Die Wärmekapazität der Weltmeere

Um einen Liter 20°C warmen Wassers (1 kg) um ein Grad Celsius zu erwärmen bedarf es einer Energiezufuhr von 4182 Joule (etwa 4,19 kJ).

Meerwasser hat aufgrund seines Salzgehaltes eine etwas geringere Wärmekapazität. Sie beträgt etwa 3,9 kJ/kg (3895 J Kg⁻¹K⁻¹ bei 0°C und 3993 J Kg⁻¹K⁻¹ bei 20°C).

Das Gesamtvolumen aller Ozeane beträgt $1349930000 \text{ km}^3 = 1,34993 \cdot 10^{18} \text{ m}^3 = 1,34993 \cdot 10^{21} \text{ kg}$.
 Die Energie die benötigt wird um dieses Volumen nur um 1°C zu erwärmen beträgt $1,34993 \cdot 10^{21} \times 3,9 \text{ kJ} = 5,264727 \cdot 10^{21}$ Kilojoule.

Luft hat (bei 20°C) eine Wärmekapazität von 1,005 Kilojoule.

Bei einer Masse der Atmosphäre von $5,15 \cdot 10^{18} \text{ kg}$ sind $5,16 \cdot 10^{18} \text{ kJ}$ notwendig um ihre Temperatur um 1°C zu erhöhen.

Masse Ozeane:	Wärmekapazität Meerwasser	Energiezufuhr/K
$1,34993 \cdot 10^{21} \text{ kg}$	3,9 kJ/kg/K	$5,264727 \cdot 10^{21}$
Masse Atmosphäre	Wärmekapazität Atmosphäre	Energiezufuhr/K
$5,15 \cdot 10^{18} \text{ kg}$	1,005 kJ/kg/K	$5,16 \cdot 10^{18} \text{ kJ}$

Die Masse der Weltmeere beträgt etwa das 262fache der Masse der Atmosphäre.

Das Verhältnis der Wärmekapazitäten Wasser/Luft liegt bei etwa 3,9/1.

Daraus resultiert, dass die Ozeane eine Temperaturerhöhung um 1°C etwa Eintausend mal so stark abpuffern können wie die Atmosphäre.

Das stellt aber auch eine riesige Hypothek dar:

In der Gegenwart puffern die Ozeane den größten Teil der Wärmeenergie ab die durch Treibhauseffekte (CO₂, Wasserdampf, Lachgas, Methan etc.) nicht ins All abgestrahlt werden und im System Erde verbleiben.

Das dämpft den durch den Temperaturanstieg hervorgerufenen Treibhauseffekt.

Aber Energie geht nicht verloren: Ein großer Teil der Wärme wird in den Ozeanen gespeichert.

In der Zukunft, auch wenn vielleicht die Emission aller anthropogenen Treibhausgase auf null zurückgefahren sein wird werden die Ozeane diese Energie abgeben...

Und den Planeten weiter erwärmen.

Wie verhalten sich Luft und Wasser bei Erwärmung?

Material:

- 2 Strahler mit gleicher Leistung
- 2 gleiche Glasbecken (Klein-Aquarien)
- 2 Glasdeckel
- 2 Thermometer

Fülle das eine Becken mit **Raumwarmen** Wasser!

Stelle die beiden Strahler so auf, dass sie beide Becken auf die gleiche Weise beleuchten.

Schalte die Strahler messe nach jeweils 2 Minuten den Temperaturanstieg in beiden Becken.

Dabei dürfen weder die Luft noch das Wasser verwirbelt werden.

	Luft	Wasser
T °C nach ____ Minuten		
T °C nach ____ Minuten		
T °C nach ____ Minuten		
T °C nach ____ Minuten		
T °C nach ____ Minuten		
T °C nach ____ Minuten		
T °C nach ____ Minuten		
T °C nach ____ Minuten		

An welcher Stelle ist die Temperatur jeweils am höchsten?

