

Der Golfstrom als Thema des Erdkundeunterrichts

von GERHARD KORTUM (Kiel)

1. Mehr Meereskunde in der Schule!

1.1 Didaktisches Plädoyer für das Weltmeer: mehr Meereskunde in der Schule

Die Didaktik der Geographie befaßt sich u. a. hauptsächlich mit der Konstruktion, kritischen Überprüfung und Fortentwicklung geographischer Curricula. Grundlegend hierfür ist die Feststellung, daß die Schulgeographie in mehrfacher Hinsicht kein 'verkleinertes' Abbild des Universitätsfaches sein kann. Die Auswahl der Lehr- und Lernstoff muß neben fachwissenschaftlichen Kriterien zum einen pädagogische, psychologische und gesellschaftswissenschaftliche Vorgaben berücksichtigen. Zum anderen kommt der Fachdidaktik - wie erst 1980 im "Basislehrplan Geographie, Empfehlungen für die Sekundarstufe I" einmütig betont wurde - die verantwortungsvolle Aufgabe zu, relevante Stoffe aus anderen, nicht an der Schule vertretenen Geowissenschaften zu integrieren: Hierzu zählen die Geophysik, Geologie, Meteorologie und schließlich die Ozeanographie bzw. Meereskunde. Dieser Funktion als geowissenschaftliches 'Zentrierungsfach' ist die Erdkunde an der Schule bislang aber nur in sehr geringem Maße gerecht geworden. Dies ist nicht zuletzt eine Folge der weitgehenden Orientierung an sozialwissenschaftlich begründeten 'allgemeinen Verhaltensdispositionen' als obersten Richtzielen, durch die besonders die überkommenen naturgeographischen Bildungswerte seit Beginn der 70er Jahre in Frage gestellt wurden.

Unsere Erde ist ein blauer Planet: Das 71 % der Erdoberfläche einnehmende Weltmeer wurde angesichts der großen Traditionen der Meereskunde in Deutschland noch bis in die 50er Jahre in Schulbüchern relativ ausführlich behandelt. Für eine unterrichtliche Umsetzung fehlten aber fachdidaktische Hilfen; zudem blieb hierfür im länderkundlichen Durchgang (nach der Behandlung Amerikas) meist keine Zeit. Nach der curricularen Neuordnung und Einführung des lernzielorientierten Geographieunterrichts wurden nur noch gelegentlich Küstenprobleme und Hafenfragen im Schulunterricht berührt. Seit Ende der 70er Jahre bahnt sich nunmehr im Hinblick auf maritime Lernstoffe eine entscheidende Wende an.

Gerade von seiten der Fachdidaktik sind mehrfach Vorstöße mit dem Ziel einer stärkeren Berücksichtigung von meereskundlichen Themen im Geographieunterricht unternommen worden. Einige Ansatzpunkte hierfür ergaben sich aus der Diskussion um die Seerechtsneuordnung, die in starkem Maße auch Fragen der Meeresnutzung in den nationalen maritimen Wirtschaftszonen und auf Hoher See einschloß.

Zudem zeigten sich gerade in den flächenmäßig nur geringen auf die BR Deutschland entfallenden Küstenmeeren in Nord- und Ostsee zunehmende

Umweltschäden im marin-ökologischen System durch überstarke oder unkoordinierte Nutzungen. Es waren hauptsächlich diese Momente, die auch in Deutschland - und zwar nicht nur in den Küstenländern - zu einer völlig neuen Perzeption des ozeanischen Natur- und Wirtschaftsraumes in Politik und Öffentlichkeit führten, zumal auch elementare Bedürfnisse einer nationalen Rohstoffsicherung hinzutraten.

Die neuen Erfordernisse einer Meerespolitik und 'marinen Raumplanung' stellten die Geographie als Hauptbezugswissenschaft zunächst vor einige Probleme, da eine 'Meeresgeographie', verstanden als 'Meereskunde' im weitesten und wörtlichen Sinne einschließlich kultur- und wirtschaftsgeographischer Aspekte, in Forschung und Lehre nur noch in unbedeutenden Ansätzen betrieben wurde (PAFFEN 1964). Da andererseits aber an die in Vergessenheit geratene lange Tradition einer "geographischen Meereskunde", wie sie von RICHTHOFEN, KRÜMMEL oder auch SCHOTT konzipiert wurde, angeknüpft werden konnte, gelang es in relativ kurzer Zeit, die "Geographie des Meeres (und der Küsten)" als wiederum anerkanntes Arbeitsgebiet neu zu etablieren, und zwar sowohl in inhaltlicher als auch in methodischer Hinsicht (KORTUM 1979; GIERLOFF-EMDEN 1980; KELLER-SOHN 1980; WÖRTLI; 1983).

