

1 Akustische Tomographie im Ozean

Der Ozean bedeckt über 70% der Erdoberfläche. Der Energieaustausch zwischen Atmosphäre und Ozean leistet einen großen Beitrag zur aktuellen Wetterentwicklung und zum Temperaturengleich zwischen hohen und niedrigen Breitengraden. Die Dynamik im Ozean wird einerseits durch Windreibung an der Oberfläche, andererseits durch Dichteunterschiede, hervorgerufen von Temperatur- und Salinitätsgradienten, angetrieben. Typische Messgrößen in der Ozeanographie sind Temperatur, Salzgehalt und Strömung. Häufig werden Messgeräte an einem Kabel befestigt, welches durch einen Ankerstein am Meeresboden und durch Auftriebskörper senkrecht im Wasser gehalten wird. Typischerweise erhält man so zeitlich hoch aufgelöste Punktmessungen. Zur Beobachtung von Wassermassen- und Wärmetransporten wird jedoch die Messgröße integral über die Tiefe und eine gewisse Distanz benötigt. Eine elegante Möglichkeit integrierter Messungen eröffnet die gute Schalleitung des Wassers auf der die Ozeantomographie basiert.

Im Gegensatz zu den elektromagnetischen Wellen kann Schall nahezu ungehindert weite Distanzen im Wasser zurücklegen. Die Schallgeschwindigkeit im Wasser beträgt etwa 1500m/s und hängt hauptsächlich von der Temperatur und der Tiefe ab. Als Merkregel gilt: Die Schallgeschwindigkeit nimmt pro Grad Celsius um 5m/s und pro Meter Tiefenunterschied um 0.002m/s zu. Aus dem hohen Temperaturgradienten in den oberen 1000m und durch die Druckzunahme mit der Tiefe ergibt sich für die Schallgeschwindigkeit ein typisches Vertikalprofil (Abbildung 1 links). An der Oberfläche herrschen hohe Wassertemperaturen, welche für eine hohe Schallgeschwindigkeit sorgen. Mit steigender Tiefe sinkt die Temperatur, so dass auch die Schallgeschwindigkeit abnimmt. Unterhalb von etwa 1000m sind die Temperaturänderungen gering, und der ansteigende Druck sorgt wiederum für eine Zunahme der Schallgeschwindigkeit. Dazwischen befindet sich ein Minimum, typischerweise bei 1000m Tiefe. In polaren Gebieten ist der Temperaturgradient in der gesamten Wassersäule gering, somit kann der Druckeffekt über die gesamte Wassersäule dominieren (Abbildung 1 rechts).

Analog zu allen anderen Wellen werden auch Schallwellen durch Variationen in der Ausbreitungsgeschwindigkeit gebeugt und reflektiert. In Abbildung 2 sind einige Strahlenwege für die beiden in Abbildung 1 dargestellten Profile aufgezeichnet. Gut erkennbar ist die Ablenkung der Strahlen zum Mi-

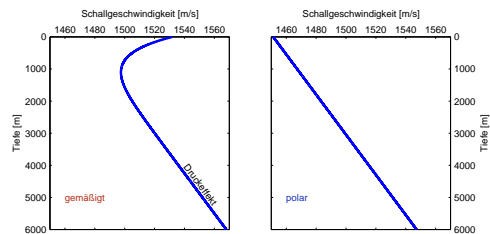


Abbildung 1: *Stilisierte Schallgeschwindigkeit für die gemäßigten (links) und die polaren Breiten (rechts).*

nimum hin. Die Strahlen werden durch dieses Minimum *gefangen* und können ungestört tausende von Kilometern wandern. Dieses Schallgeschwindigkeitsminimum wird deshalb als der *Schallkanal* oder auch *Sofarkanal* bezeichnet.