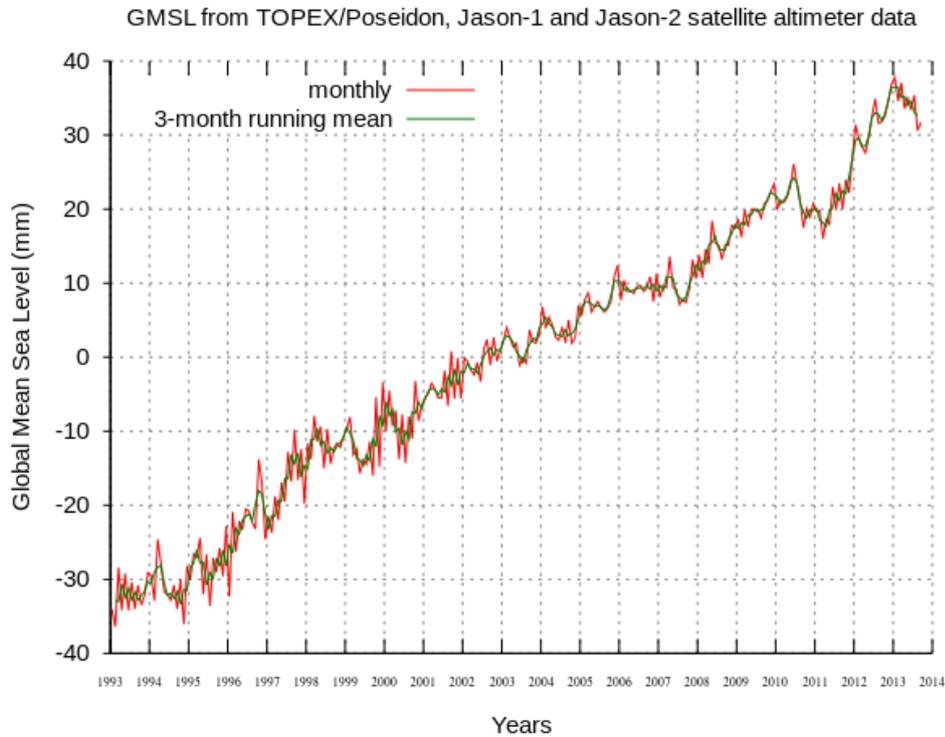
Nach Abschluss der Messung:

Schalte die Lampen aus und setze die Glasdeckel auf die Becken.

Warte 2 Minuten und messe erneut!

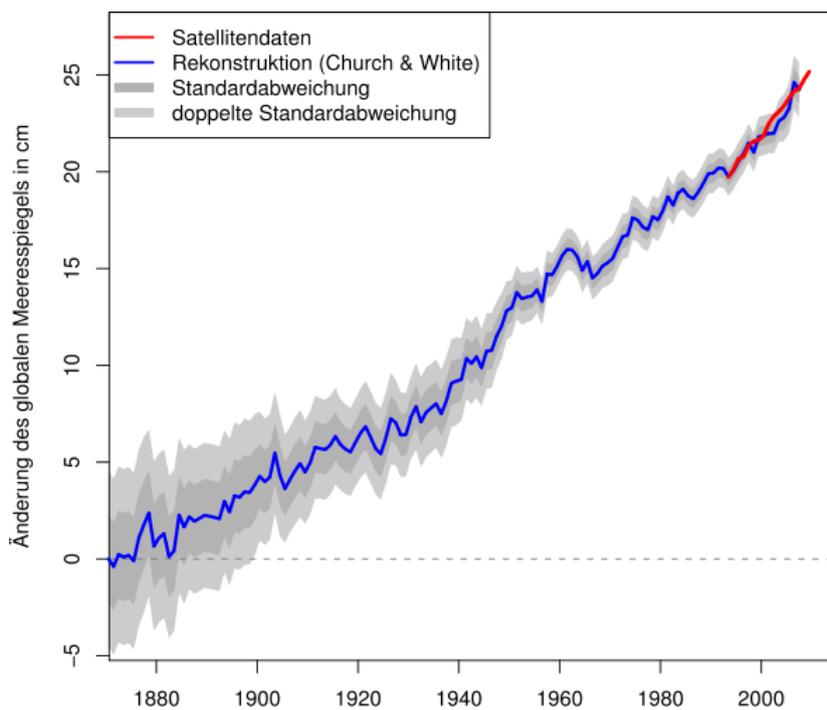
Quellen im Internet (Auswahl)

Mittlerer globaler Meeresspiegelanstieg in mm (1993 - 2014):