Auf dem 'maritim' ausgerichteten 17. Schulgeographentag in Bremen 1980 ist der curriculare Stellenwert einer Meeresgeographie stärker betont worden. Bereits in den vorangegangenen Jahren hatten KELLER-SOHN (1978), IHDE (1980), HÄRLE (1978) und auch der Verfasser (1979), bei unterschiedlichem Bezug zur 'ozeanographischen Basis', besonders den politischen Bildungswert hervorgehoben. Inzwischen erschienen in einigen neueren lernzielorientierten Unterrichtswerken wiederum erste, teilweise längere meeresbezogene Unterrichtseinheiten und mehrere fachdidaktische Themenhefte, die erfreulicherweise auch auf die besonderen Probleme vor unseren Küsten in der Nord- und Ostsee eingehen (vgl. HAHN 1980; BOHLE 1973; siehe auch BENICKE 1973 u. a.). Die Renaissance der Meereskunde ist weitgehend das Ergebnis fachdidaktischer Bemühungen (vgl. PAFFEN/KORTUM 1984).

Aus den folgenden Ausführungen geht hervor, daß sich die Bemühungen um eine stärkere Einbindung meeresgeographischer Themen im Geographieunterricht hiermit nicht erschöpfen sollten. Es gilt nun, sich verstärkt den organisatorischen und unterrichtstechnischen Voraussetzungen für eine Behandlung ozeanischer Aspekte in der Klasse zuzuwenden. Hierzu gehören insbesondere die Berücksichtigung meereskundlicher Probleme in Lehrplanrichtlinien, Schulbüchern und Atlanten.

Grundsätzlich ist hierbei davon auszugehen, daß die in den Empfehlungen des "Basislehrplans Geographie" 1980 festgeschriebenen Stufenschwerpunkte, Lernzielbereiche und Betrachtungsweisen bis auf wenige Ausnahmen auch an marinen Beispielräumen erarbeitet werden können. Für die 7. Klasse heißt es hier, daß "an Regionen unterschiedlicher Naturausstattung" "naturgeographische Faktoren in ihrer Raumwirksamkeit" "in analytischer und kausaler Betrachtungsweise" zu behandeln sind. Ähnlich fordert z. B. der "Curriculare Lehrplan für die Mittelstufe an Gymnasien" in Bayern für die 7. Jahrgangsstufe lediglich, "die natürliche Differenzierung der Erdoberfläche in zonaler Hinsicht als Lebens- und Wirtschaftsräume des Menschen zu erarbeiten. Hiermit kann im RICHTHOFENSchen Sinne wohl nur die gesamte Planetenfläche gemeint sein, selbst wenn kontinentale Unterrichtsthemen immer im Mittelpunkt stehen werden. Was bislang aussteht, ist die Aufnahme der Meere in das Raster der regionalen

Zuordnung in den Lehrplänen. Es sollte nicht allzu schwer sein, diese entscheidende Modifikation zu erreichen.

1.2 Der Nordatlantik: Ansätze einer didaktischen Strukturierung

Nach Klärung der Legitimation meeresgeographischer Themen im Unterricht muß es eine weitere Aufgabe der Fachdidaktik sein, dem Erdkundeunterricht - auch durch die Entwicklung entsprechender Medien - praktikable Strukturierungslinien für die Umsetzung im Schulalltag zu geben. In dieser Hinsicht sind sicher unterschiedliche Ansätze denkbar und sinnvoll. Auch vor dem Hintergrund der Belange der Lehrerbildung sollte dieser Gesichtspunkt gegenüber theoretischen Erörterungen stärker vor dem konkreten Raumbezug des uns als Nordseeanlieger sicher besonders nahestehenden Atlantischen Ozeans berücksichtigt werden. Im folgenden seien die Möglichkeiten und Grenzen eines

- a. rezeptiven,
- b. analytischen,
- c. synthetischen und
- d. integrativen

Ansatzes nur kurz nach KELLERSOHN (1981) umrissen:

