



DER ATEM DES OZEANS

°THE BREATH OF THE OCEAN

Der Atem des Ozeans

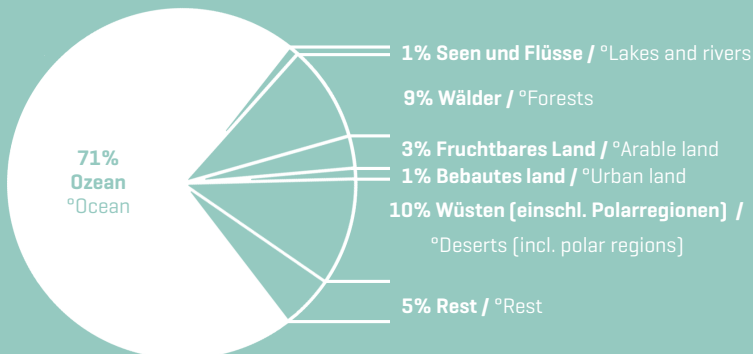
°The breath of the ocean

Warum ist die Schnittstelle zwischen Ozean und Atmosphäre so wichtig?

Die oberste Schicht der Ozeane ist im ständigen Kontakt mit der Atmosphäre und bildet eine der größten Grenzflächen auf der Erde. Über diese Grenzfläche hinweg erfolgt der Austausch von Energie, Impuls und Materie. Jede Änderung in der Oberfläche des Ozeans oder in der darüber liegenden Atmosphäre wird durch eine Vielzahl von biologischen, chemischen und physikalischen Prozessen auf beiden Seiten der Grenzfläche moduliert.

°Why is the interface between the ocean and atmosphere so important?

The upper layer of the ocean is in permanent contact with the atmosphere and, thus, forms one of the largest interfaces on Earth. The exchange of energy, momentum and material takes place across this interface. Any alteration of the surface ocean or the overlying atmosphere are modulated by a variety of biological, chemical and physical processes on both sides of the interface.



Grenzflächen der Erde in % / °Surface area of the Earth in %

Prozesse in der Ozean-Atmosphäre Grenzschicht haben direkten Einfluss auf den Austausch von klimarelevanten Spurengasen, die Aufnahme von Aerosole und die Bildung von Seesalz Partikeln. Partikel sind durch ihre Fähigkeit zur Absorption bzw. Rückstreuung von Wärme und als Vorläufersubstanzen der Wolkenbildung ähnlich wichtig für den Wärmehaushalt der Atmosphäre, wie die bekannten Treibhausgase Kohlenstoffdioxid, Methan, Lachgas u.a. Daher spielen die Wechselwirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre eine sehr wichtige Rolle sowohl für das regionale als auch das globale Klima der Erde.

Trotz ihrer Bedeutung für eine zuverlässige Abschätzung der zukünftigen Klimaentwicklung, ist unser Wissen über die Ozean-Atmosphäre Wechselwirkung gerade in Hinblick auf die zu beobachtenden regionalen und globalen Umweltveränderungen erstaunlicherweise sehr lückenhaft. In der vorliegenden Broschüre werden ausgewählte Forschungsergebnisse beschrieben und offene Fragestellungen vorgestellt.

°Processes at the ocean-atmosphere interface directly affect the exchange of trace gases, the uptake of aerosols and the formation of sea spray aerosols. Since aerosols absorb or reflect heat and, moreover, act as precursors for cloud formation, their importance for the heat budget of the atmosphere is comparable to the greenhouse gases, such as carbon dioxide, methane, nitrous oxide and others. Ocean/atmosphere interactions play, therefore, an important role for both the regional and global climate of the Earth.

There are surprisingly many gaps in our knowledge about ocean/atmosphere interactions, despite their importance for a reliable estimate of the future climate, especially in view of ongoing regional and global environmental changes. In this brochure we highlight selected research results and open questions.