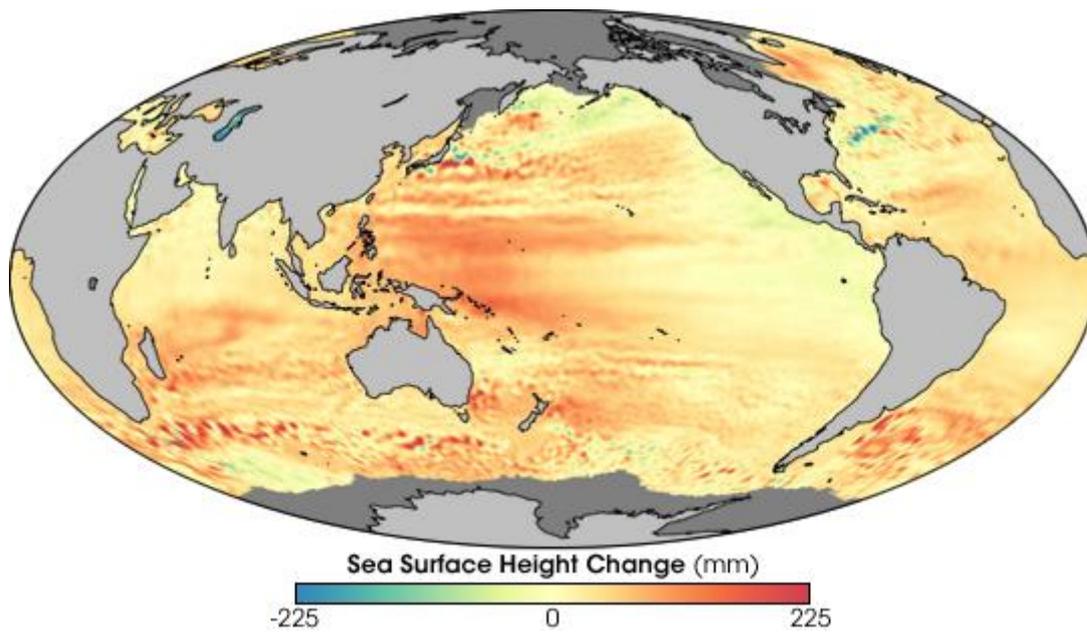
http://de.wikipedia.org/wiki/Meeresspiegelanstieg#mediaviewer/Datei:Sea_level_rise.svg

Änderung des globalen Meeresspiegels in cm (1870 - 2014):



http://de.wikipedia.org/wiki/Meeresspiegelanstieg#mediaviewer/Datei:Sealevel-rise_1870-2009_de.svg

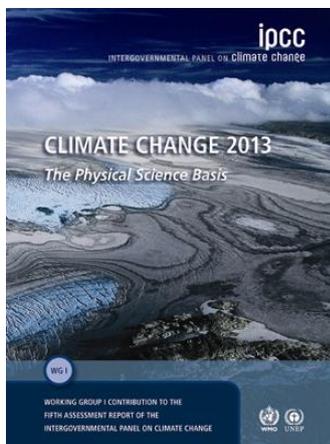
Höhe des Meeresspiegels:



<http://de.wikipedia.org/wiki/Meeresspiegelanstieg#mediaviewer/Datei:NASA-sea-level-change-1993-2007-topex-jason1.png>

Daten des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

<http://www.ipcc.ch>



IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis...

Ocean warming dominates the increase in energy stored in the climate system, accounting for more than 90% of the energy accumulated between 1971 and 2010 (*high confidence*). It is *virtually certain* that the upper ocean (0–700 m) warmed from 1971 to 2010 (see Figure SPM.3), and it *likely* warmed between the 1870s and 1971. {3.2, Box 3.1}

- On a global scale, the ocean warming is largest near the surface, and the upper 75 m warmed by 0.11 [0.09 to 0.13] °C per decade over the period 1971 to 2010. Since AR4, instrumental biases in upper-ocean temperature records have been identified and reduced, enhancing confidence in the assessment of change. {3.2}
- It is *likely* that the ocean warmed between 700 and 2000 m from 1957 to 2009. Sufficient observations are available for the period 1992 to 2005 for a global assessment of temperature change below 2000 m. There were *likely* no significant observed temperature trends between 2000 and 3000 m for this period. It is *likely* that the ocean warmed from 3000 m to the bottom for this period, with the largest warming observed in the Southern Ocean. {3.2}
- More than 60% of the net energy increase in the climate system is stored in the upper ocean (0–700 m) during the relatively well-sampled 40-year period from 1971 to 2010, and about 30% is stored in the ocean below 700 m. The increase in upper ocean heat content during this time period estimated from a linear trend is *likely* 17 [15 to 19] × 10²² J⁷ (see Figure SPM.3). {3.2, Box 3.1}
- It is *about as likely as not* that ocean heat content from 0–700 m increased more slowly during 2003 to 2010 than during 1993 to 2002 (see Figure SPM.3). Ocean heat uptake from 700–2000 m, where interannual variability is smaller, *likely* continued unabated from 1993 to 2009. {3.2, Box 9.2}

Zusammenfassung:

Der IPCC geht davon aus, dass sich die oberen 75 m der Ozeane im Zeitraum zwischen 1971 und 2010 um durchschnittlich 0,11°C/Jahr erwärmt haben. Es sei wahrscheinlich, dass sich der Bereich zwischen 700 und 2000 m Tiefe im Zeitraum von 1992 bis 2005 erwärmt habe. Wahrscheinlich sei, dass es in diesem Zeitraum keine Erwärmung in Tiefen zwischen 2000 und 3000 m gegeben hat. Dagegen sei es wahrscheinlich, dass es in Tiefen unterhalb von 3000 m Erwärmungen gegeben habe.

