

Die windgetriebene Zirkulation im nördlichen Arabischen Meer

Von Khawaja Zafar Elahi und Jürgen Sündermann

Zusammenfassung

Es wird ein hydrodynamisch-numerisches Modell des Nordteils des Arabischen Meeres vorgestellt. Dieses wird zunächst zur Simulation der Gezeitenvorgänge benutzt und anhand gemessener Daten verifiziert. Anschließend wird damit die saisonale Zirkulation für Südwest- und Nordostmonsun berechnet.

Summary

The circulation pattern in the northern Arabian Sea is presented for the well defined wind fields, which are classified as the South-West Monsoon and the North-East Monsoon. To check the reproduction ability of the model, first tidal waves are computed. The results show a good agreement with the known values given in literature.

Inhalt

1. Problemstellung	198
2. Das hydrodynamisch-numerische Modell	198
3. Die Verifikation des Modells	200
4. Die monsunerzeugte Zirkulation	200
5. Schriftenverzeichnis	202

1. Problemstellung

Im Indischen Ozean und insbesondere im Arabischen Meer gibt es eine stark ausgeprägte saisonale Zirkulation. Diese ist windgetrieben und wird verursacht durch den Südwestmonsun (Mai bis September) und den Nordostmonsun (November bis März). Im folgenden wird versucht, die aus Beobachtungen bekannten Strömungen mit Hilfe eines hydrodynamisch-numerischen Modells zu simulieren.

2. Das hydrodynamisch-numerische Modell

Grundlage des mathematischen Modells sind die vertikal integrierten hydrodynamischen Differentialgleichungen, die in sphärischen Koordinaten formuliert werden:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial u}{\partial t} - 2\omega \sin \phi v + \frac{r}{H} \sqrt{u^2+v^2} u - A \Delta u + \frac{g}{R \cos \phi} \frac{\partial \xi}{\partial \lambda} &= \frac{\mu}{H} \sqrt{u^2+v^2} u \\
\frac{\partial v}{\partial t} + 2\omega \sin \phi u + \frac{r}{H} \sqrt{u^2+v^2} v - A \Delta v + \frac{g}{R} \frac{\partial \xi}{\partial \phi} &= \frac{\mu}{H} \sqrt{u^2+v^2} v \\
\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \left(\frac{\partial}{\partial \lambda} (Hu) + \frac{\partial}{\partial \phi} (Hv \cos \phi) \right) &= 0
\end{aligned} \tag{1}$$

Dabei bedeuten:

- u, v Komponenten der vertikal integrierten Horizontalgeschwindigkeit in Ost- bzw. Nordrichtung
- ζ Wasserstand = Abweichung vom ungestörten Niveau
- A Austauschkoeffizient in horizontaler Richtung
- g Erdbeschleunigung
- h ungestörte Wassertiefe
- $H = h + \zeta$, aktuelle Wassertiefe
- r Koeffizient der Bodenreibung
- R Erdradius
- t Zeit
- U, V Komponenten der Windgeschwindigkeit in Ost- bzw. Nordrichtung
- λ, \varnothing geographische Länge und Breite
- μ Windschubkoeffizient
- ω Winkelgeschwindigkeit der Erddrehung

Hinzu kommen die folgenden Randbedingungen:

an festen Berandungen (Ozean):

$$\zeta(t) = \sum_{i=1}^4 a_i \cos(\sigma_i t - \kappa_i) \quad (2)$$

mit a_i = Amplitude, σ_i = Frequenz und κ_i = Phase der einlaufenden Partialtide.

Es wurden die vier wichtigsten halb- und eintägigen Partialtiden (M_2, S_2, K_1, O_1) betrachtet. Im Falle der winderzeugten Zirkulation wurden die Gezeiten vernachlässigt ($a_i = 0$ für alle i).

Als Anfangszustand wurde ein ungestörtes Meer angenommen:

$$u = v = 0; \zeta = 0 \quad (3)$$

Das derart formulierte Anfangs-Randwert-Problem {1, 2, 3} wurde numerisch mit Hilfe eines expliziten Differenzenverfahrens gelöst (SÜNDERMANN, 1966; KHAWAJA Z. E., 1979). Das verwendete Rechengitternetz zeigt die Abb. 1.