Der Ozean als Quelle und Senke für klimarelevante Spurengase

°The ocean as source and sink of climate relevant trace gases

Die globale Erwärmung, die hauptsächlich durch den stetigen Anstieg der CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre verursacht wird, wird durch die Eigenschaft der Ozeane, große Mengen an CO₂ aufnehmen und langfristig speichern zu können, gedämpft, da sonst noch mehr CO₂ in der Atmosphäre verbleiben würde: ca. 25% des weltweit freigesetzten CO₂ wird vom Ozean aufgenommen.

Lachgas, N₂O, wirkt in der Atmosphäre als Treibhausgas etwa 300 mal stärker als CO₂ und ist darüber hinaus auch indirekt an der Bildung des ‚Ozonlochs‘ beteiligt. Die Ozeane sind mit einem Anteil von 25% eine der weltweit größten Quellen von N₂O. Durch den Einsatz einer neuen optischen Messtechnik konnte kürzlich erstmals gezeigt werden, dass die N₂O-Emissionen aus den Küstenauftriebsgebieten die höchsten bisher im Ozean gemessenen sind und dass die globalen ozeanischen N₂O-Emissionen nach oben korrigiert werden müssen. Durch den weltweiten Einsatz der neuen Messtechnik ist es nun möglich, die N₂O-Konzent-

°The observed global warming, which is mainly resulting from the ongoing increase of CO₂ in the atmosphere, is considerably lowered because of huge uptake and long-term storage capability of the ocean for atmospheric CO₂. The trend of global warming would be even more pronounced if the ocean would not take up about 25% of the total worldwide CO₂ emissions.

°Nitrous oxide, N₂O, is an atmospheric greenhouse gas which has a global warming potential about 300 times higher than that of CO₂. Moreover, it is indirectly involved in the depletion of stratospheric ozone (ozone ‘hole’). The oceanic emissions contribute about 25% to the atmospheric N₂O and are, therefore, a major source of N₂O. Recent measurements with a new optical technique revealed that N₂O emissions from coastal upwelling areas are higher than previously thought. Therefore, the global oceanic N₂O emission estimates have to be revised upward. Now we have the ins-

rationen im Oberflächenozean wesentlich genauer zu bestimmen, was eine verbesserte Abschätzung sowohl der globalen ozeanischen N_2O -Emissionen als auch deren Beitrag zur globalen Erwärmung ermöglicht.

truments to measure N_2O concentrations in the surface ocean with unprecedented temporal and spatial resolution, which will lead to improved estimates of both the N_2O emissions from the ocean and their contribution to global warming.



Entwicklung des Zeitaufwandes zur Bestimmung von N_2O aus einer Seewasserprobe

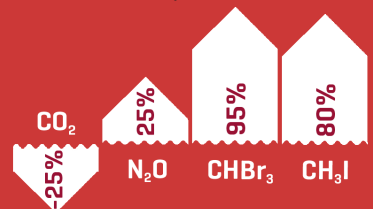
°Development of the time spent for the analysis of N_2O in a seawater sample

Halogenhaltige Verbindungen wie z.B. Bromoform ($CHBr_3$) und Methyljodid (CH_3I) spielen eine wichtige Rolle für das Klima, da sie an der Entstehung des ‚Ozonlochs‘ und der Aerosolbildung beteiligt sind. Die Ozeane einschließlich der Küstengebiete sind die wichtigsten natürlichen Quellen für Bromoform und Methyljodid. Biologische Bildungswege bestimmen die Verteilung von Bromoform, während die photochemische Bildung für Methyljodid dominierend ist. Kürzlich konnten erstmals detaillierte Karten mit den globalen Verteilungen von Bromoform und Methyljodid im Oberflächenozean und deren Emissionen berechnet werden. Das ist ein entscheidender Schritt zur Reduzierung der Unsicherheiten bezüglich des Beitrags des Ozeans zu den Konzentrationen von Bromoform und Methyljodid in der Atmosphäre.

°Halocarbons such as bromoform ($CHBr_3$) and methyl iodide (CH_3I) play an important role in the climate, because they are contributing to the ozone ‘hole’ and aerosol formation. The oceans incl. their coastal areas are significant natural sources of bromoform and methyl iodide. Biological formation processes dominate the oceanic distribution of bromoform, whereas, photochemical production dominates the formation of methyl iodide in the ocean. Only recently, global maps of the oceanic distributions and emissions of both gases have been computed, which is a significant step forward in reducing the uncertainties of the oceanic contribution to the atmospheric concentrations of bromoform and methyl iodide.