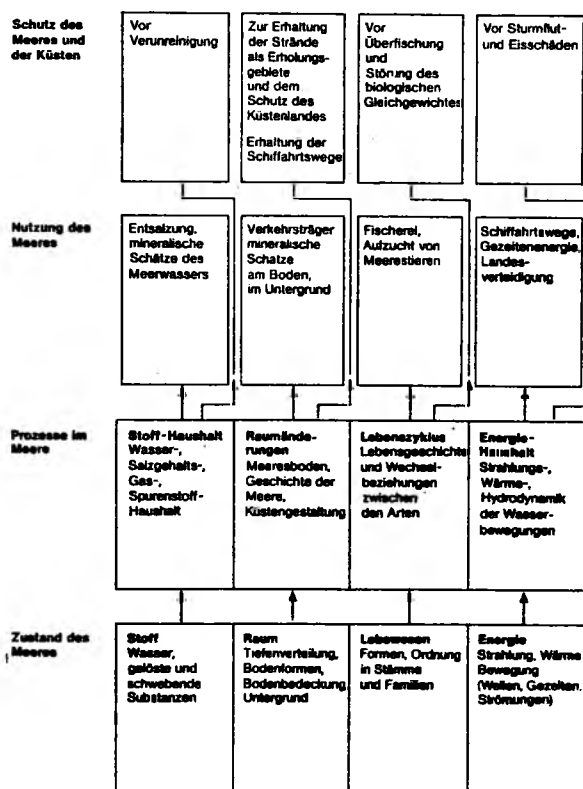
Zu a: In einem nur 'rezeptiven Ansatz' können Elemente einer 'speziellen', d. h. regionalen Meereskunde in ozeanographischer Hinsicht übernommen werden. Diese Arbeitsrichtung hat es, abgesehen von den Arbeiten SCHOTTS (z. B. der "Geographie des Atlantischen Ozeans") im Vergleich zur Länderkunde im Kontinentalraum, nie gegeben.

Zu b: Bereits das vielfach übernommene Schema "Inhalt der Meeresforschung" des Kieler Ozeanographen Günter DIETRICH (1970, vgl. Schema 1) geht mit seiner auch didaktisch durchaus ersetzbaren 'Säulenstruktur' weit über die Grenzen der 'Meereskunde im engeren Sinne' hinaus und berücksichtigt für die vier Basiskategorien "Stoff", "Raum", "Lebewesen" und "Energie" (mit Meeresströmungen) jeweils in analytischer Hinsicht bei kausaler Verknüpfung den Zustand des Meeres, die Prozessabläufe, die Nutzung und den ebenfalls curriculumrelevanten Aspekt "Schutz des Meeres und der Küsten". Schon dieser 'analytische Ansatz' kann dazu übergehen, diese Bereiche nach dem DIETRICHschen Schema miteinander zu verknüpfen. Hintergrund sollte immer ein konkreter meeresräumlicher Bezug sein: das Weltmeer insgesamt, einzelne Ozeanteile wie der Nordatlantik oder auch kleinere, uns näherstehende Meeresgebiete wie das Mittelmeer oder besonders die Nordsee als stark genutztes und in seiner marinen Ökologie zunehmend gestörtes Gezeitenmeer. Im letzten Falle sind vergleichende Hinweise zum vom Ozean nahezu abgeschlossenen Brackwassergebiet der Ostsee didaktisch besonders angebracht.

Zu c: In einem stärker 'synthetischen Ansatz' treten spezifisch meeresgeographische Betrachtungsweisen, wie der maringeographische Formenwandel oder die Bewertung der Region als Eignungs-, Nutzungs-, Aktions- oder Kommunikationsraum, unter einer bestimmten Problematisierung in den Vordergrund. Wichtig ist auch hierbei wiederum eine Zuordnung allgemeinkategorialer Themen in einer marinen Dimension. Schon hieraus ergeben sich gewisse Analogien zu einem didaktisch ungesetzten 'Kulturerdteil-Konzept', wie es neuerdings bundesweit diskutiert wurde.

Zu d: Noch weiter sollte ein 'integrativer Ansatz' bei breiterer Darstellung in einer längeren Unterrichtseinheit gehen. Hierbei kann die Gesamtheit aller wirkenden Faktoren in ihrem komplexen Zusammenspiel

vertiefend erarbeitet werden, eventuell wohl ein der Sekundarstufe II vorzubehaltender methodischer Weg.



