

# Über die Ventilation der Thermokline des Indischen Ozeans

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades  
der Naturwissenschaften im Fachbereich  
Geowissenschaften  
der Universität Hamburg

vorgelegt von

Johannes Karstensen

aus

Husum/Nordfriesland



*Über die Ventilation der Thermokline des  
Indischen Ozeans*



# Über die Ventilation der Thermokline des Indischen Ozeans

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades  
der Naturwissenschaften im Fachbereich  
Geowissenschaften  
der Universität Hamburg

vorgelegt von

Johannes Karstensen

aus

Husum/Nordfriesland

Hamburg

1999

Als Dissertation angenommen vom Fachbereich Geowissenschaften  
der Universität Hamburg

auf Grund der Gutachten von Prof. Dr. D. Quadfasel und  
Prof. Dr. J. Meincke

Hamburg, den 7.7.1999

Prof. Dr. U. Bismayer  
Dekan  
des Fachbereichs Geowissenschaften

Eine Theorie ist eine Theorie, keine Realität. Alles, was eine Theorie vermag, ist, mich an bestimmte Gedanken zu erinnern, die einmal Teil meiner Realität waren.

*Hugh Prather, 1979, Notes to myself, Moab, Utah, Real People Press*





## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einführung</b>	1
1.1 Aufbau und Erhalt der Thermokline	3
1.2 Über die Zirkulation im Indischen Ozean	10
<b>2. Verwendete Daten</b>	16
<b>3. Allgemeines zu Wassermassen und Tracern</b>	22
3.1 Definition	22
3.2 Wassermassentracer	22
3.3 Wassermassen Mischungsanalyse	25
3.4 Wassermassenanalyse im Indischen Ozean	32
3.5 Zeitinformation aus Tracern	34
3.5.1 Altersbestimmung mit FCKWs	35
3.5.2 Altersbestimmung mit Sauerstoff	37
3.5.3 Einfluß der Vermischung auf Altersbestimmung	39
3.6 Zusammenfassung	49
<b>4. Wassermassen des Indischen Ozeans</b>	50
4.1 Mechanismen der Wassermassenformation	50
4.2 Oberflächendichteflüsse	54
4.3 Doppeldiffusive Konvektion	60
4.4 Charakteristika und Volumen der Wassermassen des Indischen Ozeans	67
4.4.1 Wassermassen, die durch Subduktion eingebracht wurden	67
4.4.2 Wassermassen aus interner Vermischung	82
4.4.3 Importierte Wassermassen	88
4.5 Zusammenfassung	93
<b>5. OMP Analyse der Datensätze</b>	94
5.1 Der Subtropenwirbel	98
5.2 Der Indopazifische Einstrom	108
5.3 Der tropische Indische Ozean entlang von 8°S	116
5.4 Die Arabische See	121
5.5 Der 80°Ost Schnitt	128
5.6 Klimatologie	134
5.7 Zusammenfassung	141

<b>6. Die Ventilation und Zirkulation</b>	142
6.1 Verteilung der <i>Misch-Alter</i>	142
6.2 Wassermassenalter und Transporte im südlichen Subtropenwirbel	146
6.3 Transporte in der Südhemisphäre	148
6.4 Bilanzen	150
<b>7. Zusammenfassung</b>	154
<b>Literaturverzeichnis</b>	160

## Glossar und Abkürzungsverzeichnis

$A_C$	turbulenter Austauschkoeffizient der Substanz $C$ ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )
AAIW	Antarktisches Zwischenwasser
AAMW	Australasiatisches Mittelmeerwasser
$\alpha$	Wärmeausdehnungskoeffizient ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
Alter	Zeit, die vergangen ist, seit der letzte Kontakt mit der Atmosphäre stattfand
antizyklonal	auf der Nordhalbkugel (Südhalbkugel) Drehung im (entgegen) Uhrzeigersinn
AOU	apparent oxygen utilization: Differenz vom gemessenen Sauerstoff zum Sättigungswert ( $\mu\text{mol kg}^{-1}$ )
$\beta$	(1) meridionale Ableitung des Coriolisparameters $f$ (2) haliner Kontraktionskoeffizient ( $\text{psu}^{-1}$ )
CLIVAR	Climate Variability and Predictability Programme: Internationales Programm zur Untersuchung von Klimaänderungen
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
CTD	Conductivity, Temperature, Depth - Sonde: Meßgerät zur Bestimmung von Leitfähigkeit (Salzgehalt), Temperatur und Druck
Divergenz	horizontale Bewegung von Fluid in ein Volumen, wobei weniger Fluid aus dem Volumen ausströmt als einströmt, mit dem Effekt, daß es vertikal ausströmen muß
Ekman-Schicht	ca. 50 m tiefe Schicht des Ozeans, die durch Reibung vom Windschub bewegt wird
Ekmanpumping-geschwindigkeit	Vertikalkomponente der Geschwindigkeit, erzeugt durch eine Divergenz der horizontalen Geschwindigkeiten
$f$	Coriolisparameter, der auch Ausdruck der planetarischen Vorticity ist
FCKW (F-11, F-12)	Fluorchlorkohlenwasserstoffe können als Wassermassentracer dienen, sind auch als "Ozon Killer" bekannt
FRAM	Fine Resolution Antarctic Model: Numerisches Simulationsmodell des Südlichen Ozeans
$F_\rho$	Dichtefluß ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-2}$ )
$F_T$	Wärmefluß ( $^{\circ}\text{C m s}^{-1}$ )
$F_S$	Salzfluß ( $\text{m s}^{-1}$ )
$G, G'$	Quellwassertypenmatrix
$H$	Tiefe der Oberflächenmischungsschicht
$h_n$	Schichtdicke im $n$ -Schichten Modell der Thermokline