Aufnahme/Abgabe vom Ozean in % des atm. Gesamtbudgets

°Oceanic release/uptake in % of the overall atmospheric budget

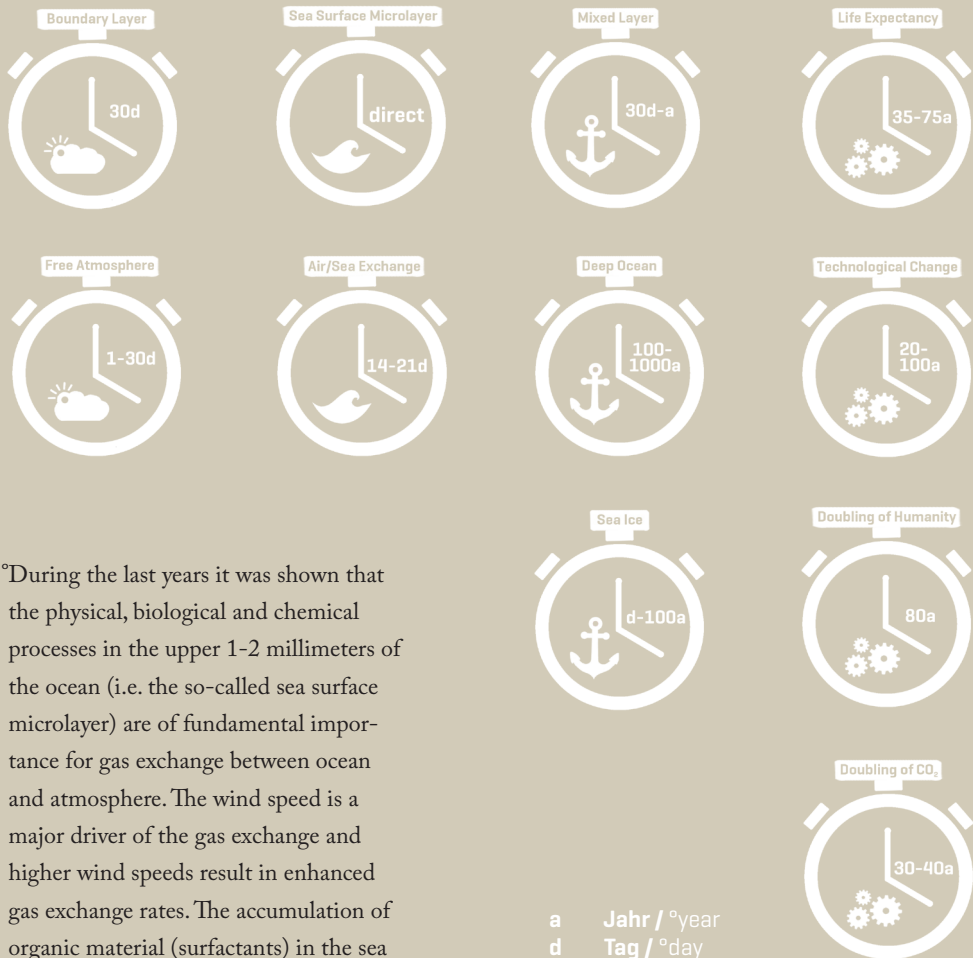


Gasaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre

°Gas exchange between ocean and atmosphere



Es hat sich in den letzten Jahren immer deutlicher herausgestellt, dass die physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse in den obersten 1-2 Millimetern des Ozeans (das ist die sogenannte ‚sea surface microlayer‘ oder Oberflächengrenzschicht) von entscheidender Bedeutung für den Gasaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre sind. Die Windgeschwindigkeit ist ein wichtiger Faktor, der den Gasaustausch bestimmt, denn je höher die Windgeschwindigkeit ist, desto effektiver ist der Gasaustausch. Darüber hinaus scheint die in Labor- und Feldstudien beobachtete Akkumulation von organischem Material in der Oberflächengrenzschicht (z.B. in Form von Oberflächenfilmen) zu einer signifikanten Reduzierung des Gasaustausches zwischen Ozean und Atmosphäre zu führen. Diese Reduzierung kann bis zu 30% betragen. Sie sollte deshalb besonders effektiv in den Gebieten des Ozeans sein, in denen hohe Konzentrationen von grenzflächenaktiven organischen Substanzen durch Algen produziert werden (z.B. in biologisch sehr produktiven Gebieten).



