

„Was bringt das Meer zum Strömen?“ - Grundzüge der thermohalinen Zirkulation

1. Grundlagen

Der Wärmetransport an der Erdoberfläche von niedrigen zu hohen geographischen Breiten erfolgt in etwa gleichem Maße durch Luft- und Wasserströmungen; beide werden von Dichteunterschieden angetrieben, die Wasserströmungen zusätzlich durch oberflächlich angreifenden Wind. Während die Dichteunterschiede der Luft (bei gleichem Druck) nur auf Temperaturunterschieden beruhen, werden sie im Meerwasser auch durch unterschiedlichen Salzgehalt hervorgerufen. Dieser wird durch Verdunstung und Meereisbildung erhöht, durch Niederschlag und Süßwassereinstrom von Land verringert. Wärme wird zwischen der Atmosphäre und dem Meerwasser durch Strahlung, Leitung und Verdunstung ausgetauscht. In der folgenden schematischen Darstellung (Abbildung 1) sind die Ursachen der Meereszirkulation so eingezeichnet, daß sie die Strömung alle in derselben Richtung antreiben.

Modellrechnungen und Daten der Klimageschichte zeigen, daß eine Änderung der Salzgehalte und Temperaturen an verschiedenen Stellen der Meeresoberfläche infolge einer anthropogen veränderten atmosphärischen Strahlungsbilanz die Meereszirkulation merklich beeinflussen kann. Speziell kann die Stärke des im Nordatlantik absinkenden Stromes abgekühlten Oberflächenwassers durch verringerten Salzgehalt an dieser Stelle abnehmen. Dadurch würde auch der Nachfluß von warmem Oberflächenwasser von Süden vermindert, also der Golfstrom geschwächt, und in Europa würde die mittlere Temperatur merklich absinken.

2. Experimente

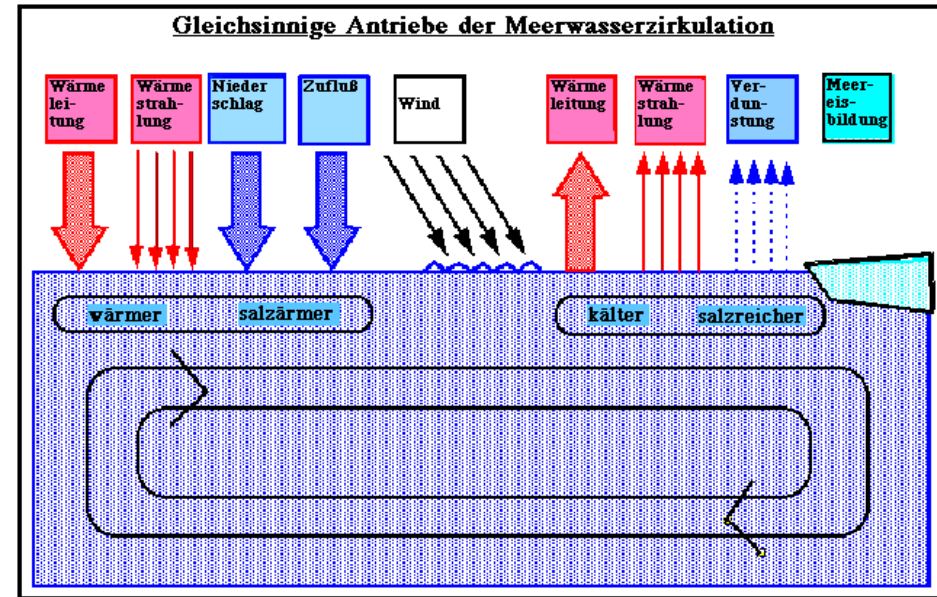
Die folgenden Experimente sollen die Einflüsse der Verteilung von Temperatur und Salzgehalt auf die Stabilität bzw. die Strömung in einem einfachen Wasserkreislauf demonstrieren und auf Dichteunterschiede zurückführen.

2.1. Aufbau

Der Zusammenbau der Apparatur geht aus Abbildung 2 hervor. Ein ca. 1m langes Stück des Kunststoffschlauchs wird zum U-Rohr geformt, seine oberen Enden werden mit Hilfe der beiden T-Stücke und eines ca. 15 cm langen Schlauchstücks querverbunden. Zwei weitere Schlauchstücke von je etwa 10 cm Länge werden oben an die T-Stücke angesetzt. Mit den Kabelschellen wird alles auf einem Holzbrett festgeschraubt.

Der Kunststoffschlauch muß durch die Quetschhähne sicher verschlossen werden können. Wenn dies mit den üblichen Quetschhähnen nicht gelingt, empfiehlt sich der Eigenbau aus je zwei Holz- oder Flascheisenstücken von ca. 4 cm Länge und ausreichender Stärke, die durch zwei Schrauben mit Flügelmuttern fest zusammengezogen werden können.

