



HINTERGRUND // SEPTEMBER 2013

Globale Erwärmung im letzten Jahrzehnt?


Für Mensch & Umwelt

Umwelt  Bundesamt

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Fachgebiet I 2.1 „Klimaschutz“
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Telefax: (0340) 2103-0
E-Mail: info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 facebook.com/umweltbundesamt.de

Autoren:

Dr. Claudia Mäder
Dr. Steffi Richter
Dr. Harry Lehmann

Broschüren bestellen:

Umweltbundesamt
c/o GVP
Postfach 30 03 61 | 53183 Bonn
Service-Telefon: 0340 2103-6688
Service-Fax: 0340 2104-6688
E-Mail: uba@broschuerenversand.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Bildquellen:

Titelseite: Pavel Klimenko / Fotolia.de

Stand: September 2013

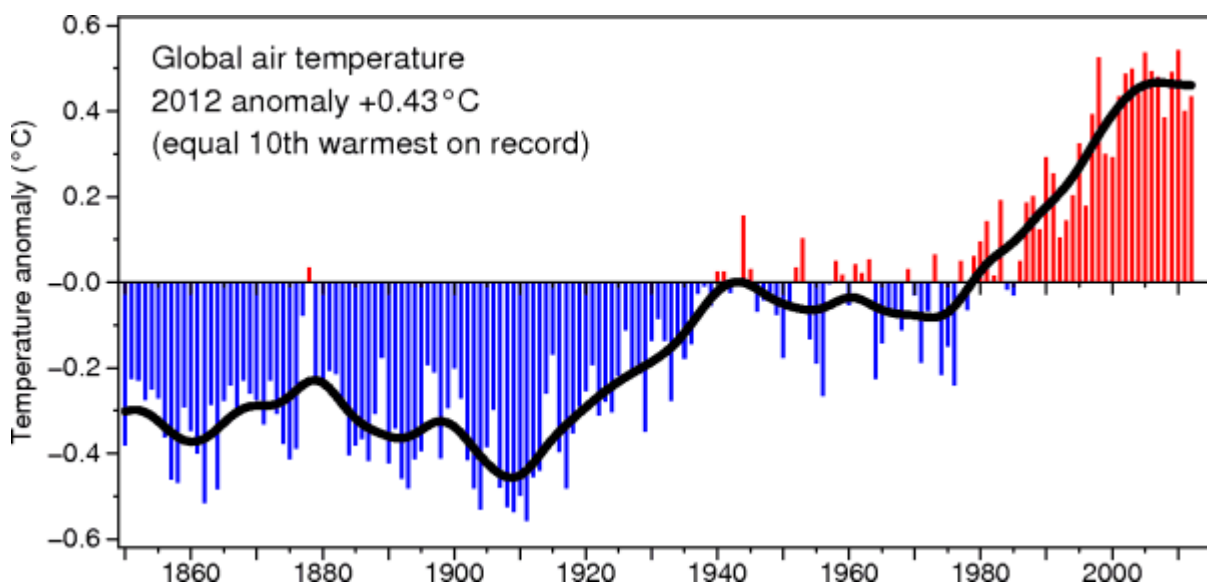
Globale Erwärmung im letzten Jahrzehnt?

Das globale Mittel der bodennahen Lufttemperatur – oder kurz: die globale Mitteltemperatur¹ – weist im vergangenen Jahrzehnt mit dem sehr warmen Jahr 2010 und den etwas kühleren Jahren 2008 und 2011 starke Schwankungen auf. Die Abbildung 1 zeigt die Zeitreihe der globalen Mitteltemperatur der Universität von East Anglia und des Britischen Meteorologischen Dienstes (HadCRUT).

Abbildung 1:

Abweichungen des globalen Mittels der bodennahen Lufttemperatur vom Mittelwert im Referenzzeitraum 1961 – 1990 (rote und blaue Balken)

die durchgezogene schwarze Linie stellt den nichtlinearen Trend dar
(x-Achse: Jahre 1850-2012, y-Achse: Temperaturabweichung)



Quelle: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/info/warming/>

Die Temperaturzeitreihe verdeutlicht einen steil nach oben gehenden Trend bis etwa 2003 und danach eine Abflachung der Trendlinie. Dennoch war die erste Dekade des 21. Jahrhunderts (2000 – 2009) die wärmste in der gesamten Temperaturreihe. 12 der 14 wärmsten Jahre, die seit Beginn der instrumentellen Messungen um 1850 beobachtet wurden, traten seit dem Jahr 2000 auf (*Met Office 2013a*).