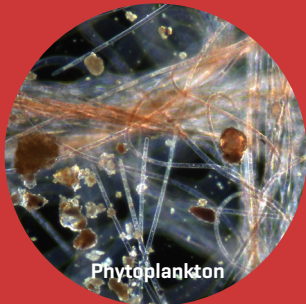
°During the last years it was shown that the physical, biological and chemical processes in the upper 1-2 millimeters of the ocean (i.e. the so-called sea surface microlayer) are of fundamental importance for gas exchange between ocean and atmosphere. The wind speed is a major driver of the gas exchange and higher wind speeds result in enhanced gas exchange rates. The accumulation of organic material (surfactants) in the sea surface microlayer was shown in several field and lab studies. However, surfactants can lead to a significant reduction of up to 30% of the gas exchange. Therefore, surfactant affected gas exchange will be most pronounced in regions where algae produce high concentrations of surfactants, e.g. in oceanic regions with a high biological production.

Ungefähre Abschätzungen der charakteristischen Zeitskalen und Austauschzeiten für verschiedene Komponenten des Erdsystems

°Rough estimates of the characteristic time scales and exchange rates of various components of the Earth system

Eintrag von Aerosolen in den Ozean

°Deposition of aerosols to the ocean



Aerosole kommen überall in der Atmosphäre über dem Ozean vor. Der Aerosol-Eintrag in den Ozean durch Nass- (d.h. Auswaschen durch Regen) oder Trockendeposition ist wichtig für eine ganze Reihe von biologischen Prozessen und somit für das Ökosystem im Oberflächenozean. Die weltweit größte Aerosolquelle für den Ozean stellt die Staubfahne der Sahara dar, die bis zu mehrere tausend Kilometer über den tropischen Nord- und Südatlantik reichen kann. Hierbei werden auch große Mengen von Eisen und Phosphat, die im Saharastaub enthalten sind, in den Ozean eingetragen. Eisen und Phosphat sind Nährstoffe, ohne die das Phytoplankton nicht leben kann, die aber in der Oberflächenschicht in weiten Teilen des Atlantiks nicht in ausreichenden Konzentrationen zur Verfügung stehen und dadurch limitierend für die biologische Produktion sind. Durch den Saharastaub-Eintrag wird diese Limitierung, zumindest zeitweise, aufgehoben. Besonders der tropische Nordostatlantik erlebt durch seine unmittelbare Nähe zur Sahara regelmäßige starke Staubeinträge durch Saharastaubstürme. Hier wurde durch die BMBF-geförderte Errichtung des Ocean Science Centres in Mindelo auf Sao Vicente (Kapverden) eine sehr gute Infrastruktur geschaffen, die langfristige und umfassende Untersuchungen zum Staubeintrag an den Zeitserienstationen CVAO/CVOO (Cape Verde Atmospheric/Ocean Observatory) möglich machen.

Der Eisen-Eintrag in den Ozean hat sich von 1850 von 0,063 Mt/yr bis 2008 auf 0,191 Mt/yr mehr als verdreifacht.

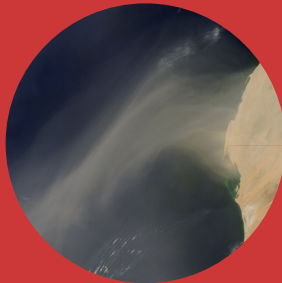
[Zum Vergleich: ein Auto wiegt ungefähr 0,000001 Mt.]