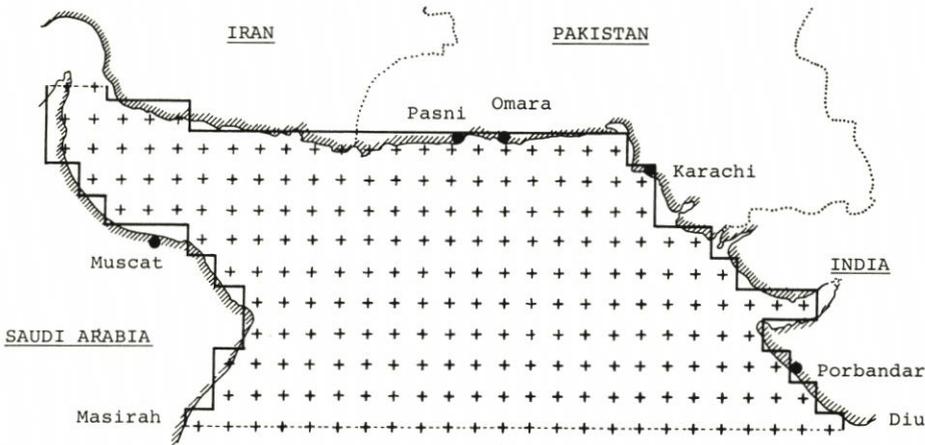


Abb. 1. Gitternetz für das nördliche Arabische Meer

Es wurden die folgenden Konstanten benutzt:

$\Delta\lambda = \Delta\varnothing = 0.5^\circ$	Ortsschritt	$r = 0.003$	Reibungskoeffizient
$\Delta t = 150$ bzw. 1200 s	Zeitschritt	$\mu = 3.2 \cdot 10^{-6}$	Windschubkoeffizient
$A = 100$ m ² /s	Austauschkoeffizient	$W = \sqrt{U^2 + V^2} = 5$ m/s	Windgeschwindigkeit

3. Die Verifikation des Modells

Die Verifikation des Modells wurde anhand der Gezeiten vorgenommen, da dafür relativ ausführliches Datenmaterial vorlag. Es wurde mit einem Zeitschritt von 150 s gerechnet. In einer Reihe von Rechenläufen wurden die wichtigsten vier Partialtiden M_2 , S_2 , K_1 , O_1 getrennt und in ihrem Zusammenwirken simuliert. Als ein typisches Ergebnis zeigt die Abb. 2 die Linien gleicher Amplitude und Phase für die M_2 -Gezeit.

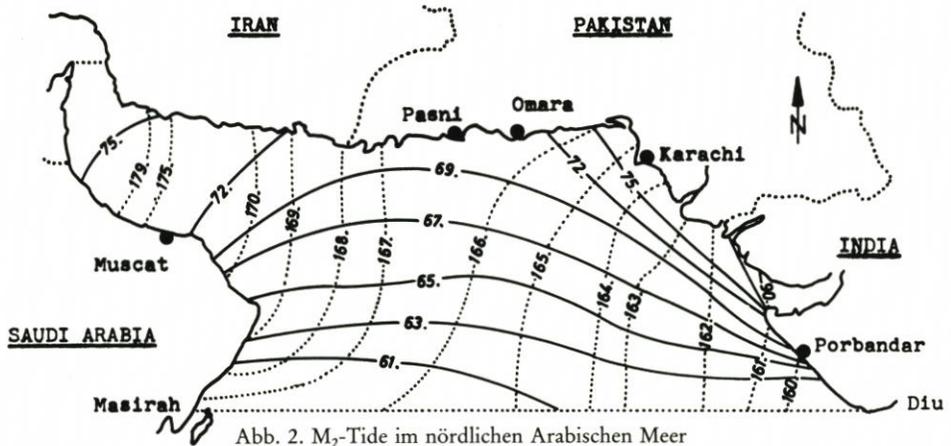


Abb. 2. M_2 -Tide im nördlichen Arabischen Meer

- Linien gleicher Amplitude (cm)
 - - - Linien gleicher Phase (Grad, bezogen auf den Greenwich-Meridian)

Die Güte des Modells kann anhand eines Vergleichs der berechneten und beobachteten harmonischen Konstanten (Amplituden und Phasen) beurteilt werden; letztere wurden den pakistanischen Gezeitentafeln (1978) entnommen. Die berechneten Größen wurden durch harmonische Analyse aus Zeitserien gewonnen, die das numerische Modell der Überlagerung der vier Partialtiden ergeben hatte.

Tabelle 1 zeigt den Vergleich der harmonischen Konstanten für die fünf Orte Porbandar, Karachi, Ormara, Pasni und Muscat. Die Zahlenwerte sind durchweg in sehr guter Übereinstimmung.