Während sich der Anstieg der globalen Mitteltemperatur nach 2000 verzögert hat, ist der Anteil der Treibhausgase in der Atmosphäre weiter gestiegen. Dies wirft die Frage nach den Ursachen des verzögerten Temperaturanstiegs auf. Da in der Klimaforschung Zeiträume in der Größenordnung von 10 bis 15 Jahren zu kurz sind, um zuverlässige Aussagen

über Temperaturtrends und deren Ursachen zu machen, kann die Frage nicht abschließend beantwortet werden. Die Weltorganisation für Meteorologie (World Meteorological Organization – WMO) empfiehlt 30 Jahre für Untersuchungen des Klimas. Dennoch gibt die Klimawissenschaft erste vorläufige Antworten auf diese Frage.

Prinzipiell gibt es zwei Möglichkeiten zur Erklärung. Die erste betrifft Änderungen der Energie, die dem Klimasystem zugeführt wird. Zweitens ist es möglich, dass die Energie, die das Klimasystem durch die Zunahme der Treibhausgase in der Atmosphäre zusätzlich aufgenommen hat, nicht vorrangig zur Erwärmung der unteren Luftschichten, sondern eines weiteren Bestandteils des Klimasystems geführt hat. In Frage käme dafür an erster Stelle der Ozean.

¹ UBA 2013 (S. 54 – 55) enthält Ausführungen zur Bestimmung der globalen Mitteltemperatur.

Änderungen der Sonnenstrahlung und der Partikelkonzentrationen in der Atmosphäre

Gehen wir zunächst der Frage nach, wie sich der Energieeintrag in das Klimasystem im vergangenen Jahrzehnt verändert hat. Zwischen 2005 und 2010 trat ein ausgeprägtes Minimum im 11-jährigen Sonnenzyklus auf, gefolgt von einem langsamen Anstieg der Sonnenaktivität. Änderungen der Sonnenstrahlung können das Klima auf der Erde entscheidend verändern. Allerdings schwankt die Sonnenstrahlung innerhalb so kurzer Perioden wie des 11-Jahreszyklus nur in geringem Maße, so dass der Einfluss dieser Schwankungen auf die globale Mitteltemperatur in Bodennähe sehr gering ist (*Gray u.a. 2010*).

In kurzen Zeiträumen von wenigen Jahren wirken sich Vulkanausbrüche kühlend auf die Temperatur in Bodennähe aus. Beim Ausbruch großer Vulkane werden Partikel und Schwefelverbindungen in Höhen von 10 bis 20 Kilometern geschleudert. Diese Aerosole (schwebende Partikel) reflektieren die Sonnenstrahlen und bewirken dadurch, dass weniger Sonnenlicht zur Erdoberfläche gelangt.

In den vergangenen Jahren kam es zu einer Anzahl von Vulkanausbrüchen, jedoch mit insgesamt geringer Auswurfmasse. Durch diese Eruptionen erhöhten sich die atmosphärischen Konzentrationen von Aerosolen geringfügig. *Met Office 2013b* gibt an, dass dadurch im Zeitraum 2008 – 2012 im globalen Mittel ein kühlender Effekt von etwa $-0,02$ bis $-0,03$ °C verursacht wurde.

Auch wir Menschen setzen Aerosole in die Atmosphäre frei, die kühlend wirken. In der Mitte des letzten Jahrzehnts erreichten die Sulfataerosole² ein Maximum. Gegenwärtig sinkt ihre Konzentration wieder leicht. Darin könnte ein weiterer geringer Beitrag zum verzögerten Anstieg der globalen Mitteltemperatur liegen.

In der jüngsten Vergangenheit stellten die Forscherinnen und Forscher einen Rückgang der Konzentrationen von Wasserdampf in der Stratosphäre

(Luftschicht zwischen etwa 10 und 50 Kilometern Höhe) fest. Wasserdampf ist ein starkes Treibhausgas, dessen Abnahme in der Luft mit einem kühlenden Effekt verbunden ist.