ICW	übergeordnete Bezeichnung für Indisches Zentralwasser und Modewasser
IEW	Indisches Äquatorialwasser
Isopykne	Linie gleicher Dichte
H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>	Silikatgehalt ( $\mu\text{mol kg}^{-1}$ )
JADE	Java Australia Dynamic Experiment
JGOFS	Joint Global Ocean Flux Study: hauptsächlich biogeochemisch ausgerichtetes internationales Forschungsprojekt zur Untersuchung der Stoffflüsse im Ozean
K <sub>C</sub>	molekulare Diffusion einer Substanz <i>C</i>
L	Verdunstungswärme von Wasser ( $\text{J kg}^{-1}$ )
LMN	“layer of no motion”: eine als bewegungslos angenommene Schicht im Ozean, die als Referenz zur Berechnung von absoluten Geschwindigkeiten genutzt werden kann
meridional	parallel zu den Längengraden, also Nord-Süd orientiert
Modewasser	Wassermasse mit homogener Tracerverteilung über ein großes Volumen
NIOZ	Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee
NO <sub>3</sub>	Nitratgehalt ( $\mu\text{mol kg}^{-1}$ )
O <sub>2</sub>	Sauerstoffgehalt ( $\mu\text{mol kg}^{-1}$ )
Oberflächen- mischungsschicht	Schicht im Ozean, die nur horizontale Dichtegradienten aufweist und dem Einfluß des Windes und der Wärme flüsse direkt ausgesetzt ist
OMP Analyse	Optimum Multiparameter Analyse: eine Wassermassen Mischungsanalyse, die neben Temperatur und Salzgehalt, auch Nährstoffe und Sauerstoff einbezieht
OUR	oxygen utilization rate: Zehrungsrate des Sauerstoffs ( $\mu\text{mol (kg y)}^{-1}$ )
ΔP	Änderungen im Phosphatgehalt durch biogeochemische Prozesse (Resultat der OMP Analyse)
PGW	Persischer Golf Wasser
PO <sub>4</sub>	Phosphatgehalt ( $\mu\text{mol kg}^{-1}$ )
$q, q_n$	potentielle Vorticity ( $q = f/h_n$ ) in vereinfachter Form, bei Vernachlässigung der Reibung, der relativen Vorticity ( $\zeta$ ) und bei stationären Verhältnissen, $q_n$ ist bezogen auf die Schicht $n$ der Schichtdicke $h_n$
Q	Netto-Wärme flu ß oder Wärmeumsatz ( $\text{W m}^{-2}$ )
Q <sub>L</sub>	latenter Wärme oder Verdunstungswärme ( $\text{W m}^{-2}$ )
Q <sub>S</sub>	sensibler Wärme oder fühlbare Wärme ( $\text{W m}^{-2}$ )
Q <sub>STR</sub>	Strahlungsumsatz aus absorbiert er kurzwe lli ger und abgegebener langwe lli ger Strahlung ( $\text{W m}^{-2}$ )

$R_\rho$	Verhältnis der Beiträge des vertikalen Temperaturgradienten und des vertikalen Salzgehaltsgradienten zum vertikalen Dichtegradienten
RSW	Rotes Meer Wasser
$\rho$	Dichte des Seewassers: abhängig von Temperatur, Salzgehalt und Druck
s	Salzgehalt (kg)
S	Salzgehalt (psu)
$S_{ann}$	mittlere Subduktionsrate: mittlerer Transport vom Wasser aus der Oberflächenmischungsschicht in die Thermokline, berechnet aus Temperatur- und Salzgehaltsdaten
SAMW	Subantarktisches Modewasser: Im Osten des Subtropenwirbels subduziertes Modewasser
STMW	Subtropisches Modewasser: Im Westen des Subtropenwirbels subduziertes Modewasser
$S_\tau$	wie $S_{ann}$ aber aus Altersgradienten berechnet
SIO	Scripps Institute of Oceanography
SOC	Southampton Oceanographic Centre
Subduktion	Transport vom Wasser aus der Oberflächenmischungsschicht in die Thermokline
Sv	Transporteinheit zu Ehren von H. U. Sverdrup, 1 Sv entspricht $10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
T	Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )
Thermokline	saisonale Thermokline: Schicht die im Sommer den größten Temperaturgradienten aufweist; permanente Thermokline: Schicht die im Jahresmittel den größten Temperaturgradienten aufweist
$\tau$	(1) Windschubvektor ( $\text{N m}^{-2}$ ) (2) Alter von Wasser (y)
$\theta$	potentielle Temperatur bezogen auf die Oberfläche ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\sigma_\theta$	abkürzende Schreibweise für die potentielle Dichte bezogen auf die Oberfläche $\sigma_\theta = \rho - 1000 \text{ (kg m}^{-3}\text{)}$
Wassermasse	ein Volumen im Ozean, dessen Bestandteile die selbe Bildungsgeschichte aufweisen
V-N	Differenz von Verdunstung (V) und Niederschlag (N) ( $\text{m s}^{-1}$ )
WCRP	World Climate Research Programme
WHP	WOCE Hydrographic Programme
WOCE	World Ocean Circulation Programme, maritimer Teil des WCRP

$x_i$	Vermischungsanteil des $i$ -ten Quellwassers (Ergebnis der OMP Analyse)
$\zeta$	relative Vorticity, gibt die Wirbelhaftigkeit eines Geschwindigkeitsfeldes an
zonal	Richtung parallel zum Äquator, also Ost-West orientiert
zyklonal	auf der Nordhalbkugel (Südhalbkugel) Drehung entgegen (im) Uhrzeigersinn