Schema 1: Inhalt der Meeresforschung (nach DIETRICH 1970)

Die auf dem Festland zumindest in älteren länderkundlich strukturierten Schulbüchern teilweise ad absurdum geführte Lehre von 'dominanten Faktoren' bietet sicher auch heute noch didaktische Vorteile. Diese werden u. a. noch gegenwärtig in der Orientierungsstufe genutzt. Im Themenbereich "Leben und Wirtschaften unter extremen Naturbedingungen" würde sich relativ zwanglos auch das Meer einordnen lassen. Die dominante Naturscheinung des Nordatlantiks mit vielfältigen Folgewirkungen ist nun zweifellos der Golfstrom.

2. Der Golfstrom

2.1 Meeresgeographisches Schlüsselthema

Der Golfstrom als wohl bekannteste und wegen seiner mannigfachen Auswirkungen auf Europa wichtigste Meeresströmung ist immer ein aktuelles

Thema der Meereskunde und - zumindest bis 1970 - auch des Erdkundeunterrichts gewesen. Im folgenden wird nachhaltig dafür eingetreten, diesem Thema aus verschiedenen Gründen auch in einem allgemeingeographisch-lernzielorientierten Lehrplan wieder mehr Beachtung zu schenken. Es soll dabei durch eine Darstellung wichtiger neuer ozeanographischer Forschungsergebnisse deutlich gemacht werden, daß der Golfstrom bzw. daß auch dessen Ausläufer im Nordatlantik umfassende Golfstromsystem zu einem 'Schlüsselthema' ausgebaut werden kann, an dem wichtige global-ökologische Kausalzusammenhänge auf unserem überwiegend vom Weltmeer bedeckten 'blauen Planeten' erarbeitet werden können.

Wie jedes Satellitenbild zeigt, ist der Ozean das größte Geosystem der Erde und steht mit der Atmosphäre in einer erst neuerdings näher erforschten Wechselwirkung an der Meeresoberfläche. In den letzten Jahren sind nun Berichte erschienen, in denen die Existenz eines Golfstroms, wie man ihn gemeinhin vom traditionellen Erdkundeunterricht her kennt, bezweifelt wird. Deshalb muß hier der Frage nachgegangen werden, wie weit die neueren ozeanographischen Forschungsergebnisse im Nordatlantik diese These stützen und ob es erforderlich ist, konventionelle Modellvorstellungen zu revidieren bzw. zu modifizieren. Es wird im übrigen von der Meereskunde in keiner Weise in Frage gestellt, daß im Nordatlantik ein bedeutender polwärtiger Wärmetransport im Ozean stattfindet, der letztlich die Temperaturanomale zwischen der atlantischen West- und Ostflanke mit den zugehörigen Küstensäumen bedingt. Diese klimageographische Wirkung der Meeresströmung wird beispielsweise bei einem Vergleich der auch im Sommer eisgepanzten Küsten Labradors mit den ständig eisfreien und von regem Leben erfüllten Fjorden Norwegens besonders deutlich, die ebenfalls auf 65° nördl. Breite liegen. Nur die Dynamik des Transportvorgangs auf dem Golf von Mexiko bis vor die heimischen Küsten an der Nordsee in einem komplizierten hydrographischen System steht zur Diskussion. - Für das gesamte nordatlantische Strömungsgeschehen sollte dabei aber schon aus historischen Gründen der im deutschen Schrifttum eingeführte Terminus "Golfstromsystem" beibehalten werden, obwohl als Golfstrom im engeren Sinne nur der stark gebündelte und schnell fließende Strom entlang der USA-Küste von Florida bis Neuengland verstanden wird (vgl. MECKING 1911; WÜST 1934).

In der Überzeugung, daß sich ökologische Lernziele in besonders eingängiger Weise auch und gerade an marinen Ökosystemen erarbeiten lassen, soll im folgenden exemplarisch auf einige ozeanographische Probleme im Golfstrombereich eingegangen werden. Der Golfstrom und seine Ausläufer als dominante ökologische Erscheinung der Seegebiete von Florida bis Nowaja Semlja vor der sibirischen Küste - wo bisweilen noch karibische Früchte und Hölzer angespült werden - ergeben als Leitthema nicht nur einen Schlüssel zum Verständnis komplexer globaler meeresgeographischer Zusammenhänge. Das Golfstromsystem als 'roter Faden' für eine didaktische Strukturierung erlaubt zudem auch eine fächerübergreifende Zusammenschau durch Verknüpfung mit biologischen, historischen sowie auch verkehrs- und politisch-geographischen Aspekten im Sinne des oben gekennzeichneten synthetischen Strukturierungsgrundansatzes, wie sie besonders in den beiden 1954 erschienenen populärwissenschaftlich Golfstrom-Büchern von LEIP und CHAPIN/SMITH herausgestellt wurden. Fragen der Seerechtsneuordnung, Fischereikonflikte um Island und Probleme der Exploration mariner Rohstoffe sowie der Meeresverschmutzung in den Randmeeren des Atlantiks (Nordsee, Barentssee) zeigen, daß das Gesamthema in seiner räumlichen Differenzierung gerade heute wiederum aktuell ist. Diese gilt