4. Die monsunerzeugte Zirkulation

Für die windgetriebene Zirkulation wurde im Prinzip dasselbe Modell zugrunde gelegt. Allerdings wurden dabei die natürlichen Tiefen, die bis zu 3500 m erreichen, entsprechend der EKMANSchen Triftstromtheorie (DIETRICH und KALLE, 1963) durch die konstante EKMANSche Reibungstiefe

$$D = \sqrt{\frac{A}{\omega \sin \varnothing}} = 72 \text{ m}$$

für eine mittlere Breite \varnothing des nördlichen Arabischen Meeres ersetzt. Damit wurde der Tatsache Rechnung getragen, daß der Wind nur die oberflächennahen Wassermassen und nicht die gesamte Wassersäule bewegt. Die höhere numerische Stabilität bei geringeren Tiefen ließ nun einen Zeitschritt von $\Delta t = 1200 \text{ s}$ zu.

Als ein numerisches Ergebnis zeigt die Abb. 3 die stationäre Zirkulation für den Südwest-

Tab. 1. Berechnete (c) und beobachtete (o) Amplituden (a) und Phasen (k) der vier wichtigsten Partialtiden

TIDAL CONSTITUENT		M ₂		S ₂		K ₁		O ₁	
SITE	a (cm)	c	o	c	o	c	o	c	o
	κ (deg.)								
Porbandar	a	67,92	65,0	27,57	24,0	45,17	46,0	24,11	24,0
	κ	161,43	157,0	191,51	220,0	345,89	336,0	342,10	342,0
Karachi	a	79,91	79,8	31,47	29,6	39,22	41,1	23,68	20,0
	κ	166,34	163,7	194,67	193,9	347,51	342,2	343,93	343,2
Omara	a	69,54	70,0	27,27	24,0	37,72	43,0	22,94	18,0
	κ	166,29	156,1	194,24	176,0	346,47	340,0	343,68	343,3
Pasni	a	68,98	69,0	27,07	26,0	37,38	31,0	22,91	24,0
	κ	166,37	165,0	194,48	192,0	346,42	346,0	343,79	346,3
Muscat	a	69,75	63,3	27,27	23,7	35,99	38,8	22,48	20,2
	κ	171,74	159,8	199,33	189,8	347,76	341,4	345,71	342,4

Monsun. Das Strömungsfeld wird dominiert durch eine großräumige Zirkulation im Uhrzeigersinne, der sich ein tangentialer Einstrom vom Persischen Golf überlagert. Die bekannte „westward intensification“ des antizyklonischen Wirbels, verursacht durch die Breitenabhängigkeit des Coriolisparameters, ist an der arabischen Küste deutlich zu erkennen.

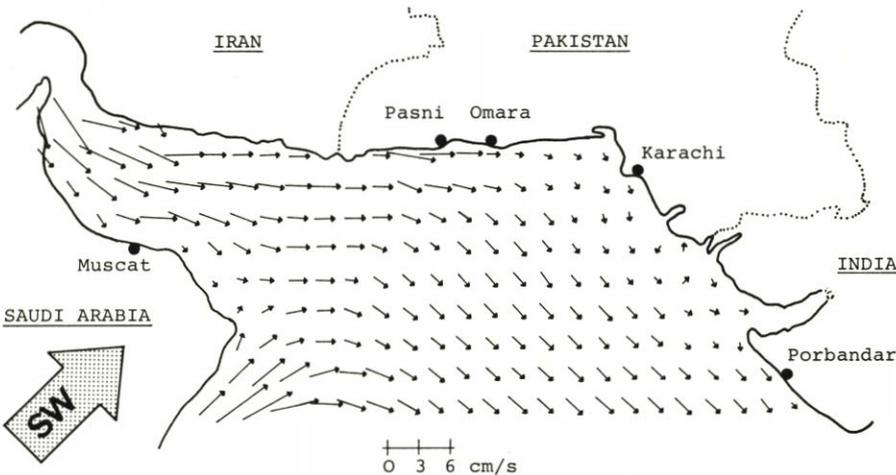


Abb. 3. Berechnete stationäre Zirkulation im nördlichen Arabischen Meer während des Südwest-Monsuns

Ein Vergleich mit den Beobachtungsergebnissen von G. SCHOTT (DIETRICH und KALLE, 1963), siehe Abb. 4, zeigt eine recht gute generelle Übereinstimmung.