Aber all diese kürzlich beobachteten Prozesse – geringe Sonnenaktivität, vulkanisches Aerosol, durch den Menschen verursachte Aerosole sowie geringerer stratosphärischer Wasserdampfgehalt - verringern die Energiezufuhr in das Klimasystem nicht so stark, dass der beobachtete Temperaturverlauf im letzten Jahrzehnt damit zu erklären wäre (*Met Office 2013b*). Folglich untersuchten die Klimawissenschaftler und -wissenschaftlerinnen, ob die durch die steigenden Treibhausgaskonzentrationen zugeführte Energie zur weiteren Erwärmung eines anderen Bestandteils des Klimasystems geführt hat: des Ozeans.

² Sulfataerosole entstehen aus Schwefeldioxidemissionen, die vorrangig bei der Verbrennung fossiler Energieträger freigesetzt werden.

Erwärmung der tieferen Wasserschichten des Ozeans

Die globale Mitteltemperatur in Bodennähe wird in der Regel als primärer Indikator der beobachteten Klimaerwärmung genutzt. Es gibt jedoch eine Vielzahl weiterer Indikatoren, die Veränderungen im Klimasystem anzeigen. Dazu zählen beispielsweise die Energiebilanz (das Verhältnis von ankommender zu abgehender Energie) an der Obergrenze der Atmosphäre, der Zustand der Ozeane (Temperaturen, Salzgehalt, Meeresspiegel, Eisbedeckung, Strömungen), die Eis- und Schneebedeckung der Kontinente, die Temperatur der Stratosphäre, der atmosphärische Wasserdampfgehalt und etliche weitere. Die Auswertung dieser Indikatoren zeichnet ein klares - und mit den theoretischen Grundlagen der Physik der Atmosphäre übereinstimmendes - Bild der globalen Erwärmung des Klimas.

Der Ozean mit seiner riesigen Wassermenge ist eine sehr wichtige Komponente im Klimasystem, weil er der größte Wärmespeicher ist. Über 90 % der Wärme, die dem Klimasystem (hauptsächlich durch die Zunahme der Treibhausgase) zusätzlich zugeführt wurde, haben die Weltmeere aufgenommen und gespeichert. Das hängt mit folgender Eigenschaft von Wasser und Luft zusammen: Erwärmt man eine Wassermenge und die gleiche Luftmenge durch eine bestimmte Energiezufuhr, so erwärmt sich das Wasser in viel geringerem Maße als die Luft. Oder anders ausgedrückt, zur Erwärmung einer bestimmten Wassermenge um 1 °C wird viel mehr Energie benötigt, als zur Erwärmung der gleichen Menge an Luft um 1 °C. In *Met Office 2013a*, S.22 werden eindrucksvolle Zahlen zu dieser Relation angegeben: Die ozeanischen Wassermassen von der Meeresoberfläche bis in 2000 Meter Tiefe nahmen zwischen 1955 und 2010 so viel Energie auf, dass dies einer Erwärmung der 2000 Meter dicken Schicht um 0,09 °C im Mittel³ entsprechen würde. Hätte die Atmosphäre zwischen dem Boden und 10 Kilometern Höhe die gleiche Energie aufgenommen, würde in dieser Schicht eine Temperaturerhöhung um 36 °C resultieren!

Wie haben sich nun die Temperaturen des Ozeans im vergangenen Jahrzehnt verändert? Beobachtungen des Wärmehalts der Ozeane und des Meeresspiegelanstiegs sowie Modellrechnungen legen nahe, dass ein Teil der Energie aus dem kontinuierlichen Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen durch den Ozean aufgenommen wurde und sich damit nicht im Anstieg der globalen Mitteltemperatur gezeigt hat.

Der Wärmeaustausch im Ozean erfolgt durch große Meeresströmungen. Vertikale Strömungen sorgen dafür, dass wärmeres Wasser von der Ozeanoberfläche in tiefere Schichten transportiert und im Gegenzug kälteres Wasser aus tieferen Schichten an die Oberfläche geleitet wird. Dieser Prozess des Austauschs von Wärme zwischen oberflächennahen und tieferen Schichten des Ozeans kann durch periodische Änderungen der Meeresströmungen verstärkt werden, wie das offenbar im letzten Jahrzehnt der Fall war. Dann gelangt mehr - an der Oberfläche - erwärmtes Wasser in die Tiefe, während verstärkt kaltes Tiefenwasser nach oben befördert wird. Das kältere Oberflächenwasser nimmt wiederum Wärme von der Atmosphäre auf. Es handelt sich dabei um eine Umverteilung der Energie innerhalb des Klimasystems, die über die enge Wechselwirkung von Atmosphäre und Ozean vonstattengeht (*Met Office 2013b*).