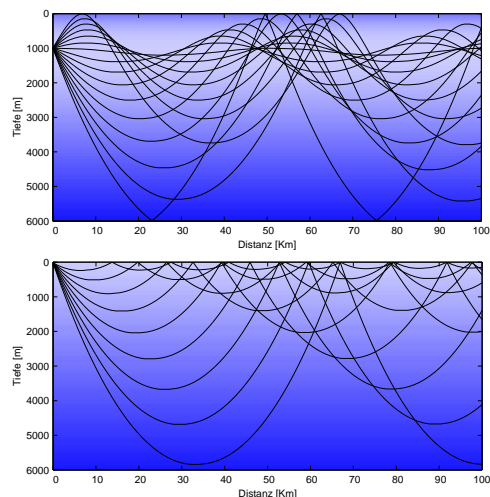


Abbildung 2: *Einige Schallstrahlen für das Profil gemäßigter (oben) und polarer Breiten (unten).*

In der Ozeantomographie werden die Schalllaufzeiten zwischen einem Sender und Empfänger aufgezeichnet und ausgewertet. Setzt man in die Abbildungen 2 jeweils noch einen Empfänger, so wird deutlich, dass nicht jeder Strahl, der am Sender ausgestrahlt wird, auch den Empfänger erreicht. Strahlen, die den Empfänger erreichen, werden *Eigenstrahlen* genannt. In den allermeisten Fällen gibt es mehrere Eigenstrahlen. D.h. ein Signal, das am Sender ausgesandt wird, kann mehr als einmal am Empfänger gehört werden. In Abbildung 3 sind Eigenstrahlen für das gemäßigte Profil dargestellt. Sender und Empfänger befinden sich in 1000m Tiefe und sind 50km voneinander entfernt.

In den mittleren Breiten ist also die Schallgeschwindigkeit an der Oberfläche und in der Tie-

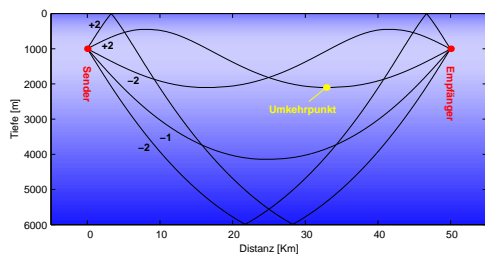


Abbildung 3: *Eigenstrahlen für das gemäßigte Profil. Die Zahlen sind die Identifizierungsnummern der Strahlen.*

fe größer als im Bereich des Schallkanals. In der Tiefe ist sie sogar am größten. Für Strahlen ohne Bodenreflexionen gilt, dass die Strahlen, die durch das tiefe Wasser wandern, diejenigen sind, die zuerst den Empfänger erreichen, und dass obwohl deren zurückgelegte Strecke etwas länger ist als die der flach verlaufenden Strahlen. Diese Unterschiede in den Weglängen sind gering, da die horizontalen Skalen viel größer sind als die vertikalen. Anders ausgedrückt, die Strahlen mit den tiefsten Umkehrpunkten haben die kürzesten Laufzeiten. Die Strahlen, die sich stets in der Nähe des Schallgeschwindigkeitsminimums befinden, haben in der Regel die längsten Laufzeiten. Zudem sind deren Signale häufig gegenseitig überlagert, so dass sie mit Hilfe der Strahlentheorie nicht mehr auswertbar sind. Hier kommen viele Strahlen mit ähnlichen Laufzeiten am Empfänger an, welche die gemessene Intensität durch Überlagerung stark erhöhen. Dieser Bereich der letzten Ankunftszeiten wird als der *Cutoff* bezeichnet.