Das entsprechende numerische Ergebnis für den Nordost-Monsun, das sich in einer Umkehrung des Zirkulationssystems äußert, ist in Abb. 5 dargestellt.

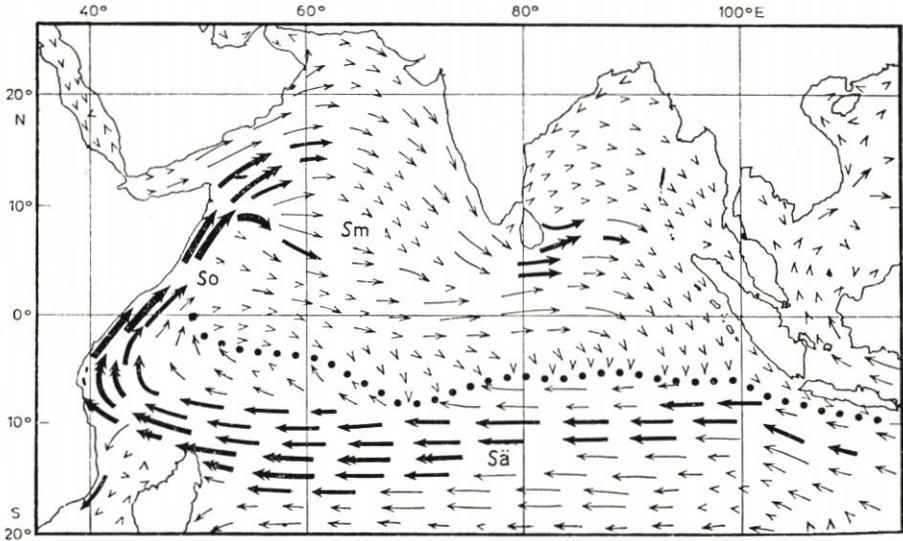


Abb. 4. Oberflächenströmungen im Indischen Ozean im Nordsommer (nach G. SCHOTT)

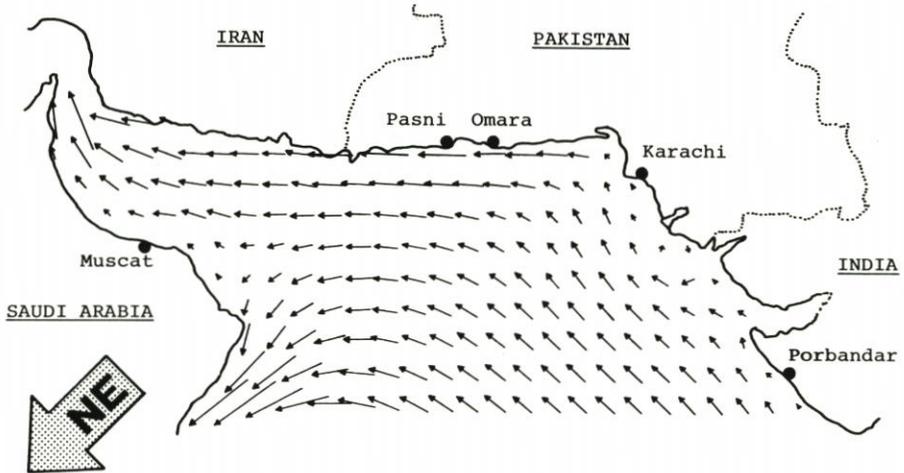


Abb. 5. Berechnete stationäre Zirkulation im nördlichen Arabischen Meer während des Nordost-Monsuns

5. Schriftenverzeichnis

DIETRICH, G. und KALLE, K.: General Oceanography. John Wiley & Sons, New York, 1963.
KHAWAJA, Z. E.: Berechnung von lokalen Gezeitenphänomenen in einem Gebiet mit geringem Beobachtungsmaterial mit Anwendung auf die Sonmiani-Bucht. Mitt. Franzius-Inst. f. Wasserbau und Küsteningenieurwesen, TU Hannover, H. 48, 1978.
Pakistan Tide Tables 1978: The Hydrographic Department. Pakistan Navy, Karachi, 1978.
SÜNDERMANN, J.: Ein Vergleich zwischen der analytischen und der numerischen Berechnung winderzeugter Strömungen und Wasserstände in einem Modellmeer mit Anwendungen auf die Nordsee. Mitt. Inst. f. Meereskunde d. Univ. Hamburg, H. 4, 1966.