Mit Stativmaterial wird das Brett vertikal gehalten.



Während der Versuche braucht man außerdem Wasser, Kochsalz, 2 Bechergläser, 2 Einfülltrichter, Tinte oder Lebensmittelfarbe (Leybold 30942), eine Reflektorlampe mit hoher Leistung (z.B. 1000 W-Filmleuchte), evtl. einen Plastikbeutel mit Eis, etwas Schaumgummi und einen Kolbenprober oder eine Injektionsspritze mit einem angesetzten dünnen Schlauch von 15 cm Länge.

2.2. Dichteunterschiede

2.2.1. Vorversuch

Man setzt einen Quetschhahn in die Mitte der Querverbindung, den anderen an den tiefsten Punkt des Systems und schließt beide. Nun füllt man in den linken Schenkel des U-Rohres gefärbtes Wasser, in den rechten ungefärbtes Wasser bis oberhalb der Querverbindung. Eingeschlossene Luftblasen werden durch Klopfen oder Zusammendrücken des Schlauches ausgetrieben. Dann öffnet man den unteren Quetschhahn. Die Wasserspiegel in den beiden Schenkeln stellen sich auf gleiche Höhe ein. Nach Öffnen des oberen Quetschhahnes passiert nichts.

2.2.2 Dichteunterschied durch unterschiedlichen Salzgehalt

Man geht vor wie 2.2.1, nur wird in den rechten Schenkel gesättigte Kochsalzlösung gefüllt, die dieselbe Temperatur wie das Süßwasser im anderen Schenkel hat. Nach Öffnen des unteren Quetschhahnes steht nun der Süßwasserspiegel deutlich höher als der Salzwasserspiegel. Der Grund dafür ist die höhere Dichte des Salzwassers. Öffnet man nun den oberen Quetschhahn, so fließt solange Süßwasser durch die Querverbindung von links nach rechts, bis sich in beiden Schenkeln oben gleichviel Süßwasser und unten gleichviel Salzwasser befindet; wohlgemerkt fließt nicht nur das "überstehende" Wasser aus dem Süßwasserschlenkel ab. Dies ist durch die unterschiedliche Färbung der

Wasseranteile gut zu erkennen.

2.2.3 Dichteunterschied durch unterschiedliche Temperatur

Man verfährt wie 2.2.2, diesmal wird jedoch in den rechten Schenkel heißes Wasser gefüllt, das daher eine geringere Dichte als das kalte Wasser im linken Schenkel hat. Alles weitere verläuft analog zu 2.2.2, natürlich geht die Ausgleichsströmung jetzt oben von rechts nach links. Man sollte den Versuch zügig durchführen, da das heiße Wasser sich recht schnell abkühlt und der Effekt sich dadurch verringert. Da sich die Wassermengen beim Ausgleich stärker als in 2.2.2 vermischen, ist die sich einstellende stabile Temperaturschichtung eventuell besser durch Anfassen des Schlauches als durch Betrachten der Farbstoffverteilung festzustellen.

2.3. Zirkulation

Bereits in 2.2.2 und 2.2.3 sind Ausgleichsströme zu beobachten, die jedoch schnell zu einer stabilen Schichtung der Wassermengen führen und daher zum Erliegen kommen. Will man die Zirkulation aufrechterhalten, muß der Antrieb erhalten bleiben.

2.3.1. Thermische Zirkulation

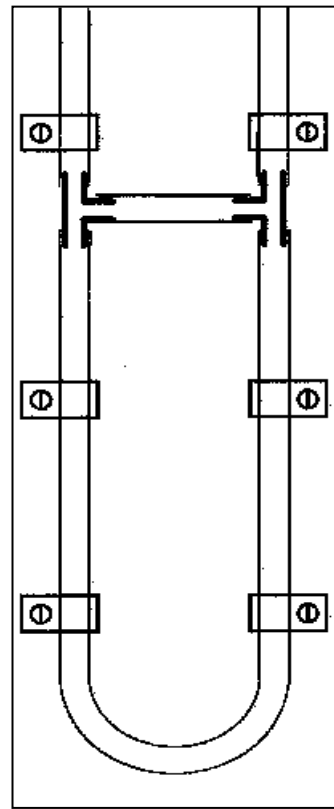
Man füllt das U-Rohr etwa zur Hälfte mit kaltem, klarem Süßwasser bzw. Salzwasser ohne Temperaturunterschiede und Dichteunterschiede. Dann setzt man die beiden Quetschhähne etwa in Höhe der Wasserspiegel und schließt sie dort, anschließend füllt man mit gefärbtem Süßwasser bzw. Salzwasser gleicher Temperatur auf. Die Hähne, die nur eine Durchmischung des gefärbten und des ungefärbten Wassers verhindern sollten, werden geöffnet. Nun beleuchtet man einen der Schenkel mit der Reflektorlampe, den anderen nicht. Nach kurzer Zeit beginnt das Wasser zu zirkulieren, da es sich im bestrahlten Schenkel erwärmt und dadurch eine geringere Dichte erhält als im anderen Schenkel.