Die Schalllaufzeit hängt natürlich von der Schallstrahlenlänge und der Schallgeschwindigkeit ab. Die Schallgeschwindigkeit erfährt ihre größten Variationen durch die Temperaturschwankungen. Ist die Weglänge bekannt, so lässt sich aus der gemessenen Schalllaufzeit direkt die mittlere Temperatur entlang des Schallweges ableiten. Eine gewisse Strukturierung lässt sich durch die Auswertung verschiedener Eigenstrahlen erreichen. So können zum Beispiel die oberflächennahen Strahlen in Abbildung 2 (unten) Aufschluss über die Wassertemperatur an der Oberfläche liefern. Werden anschließend die Strahlen ausgewertet die ebenfalls durch das tiefe Wasser verlaufen, so kann die Temperatur in der Tiefe extrahiert werden. Die gemessene Laufzeit hängt jedoch auch von der Strömungsgeschwindigkeit zwischen den Geräten ab. Kann dieser Effekt nicht vernachlässigt werden, benutzt man nach Möglichkeit Geräte, welche gleichzeitig Sender und Empfänger (*Transceiver*) sind. Bildet man die Sum-

me der Laufzeiten der reziproken Strahlen entfällt der Strömungseinfluss, bildet man hingegen die Differenz entfällt der Temperatureinfluss und die mittlere Strömung kann gemessen werden [3].

Im folgenden werden einige Ergebnisse der Tomographie in der Straße von Gibraltar und in der Labradorsee präsentiert. Die Straße von Gibraltar soll als Beispiel für ein gemäßigtes Schallgeschwindigkeitsprofil mit einer Schallkanaltiefe von 200m dienen, die Labradorsee als Beispiel für ein polares Profil.

Die Straße von Gibraltar ist die einzige ozeanographisch relevante Stelle, an der das Mittelmeer Wassermassen mit dem offenen Ozean austauschen kann. Die Verdunstung über dem Mittelmeer ist höher als der Niederschlag, deshalb muss im Mittel Frischwasser durch die Straße zugeführt werden. Drei Transceiver wurden im April 1996 in der Straße von Gibraltar für 17 Tage verankert. Es sollte getestet werden, in wie weit sich Tomographie dort zur Beobachtung des Durchflusses eignet. Die Instrumente wurden so positioniert, dass ein Schallweg quer und einer diagonal zur Straße entstand. Auf beiden Sektionen konnten Laufzeiten von drei Schallstrahlen ausgewertet werden.

Die Laufzeitdifferenzen des -1 Strahls diagonal zur Straße (Abbildung 4) konnten zur integralen Messung des Mittelmeerausstroms benutzt werden [4]. In Abbildung 5 ist die mittlere Strömung entlang des Schallstrahls und in Hauptachsenrichtung der Straße dargestellt. Verglichen wurde diese mit einem empirischem Gezeitenmodell, da konventionelle Rotorströmungsmesser nur ungenaue Mittelwerte über die gesamte Straßenbreite lieferten. Aus den Rotorströmungsmessern ist jedoch die Langperiodische Komponente der Strömung extrahiert worden, um diese zum Gezeitenmodell zu addieren.

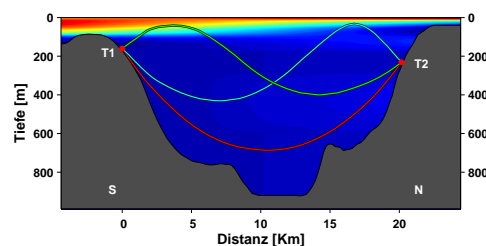


Abbildung 4: *Eigenstrahlen des Diagonalschnitts in der Straße von Gibraltar. Rot: -1 ; Magenta: -2 ; Gelb: $+2$ Strahl. Hintergrund: Temperatur.*

Die Laufzeitsummen der -1 und ± 2 Strahlen beider Sektionen wurde zur Bestimmung der Temperatur, der Grenzschichttiefe zwischen dem Atlantik- und Mittelmeerwasser und dessen Neigung be-