Balmaseda u.a. 2013 zeigen in ihrer Analyse, dass sich im letzten Jahrzehnt die Wasserschichten unterhalb von 700 Metern Wassertiefe beträchtlich erwärmt haben. Wohl sind die Ergebnisse mit Unsicherheiten behaftet, weil Messungen in tieferen Ozeanschichten nicht in ausreichender Zahl vorhanden sind und über keine hinreichend lange Zeitspanne vorliegen. Allerdings konnte die Wärmaufnahme durch tiefe Ozeanschichten einschließlich der verringerten Erwärmung der unteren Atmosphäre auch in Studien mit Modellen nachgebildet werden (z.B. *Meehl u.a. 2011, Guemas u.a. 2013*).

³ In der Natur erwärmen sich natürlich nicht alle Wasserschichten gleichmäßig um 0,09 °C.

Die Rolle des tropischen Pazifiks

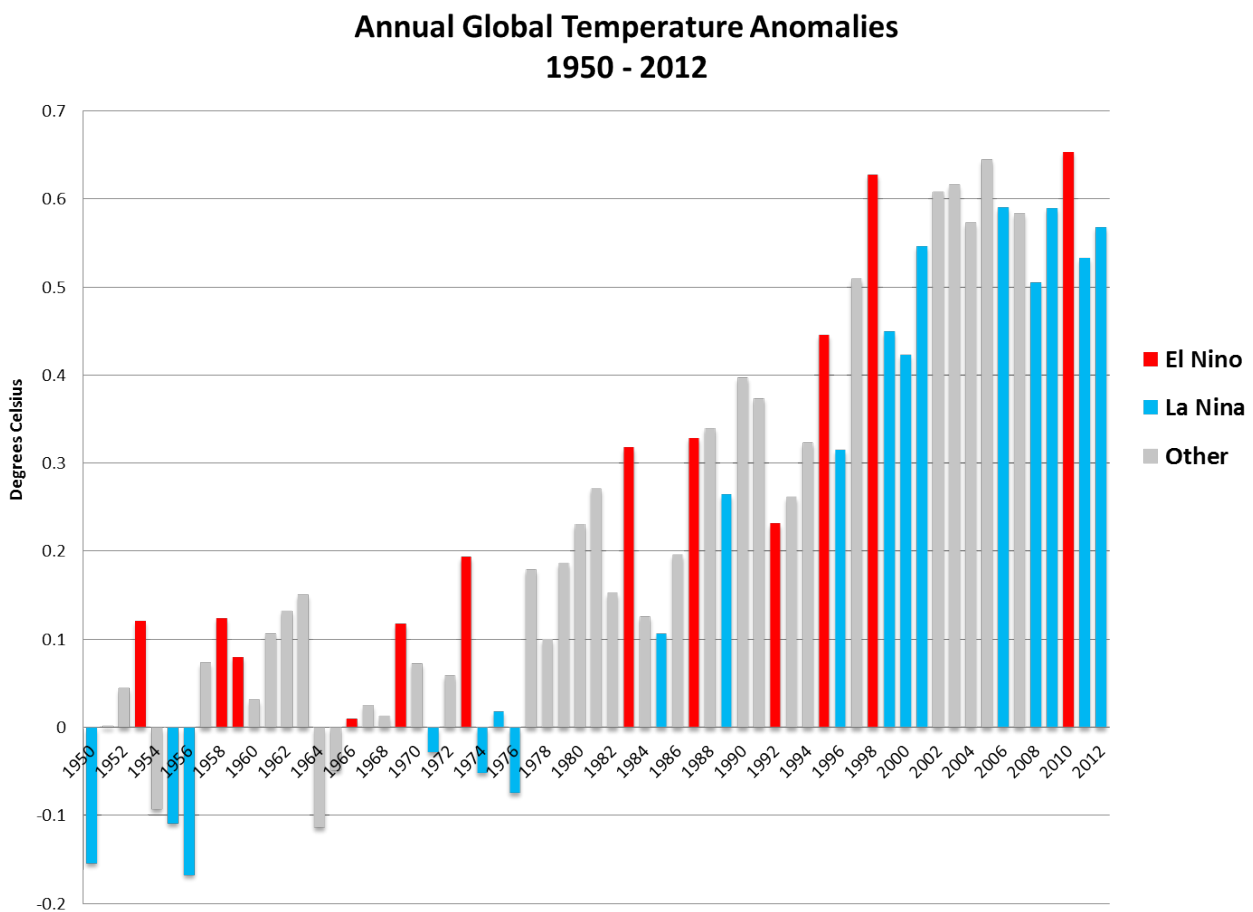
Der beschriebene Mechanismus des Aufsteigens von kälterem Wasser aus tieferen Schichten an die Oberfläche stimmt mit den Beobachtungen der Wasseroberflächentemperaturen im Pazifischen Ozean überein. Wie wir in *UBA 2013* (S. 57) erläutern und die Abbildung 2 zeigt, trat seit Ende der 1990er Jahre eine Reihe von La Niña-Jahren auf. Während La Niña-Ereignissen treiben starke Ostwinde wärmeres Oberflächenwasser in den westlichen tropischen