°The input of iron into the ocean has more than tripled from 0.063 Mt/yr in 1850 to 0.191 Mt/yr in 2008.

[For comparison: a car weighs approximately 0,000001 Mt.]

Betrieb eines Aerosolkollektors auf See / Aerosolfilter - die braune Farbe kommt vom Saharastaub

°Operating an aerosol collector at sea / Aerosol filter - brown colour indicate Saharan dust

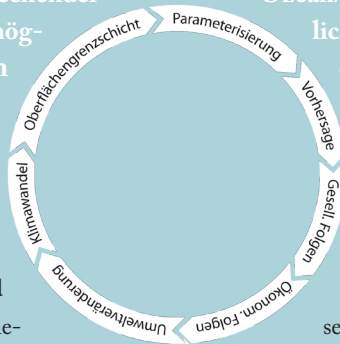


°Atmospheric particles (aerosols) are ubiquitous in the atmosphere over the ocean. The input of aerosols by dry deposition or rain on to the surface ocean is important for many biological processes and thus the ecosystem of the surface ocean. The world-wide largest source of aerosols is the dust plume of the Sahara Desert, which can reach up to several thousand km over the tropical North and South Atlantic Ocean. The Saharan dust contains iron and phosphate, which is provided to remote regions of the Atlantic Ocean by the dust plumes. In large parts of the Atlantic Ocean, iron and phosphate are limiting nutrients for the biological productivity by microorganisms and phytoplankton. Thus, the deposition of iron and phosphate by the Saharan dust plume, compensates the missing nutrients, at least temporarily. Especially the eastern tropical North Atlantic Ocean is affected regularly by Saharan dust storms. The BMBF-funded Ocean Science Centre in Mindelo (Sao Vicente, Cape Verde Islands), therefore, provides an ideal infrastructure to investigate the dust deposition at the Cape Verde Atmospheric/Ocean Time Series stations (CVAO/CVOO).

Ausblick - offene Fragen

°Outlook - open questions

Wie aus den aufgeführten Beispielen ersichtlich ist, werden die Austauschprozesse zwischen dem Oberflächenozean und der Atmosphäre durch eine Vielzahl physikalischer, chemischer und biologischer Prozesse gesteuert. Diese reagieren ihrerseits wiederum empfindlich auf aktuelle Veränderungen der Umwelt (Eutrophierung, Versauerung, Luft- und Ozeanverschmutzung) und den Klimawandel (Erwärmung). Es ist wichtig zu erkennen, dass diese Prozesse auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen ablaufen, die molekulare und globale sowie sehr schnelle und dekadische Skalen umfassen. Dabei ist die Untersuchung der Oberflächengrenzschicht besonders herausfordernd, weil sie immer noch schwer zugänglich ist und wegen der Heterogenität der Prozesse und ihrer Wechselwirkungen in den obersten Millimetern des Ozeans. Unser gestiegenes Verständnis und die damit einhergehende verbesserte Parameterisierung der Prozesse an der Ozean/Atmosphäre-Grenzschicht können zu einer verbesserten Vorhersage und Quantifizierung der zukünftigen Entwicklung des Erdsystems durch Klimamodelle mit entsprechender Ozean/Atmosphäre-Kopplung führen. Die Erforschung der möglichen gesellschaftlichen und ökonomischen Folgen dieser Rückkopplungen über die Grenzschicht hinweg steht jedoch erst am Anfang.



°As illustrated by the examples it is obvious that exchange atmosphere interface are affected biological processes. In turn, the environmental changes (e.g. eutrophication, acidification, pollution) and climate change (warming). It is important to note that these surface ocean/lower atmosphere processes operate on various spatial and temporal scales ranging from molecular to global and from milliseconds to decades. The investigation of the sea surface microlayer is particularly challenging because of the still very limited accessibility and the patchiness of processes and interactions found in the uppermost few mm of the oceans. Increasing knowledge and the associated improved parameterisation of the processes at the ocean/atmosphere interface may lead to improved projections and quantification of the future development of the Earth system by climate models with ocean/atmosphere coupling. Investigations of potential socio-economic consequences of feedbacks across the ocean/atmosphere interface are still at the beginning.

given in the previous sections, processes across the ocean/atmosphere interface are affected by ongoing eutrophication, acidification, pollution) and climate change (warming).