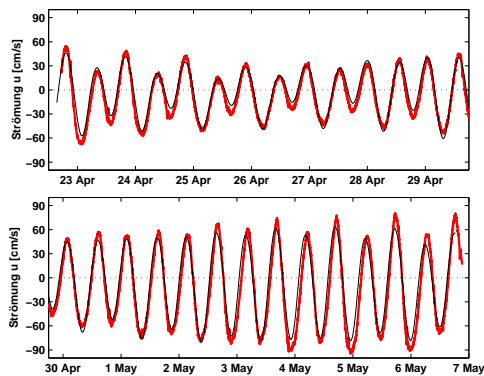


Abbildung 5: *Strömung des Mittelmeerwassers in der Straße von Gibraltar. Akustische Messung (Rot) im Vergleich zu einem Gezeiten Modell (schwarz). Gemessene Langperiodische Schwankungen wurden den Modelldaten aufaddiert.*

nutzt [1]. Hierbei mussten starke Nichtlinearitäten berücksichtigt werden. Diese entstanden durch die Abhängigkeit der ± 2 Schallstrahlenwege von Temperaturschwankungen. Abbildung 6 zeigt die Temperaturentwicklung der oberen 250m im Zentrum des östlichen Eingangs der Straße. Gut sichtbar sind die großen Vertikalbewegungen der Wassermassen mit der halbtägigen Gezeit. Weiterhin sind auch abrupte Vertikalbewegungen von ca. 100m in nur wenigen Minuten erkennbar. Diese werden durch starke interne Wellen verursacht, welche am westlichen Eingang durch hydraulische Kontrolle ausgelöst werden und nach Osten durch die Straße wandern [2].

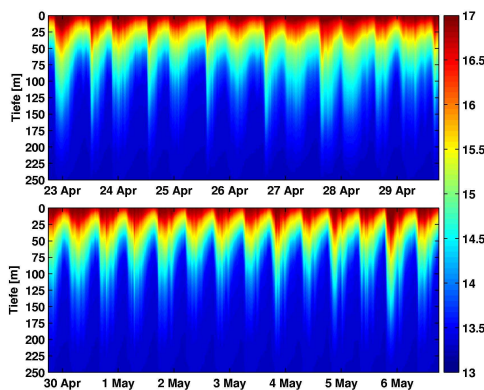


Abbildung 6: *Temperaturentwicklung der oberen 250m im Zentrum des östlichen Eingangs der Straße von Gibraltar.*

In der Labradorsee wird im Winter ein Teil des Atlantischen Tiefenwassers gebildet. Kalte und trockene Winterstürme kühlen das Wasser stark ab, zudem sorgt die Verdunstung dabei für eine Zu-

nahme des Salzgehalts. Beides erhöht die Dichte des Wassers, so dass Oberflächenwasser in die Tiefe sinken kann. Seit 1996 wird in der Labradorsee erfolgreich Tomographie über Distanzen von bis zu 330km betrieben. Entlang dem WOCE AR7W Schnitt, von der westlichen Schelfkante bis zur Position des früheren Wetterschiffs BRAVO existiert bis heute eine 5 jährige Zeitreihe (Schnitt zwischen den Verankerungen Kx1-Kx2 in Abbildung 7). Daten von einem weiteren Jahr werden in Kürze erwartet.

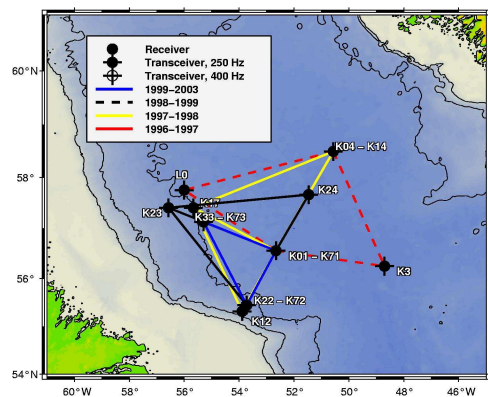


Abbildung 7: *Tomographieanordnung in der Labradorsee von 1996 bis 2003. Station BRAVO war nahe der K01-K71 Verankerungen.*

Das Schallgeschwindigkeitsprofil ähnelt stark dem polarem Profil in Abbildung 1. Demzufolge wurden die Transceiver in Oberflächennähe platziert. Die tiefreichenden Eigenstrahlen (Abbildung 8) weisen auch im Sommer Oberflächenreflektionen auf. Die Laufzeitdaten sind nach der Matched Peak Tracking Methode [5] ausgewertet worden, so dass zu jedem Messzeitpunkt ein gesamtes, über den Schnitt gemittelt, Temperaturprofil samt seinen Fehlergrenzen zur Verfügung steht. In Abbildung 9 ist die