Pazifik, während im östlichen Pazifik kälteres Wasser aus tieferen Schichten an die Oberfläche aufsteigt. Im La Niña-Zustand herrschen deshalb im östlichen und zentralen äquatorialen Pazifik niedrigere Wasseroberflächentemperaturen vor als unter normalen Bedingungen. Dieses Phänomen beeinflusst in starkem Maße die atmosphärischen Luftströmungen und hat Einfluss auf die Witterung weit über den tropischen Pazifik hinaus.

Abbildung 2:

Abweichungen des globalen Mittels der bodennahen Lufttemperatur vom Mittelwert im Referenzzeitraum 1901 – 2000

(x-Achse: Jahre 1950-2012, y-Achse: Temperaturabweichung; Rote Balken kennzeichnen Jahre mit El Niño-Ereignis, blaue Balken mit La Niña-Ereignis und Jahre mit grauen Balken sind weder El Niño- noch La Niña-Jahre.)



Quelle: <http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/2012/13>

Das Gegenstück zu La Niña sind El Niño-Ereignisse, in deren Verlauf sich die Winde über dem tropischen Pazifik abschwächen. Dadurch kann sich das warme Oberflächenwasser im Westpazifik ostwärts ausbreiten und dort das Aufquellen von kälterem Tiefenwasser reduzieren. Die Wasseroberflächentemperaturen liegen dann in weiten Teilen des tropischen Pazifiks höher als unter normalen Bedingungen. El Niño-Jahre tendieren dazu, im globalen Mittel wärmer zu sein als La Niña- und neutrale Jahre⁴, während La Niña-Jahre eher kühler sind. El Niño Southern Oscillation (ENSO) – wie die vollständige Bezeichnung des Phänomens lautet – tritt unregelmäßig etwa alle drei bis sieben Jahre auf und manifestiert sich in kurzfristigen Schwankungen der globalen Mitteltemperatur zwischen El Niño- und La Niña-Bedingungen um 0,2 bis 0,3 °C.

In El Niño- und La Niña-Jahren findet ein verstärkter Austausch von Wärme zwischen Atmosphäre und Ozean statt. Während der - an der Meeresoberfläche - kalten La-Niña-Ereignisse speichert der Ozean zusätzliche Wärme. Bei den - an der Wasseroberfläche - warmen El-Niño-Ereignissen gibt er einen Teil der Wärme wieder an die Atmosphäre ab (*Rahmstorf 2013*). Dieses kurzfristige Phänomen überlagert den langjährigen Temperaturtrend. Beispielsweise können einige La Niña-Jahre in Folge einen langjährigen Aufwärtstrend kurzzeitig „maskieren“ und mehrere El-Niño-Jahre kurzzeitig einen besonders steilen Aufwärtstrend erzeugen. Am langfristigen Temperaturtrend hingegen ändert das ENSO-Phänomen nichts. Die globale Erwärmung des Klimas im Zusammenhang mit den steigenden Treibhausgasen schreitet weiter fort. Für den gegenwärtigen Trend der globalen Mitteltemperatur ist klar: Das nächste El-Niño-Jahr wird kommen. Und der Entwicklung der vergangenen Jahre folgend – in denen die El-Niño-Jahre Rekordtemperaturen aufwiesen und selbst die La Niña-Jahre mit der Zeit immer wärmer geworden sind – wird es mit hoher Wahrscheinlichkeit sehr warm werden.