Genauso kann man heißes Wasser einfüllen und einen Schenkel mit einem angedrückten Eisbeutel kühlen, selbstverständlich auch gleichzeitig den einen Schenkel bestrahlen und den anderen kühlen.

2.3.2. Haline Zirkulation

Vom unteren Arm eines der T-Stücke zieht man den Schlauch ab und schiebt in das offene ab und schiebt in das offene Schlauchende wenige Zentimeter weit ein kleines Stück Schaumgummi oder Schwamm ein; es soll möglichst gut Wasser durchsickern lassen, aber von allein seine Position im Schlauch halten. Nun füllt man das U-Rohr wie in 2.2.1 mit gefärbtem und ungefärbtem Süßwasser. Nach Öffnen der Quetschhähne läßt man in den Schenkel mit dem Schaumgummistück durch einen trockenen Trichter von oben Kochsalz-Kristalle rieseln, die bis auf den Schaumgummipropfen absinken. Sofort löst sich das Salz, und das entstehende Salzwasser sinkt wegen seiner höheren Dichte ab. Dadurch kommt eine Zirkulationsströmung in Gang, die anhält, solange Salz nachgeliefert wird und die Lösung noch nicht gesättigt ist.

Der Schaumgummipropfen sollte möglichst klein sein, um den Strömungswiderstand gering zu halten; er muß aber das noch ungelöste Salz sicher am Absinken hindern. Aus



demselben Grund sollte stets nur eine möglichst dünne Salzschrift auf dem Pfropfen vorhanden sein. Wenn der Stömungswiderstand zu groß ist, löst sich das Salz zwar auch, aber das absinkende Salzwasser wird dann durch Süßwasser ersetzt, das im selben Schenkel aufsteigt; diese lokale Ausgleichsströmung ist an den entstehenden Schlieren zu beobachten. Die gewünschte Zirkulation im ganzen Kreis entsteht dann jedoch nicht.

Leider kann man nicht an einer anderen Stelle des Kreislaufs auf ähnlich einfache Weise den Salzgehalt des Wassers wieder verringern.

2.3.3. Unterdrückung der thermischen Zirkulation durch eine Schichtung aus Salz- und Süßwasser

Man füllt zunächst beide Schenkel etwa zur Hälfte mit Salzwasser, darüber gefärbtes Süßwasser gleicher Temperatur; es ist kaum nötig, eine Durchmischung mit Hilfe der Quetschhähne zu verhindern. Bei hinreichend großem Salzgehalt kommt bei Bestrahlung des einen Schenkels mit der Lampe keine Zirkulation im ganzen Kreis in Gang.

Mit ein wenig Aufwand und Fingerspitzengefühl kann man auch eine zunächst angelaufene thermische Zirkulation stoppen: Man füllt das System mit Salzwasser und heizt einen Schenkel, bis die Zirkulation einsetzt. Dann saugt man mit einem Kolbenprober und angesetztem dünnen Schlauch an dem einen oberen Ende des U-Rohres Salzwasser ab, während man am anderen Ende gefärbtes Süßwasser nachfüllt. Wenn genügend Salzwasser durch Süßwasser ersetzt worden ist, setzt die Zirkulation aus.

3. Bemerkungen

Der Ozean ist sehr viel breiter als tief. Um der Realität näherzukommen, kann für die Zirkulationsversuche ein zweiter Schlauchkreislauf aufgebaut werden, dessen horizontale Ausdehnung bei prinzipiell gleicher Struktur wesentlich größer als die vertikale ist. Man kann dazu die Rückseite des Bretts benutzen. Um die geänderte Form zu realisieren, ist lediglich ein längeres Schlauchstück für die Querverbindung nötig.

Eine stabile Schichtung aus Wassermengen mit unterschiedlichen Salzgehalten kann man auch leicht in einer Wanne herstellen: Um die Durchmischung zu verhindern, bedeckt man die zunächst eingegossene dichtere Wasserschicht vollständig mit einem dünnen Blatt Papier, gießt die weniger dichte Wasserschicht darüber, läßt alles zur Ruhe kommen und entfernt dann das Papier vorsichtig zwischen den Wasserschichten horizontal und am Gefäßrand nach oben. Der Dichtesprung ist auch ohne Farbmarmierung an der optischen Wirkung der unterschiedlichen Brechungsindizes erkennbar. Außer Versuchen zur Zirkulation in einer solchen Wanne bieten sich auch Experimente zur Langzeitstabilität der Schichtung an.

Der in 2.3.3 benutzte Kolbenprober mit angesetztem dünnen Schlauch kann auch dazu dienen, bei laufender Zirkulation nachträglich Farbmarmierungen in die Strömung einzubringen.