Mehr als 60% der der zwischen 1971 und 2010 von den Ozeanen aufgenommenen Energie ist in Tiefen zwischen 0 und 700 m gespeichert, etwa 30% in größeren Tiefen. Die in diesem Zeitraum von den oberen Ozeanschichten aufgenommene Energie beträgt wahrscheinlich 17x10²²J.

(Übersetzung des Autors)

B.4 Sea Level

The rate of sea level rise since the mid-19th century has been larger than the mean rate during the previous two millennia (*high confidence*). Over the period 1901 to 2010, global mean sea level rose by 0.19 [0.17 to 0.21] m (see Figure SPM.3). {3.7, 5.6, 13.2}

- Proxy and instrumental sea level data indicate a transition in the late 19th to the early 20th century from relatively low mean rates of rise over the previous two millennia to higher rates of rise (*high confidence*). It is *likely* that the rate of global mean sea level rise has continued to increase since the early 20th century. {3.7, 5.6, 13.2}
- It is *very likely* that the mean rate of global averaged sea level rise was 1.7 [1.5 to 1.9] mm yr⁻¹ between 1901 and 2010, 2.0 [1.7 to 2.3] mm yr⁻¹ between 1971 and 2010, and 3.2 [2.8 to 3.6] mm yr⁻¹ between 1993 and 2010. Tide-gauge and satellite altimeter data are consistent regarding the higher rate of the latter period. It is *likely* that similarly high rates occurred between 1920 and 1950. {3.7}
- Since the early 1970s, glacier mass loss and ocean thermal expansion from warming together explain about 75% of the observed global mean sea level rise (*high confidence*). Over the period 1993 to 2010, global mean sea level rise is, with *high confidence*, consistent with the sum of the observed contributions from ocean thermal expansion due to warming (1.1 [0.8 to 1.4] mm yr⁻¹), from changes in glaciers (0.76 [0.39 to 1.13] mm yr⁻¹), Greenland ice sheet (0.33 [0.25 to 0.41] mm yr⁻¹), Antarctic ice sheet (0.27 [0.16 to 0.38] mm yr⁻¹), and land water storage (0.38 [0.26 to 0.49] mm yr⁻¹). The sum of these contributions is 2.8 [2.3 to 3.4] mm yr⁻¹. {13.3}
- There is *very high confidence* that maximum global mean sea level during the last interglacial period (129,000 to 116,000 years ago) was, for several thousand years, at least 5 m higher than present, and *high confidence* that it did not exceed 10 m above present. During the last interglacial period, the Greenland ice sheet *very likely* contributed between 1.4 and 4.3 m to the higher global mean sea level, implying with *medium confidence* an additional contribution from the Antarctic ice sheet. This change in sea level occurred in the context of different orbital forcing and with high-latitude surface temperature, averaged over several thousand years, at least 2°C warmer than present (*high confidence*). {5.3, 5.6}

Zusammenfassung:

Der IPCC nimmt für den Zeitraum zwischen 1901 und 2010 einen mittleren globalen Meeresspiegelanstieg von 1,7 mm/Jahr an. Zwischen 1971 und 2010 soll er 2,0 mm und zwischen 1993 und 2010 3,2 mm/Jahr betragen haben. Sehr wahrscheinlich sei, dass die Rate zwischen 1920 und 1950 dem Anstieg zwischen 1993 und 2010 entspricht.

Nach IPCC lassen sich seit den frühen 1970er Jahren 75% des Meeresspiegelanstiegs durch Eisverluste und thermische Ausdehnung erklären. Zwischen 1993 und 2010 entfallen bei einer Summe von 2,8 mm/Jahr demnach 1,1 mm auf thermische Ausdehnung, 0,76 auf das Abschmelzen von Gletschern, 0,33 mm und 0,27 mm auf Eisverluste in Grönland bzw. in der Antarktis. Der Rest ergibt sich aus Zuflüssen vom Land.

(Übersetzung des Autors)

Danach macht der thermosterische Meeresspiegelanstieg in den letzten zwei Dekaden

$$\frac{1,1\text{mm}}{2,8\text{mm}} \times 100 = 39,3\%$$

oder rund 2/5 des Gesamtanstiegs aus.