References

page 2

Downing, J.A. et al., 2012. *Inland Waters*, 2: 229-236.
Verpoorter, C. et al., 2014. *Geophys. Res. Lett.*, 41: 6396-6402.
Liu, Z.F. et al., 2014. *Landscape Ecol.*, 29: 763-771.
www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo1_ocean_volumes.html
data.worldbank.org/indicator/ag.Lnd.frst.zs
data.worldbank.org/indicator/ag.Lnd.arbl.zs
www.universetoday.com/65639/what-percentage-of-the-earth-land-surface-is-desert/

page 5

Messzeiten / °Measurement times
Arévalo-Martínez, D.L. et al. [2013]. *Ocean Sci.*, 9(6): 1071-1087.
Craig, H. and Gordon, L.I. [1963]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 27: 949-955.
Weiss, R.F., Van Woy, F.A. and Salameh, P.K. [1992] ORNL/CDIAC-59, NDP-044, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.
Quellen und Senken / °Sources and sinks
IPCC, [2013] *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge UK and New York, NY, USA, 1535 pp.
WMO, [2014] *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014*. Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No. 55, Geneva, Switzerland.

page 7

Cox, P.M. and Nakicenovic, N. [2004]. In: H.J. Schellnhuber, et al. [Editors], *Earth System analysis for sustainability*. MIT Press, Cambridge, USA, pp. 293-311.
Rohde, H. [2000]. In: M.C. Jacobson, et al. [Editors], *Earth System Science*. Academic Press, San Diego, CA, pp. 62-84.

page 9

Myriokefalitakis, S. et al., 2015. *Biogeosci.*, 12: 3973-3992

Picture Credits

page 1

Detail from „The birth of Venus“, Sandro Botticelli 1483-1485, photo taken from the „Google Art Project“

page 8

NASA, J. LaRoche, J. Lampel

page 9,

TROPOS, NASA, K. Müller

All graphics made by E. Renz-Kiefel

Imprint

Published by

SOPRAN
Hermann W. Bange
GEOMAR Helmholtz Centre for
Ocean Research Kiel
Düsternbrooker Weg 20
24105 Kiel,
Germany

Concept and Editorial Work

Hermann W. Bange

Layout and Design

Evelyn Renz-Kiefel

sopran.pangaea.de

Published in

2017

Production

A.C.Ehlers Medienproduktions
GmbH

Paper

Recycling-Offset aus 100% Altpapier, FSC-zertifiziert, EU Ecolabel ausgezeichnet

ClimatePartner 
climate neutral

Print | ID 10690-1508-1003

We gratefully acknowledge the supportive project management of GEOMAR by Susanne Bagatsch and Ursula Frank-Scholz.

We gratefully acknowledge the generous financial support for SOPRAN by the German Ministry of Education and Research, Bonn, and the PTJ Warnemünde/Rostock.

SOPRAN I FKZ 03F0462

SOPRAN II FKZ 03F0611

SOPRAN III FKZ 03F0662

Ansprechpartner

°Contact

Prof. Dr. Hermann W. Bange

Forschungsbereich 2 - Marine Biogeochemie

GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel

Düsternbrooker Weg 20

24105 Kiel, Germany

Tel. +49-431-600 4204

Fax: +49-431-600 4202

Email: hbange@geomar.de

sopran.pangaea.de

Die dargestellten Ergebnisse beruhen hauptsächlich auf den Ergebnissen des Verbundprojektes SOPRAN [Surface Ocean Processes in the Anthropocene], das von 2/2007 bis 7/2016 vom BMBF finanziert wurde.

°The presented results are mainly based on the results of the joint project SOPRAN [Surface Ocean Processes in the Anthropocene] which was funded by the BMBF from 02/2007 to 07/2016.

FKZ: 03F0462, 03F0611 und 03F0662.



Gefördert durch / °Sponsored by



**Federal Ministry
of Education
and Research**