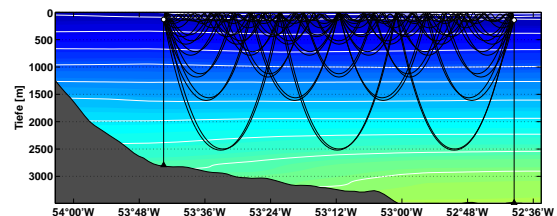


Abbildung 8: *Einige Schallstrahlen zwischen der K51 und K52 Verankerungen für die Temperatur-schichtung im Sommer 2001. Hintergrund: Schallgeschwindigkeit.*

Zeitreihe des Wärmehaltes der oberen 1800m des Kx1-Kx2 Schnittes zusammen mit dem netto NCEP

Wärmefluss dargestellt. Sieht man über die jahres-

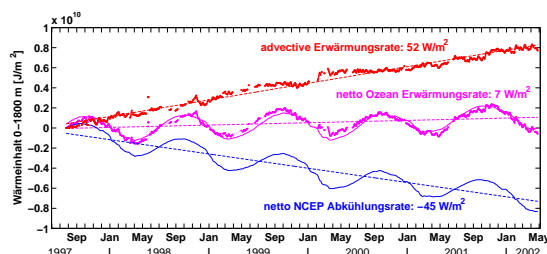


Abbildung 9: Wärmeinhalt der oberen 1800m auf dem $Kx1-Kx2$ Schnitt in der Labradorsee. Magenta: Tomographie; Blau: netto NCEP Wärmefluss; Rot: Sich daraus ergebende advective Wärmezufuhr.

zeitlichen Signale hinweg, so ist über den gesamten Zeitraum eine stetige Erwärmung der zentralen Labradorsee mit $7W/m^2$ zu erkennen. Glaubt man den NCEP Wärmeflüssen, so ergibt sich ein advektiver Wärmezuwachs von $52W/m^2$.

Vielerorts ist die Ozeantomographie bereits mit großen Erfolgen auf Skalen von 10 bis $5000km$ angewandt worden, doch befindet sie sich zur Zeit noch weit weg von dem, was man unter einem Standardverfahren verstehen würde. Noch sind die Auswertungen recht arbeitsintensiv, es gibt jedoch Bestrebungen, Gräte und Programme zu entwickeln, mit denen eine Echtzeitinversion möglich wäre. Diese Daten könnten dann auch in Ozeanvorhersagemodelle assimiliert werden.

Literatur

- [1] Tom Avsic, Uwe Send, and Burkard Baschek. Analysis of in-situ observations in the strait of gibraltar. In *The 2nd Meeting on the Physical Oceanography of Sea Straits*, pages 69–72. Southampton Oceanography Centre, 2002.
- [2] Peter Brandt, Alpers Werner, and Jan O. Backhaus. Study of the generation and propagation of internal waves in the strait of gibraltar using a numerical model and synthetic aperture radar images of the european ers1 satellite. *Journal of Geophysical Research*, 101(C6):14237–14252, 1996.
- [3] Walter Munk, Peter Worcester, and Carl Wunsch. *Ocean Acoustic Tomography*. Cambridge University Press, 1995.
- [4] Uwe Send, Peter Worcester, Bruce D. Cornuelle, Christopher O. Tiemann, and Burkard Baschek. Integral measurements of mass transport and heat content in the strait of gibraltar

from acoustic transmission. *Deep-Sea Research II*, 49(19):4069–4095, 2002.

- [5] Emmanuel E. Skarsoulis, G. A. Athanassoulis, and Uwe Send. Ocean acoustic tomography based on peak arrivals. *Journal of Acoustical Society of America*, 100(2):797–813, 1996.