Zusammenfassung

Die globale Mitteltemperatur zeigte im Laufe des letzten Jahrzehnts trotz stetig steigender Treibhausgaskonzentrationen einen verzögerten Anstieg. Jedoch vermitteln andere – ebenso wichtige – Klimaindikatoren (z.B. Ozeantemperaturen, Meeresspiegelanstieg, Gletscherschmelze, Rückgang des arktischen Meereseis) ein deutliches Bild der globalen Erwärmung in Übereinstimmung mit dem wissenschaftlichen Verständnis des Klimasystems.

Da dem Klimasystem auch im letzten Jahrzehnt zusätzliche Energie zugeführt wurde, muss diese neben der Erwärmung der Atmosphäre in Bodennähe noch in einen anderen Bestandteil des Klimasystems geflossen sein. Beobachtungen des Wärmeinhalts der Ozeane und des Meeresspiegelanstiegs deuten darauf hin, dass ein Teil der Energie aus dem kontinuierlichen Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen

zu einer weiteren Erwärmung des globalen Ozeans geführt hat. Dabei erwärmten sich nach gegenwärtigen Erkenntnissen auch tiefere ozeanische Schichten unterhalb von 700 Metern Wassertiefe. In Übereinstimmung mit diesem Prozess steht die Beobachtung mehrerer La Niña-Ereignisse im letzten Jahrzehnt.

Eine kurzzeitige verstärkte Wärmeaufnahme durch den Ozean ändert nicht den langfristigen Trend der globalen Mitteltemperatur. Atmosphäre und Ozean stehen in ständigem Wärmeaustausch miteinander, so dass der Ozean auch einen Teil der aufgenommenen Wärme wieder abgibt. Darum erwarten einige Fachleute mit dem nächsten El Niño-Ereignis einen besonders starken Anstieg der bodennahen globalen Mitteltemperatur (*Trenberth 2013, Rahmstorf 2013*).

⁴ In neutralen Jahren treten weder El Niño- noch La Niña-Ereignisse auf.

Quellen

Balmaseda, M. A., Trenberth, K. E., Källén, E., 2013: Distinctive climate signals in reanalysis of global ocean heat content. *Geophys. Res. Lett.* Doi: 10.1002/grl.50382

Gray, L. J., Beer, J., Geller, M., Haigh, J. D., Lockwood, M., Matthes, K., Cubasch, U., Fleitmann, D., Harrison, G., Hood, L., Luterbacher, J., Meehl, G. A., Shindell, D., van Geel, B., White, W., 2010: Solar influences on climate. *Reviews of Geophysics*, 48, RG4001, S. 1 – 53.

Guemas, V., Doblas-Reyes, F. J., Andreu-Burillo, I., Asif, M., 2013: Retrospective prediction of global warming slowdown in the past decade. *Nature Climate Change* 3, S.649 – 653

Jones, P., 2013: Global Temperature Record.
<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/info/warming/>

Meehl, G. A., Arblaster, J. M., Fasullo, J. T., Hu, A., Trenberth, K., 2011: Model-based evidence of deep-ocean heat uptake during surface-temperature hiatus periods. *Nature Climate Change* 1, S. 360 364

Met Office 2013a: The recent pause in global warming (1): What do observations of the climate system tell us? 28 S.
http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/q/s/Paper1_Observing_changes_in_the_climate_system.PDF

Met Office 2013b: The recent pause in global warming (2): What are the potential causes? 23 S.
http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/q/0/Paper2_recent_pause_in_global_warming.PDF

Met Office 2013c: The recent pause in global warming (3): What are the implications for projections of future warming? 20 S.
http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/3/r/Paper3_Implications_for_projections.pdf

NOAA 2013: State of the Climate, Global Analysis, Annual 2012.
<http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/2012/13>

Rahmstorf, S., 2013: Beam me up, Scotty!
<http://www.scilog.de/wblogs/blog/klimalounge/klimadaten/2013-08-20/waermespeicherung-im-ozean>

Trenberth, K. E., 2013: Has global warming stalled?
<http://www.rmets.org/weather-and-climate/climate/has-global-warming-stalled>

UBA 2013: Und sie erwärmt sich doch – was steckt hinter der Debatte um den Klimawandel?
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/sie-erwaermt-sich-doch-was-steckt-hinter-debatte-um>