besonders für die moderne Meeresforschung im Bereich des Golfstromsystems, das letztlich nur aus seiner großräumigen Gesamtschau verständlich ist. Hier haben sich gerade durch die deutschen Forschungsprogramme (SFB 133 Warmwasserphase des Nordatlantiks, NOAMP-Expedition der Forschungsschiffe 'Meteor' und 'Poseidon') gänzlich neue Probleme ergeben. Neue, überraschende Ergebnisse der Ozeanographen stehen zur Diskussion (KRAUSS 1980; KRAUSS/MEINCKE 1982; MEINCKE 1982; 1983 u. a.).

2.2 Meeresströmungen als physikalisches und geographisches Problem

Zunächst müssen einige allgemeine Erklärungen zur den Meeresströmungen als physikalisches und geographisches Problem gegeben werden: Sie bilden als oberflächennaher Wassertransport (auf die Probleme der Tiefenzirkulation soll hier nicht eingegangen werden) neben den Gezeiten und Wellen die wesentlichen Bewegungsvorgänge des Meeres (ausführlich vgl. KRÖMMEL 1907/11; DIETRICH 1970; 1975; GIERLOFF-EMDEN 1980 u. a.). Strömungen sind dem Menschen seit den Anfängen der Schifffahrt bekannt und bestimmten auch die mythologische Auffassung vom ständig ruhelosen Weltmeer mit all seinen Geheimnissen und Rätseln (HEYERDAHL 1978). Generell müssen in bezug auf die anregenden Ursachen drei Typen unterschieden werden:

- die periodischen Gezeitenströme.
- die durch ein relativ beständiges Windfeld durch komplizierte Reibungs- und Turbulenzvorgänge angetriebenen Driftströmungen: Ein besonders eindrucksvolles Beispiel stellen die vom Passat angeregten Nordäquatorialströmungen dar, die Thor HEYERDAHL bei seiner Atlantiküberquerung von Marokko bis in die Karibik mit dem Papyrus-Floß 'Ra' 1970 als Nachweis der Möglichkeit früher Kulturübertragungen ausnutzte. Geophysikalisch ist die kausale Verknüpfung von Bewegungsvorgängen in der Atmo- und Ozeanosphäre sehr komplex. So werden auf der Nordhalbkugel die Wassermassen nach dem EKMANN-Gesetz um 45° mit dem Uhrzeigersinn versetzt fortbewegt. Auch heute kann noch die These aufrechterhalten werden, daß die den Golfstrom auslösende Ursache in dem Windfeld der Tropen liegt. So zeigt der Florida-Strom in einem periodischen Jahresgang deutlich mit einmonatiger Verzögerung im August ein Maximum der Wirksamkeit der Passate an.
- Den Driftströmungen stehen geostrophische Gradientenströmungen gegenüber, die - ganz ähnlich dem Wind in der Atmosphäre - einen Ausgleich des inneren Druckfeldes im Ozean erstreben. Dieses ergibt sich u. a. aus der räumlichen Verteilung von durch Temperatur- und Salzgehalt gekennzeichneten Wassermassen. In einem geschichteten Meer können diese auf einer rotierenden Erde nur aufrechterhalten bleiben, wenn eine Strömung besteht. Starke Temperaturgradienten an der Oberfläche wie im Golfstrom deuten immer auf eine stärkere geostrophische Strömung entlang der in die Tiefe einfallenden Front von zwei Wasserkörpern. Gradientenströme sind - wie im Golfstrom - bis in 1000 m Tiefe wirksam und können sehr hohe Geschwindigkeiten (von 1,5 - 2,5 m/s) erreichen; dies entspricht Stromversetzungen von etwa 200 km/Tag. Insgesamt gesehen sind Meereströmungen auch für die heutigen Ozeanographen sehr komplexe und erst teilweise verstandene Naturphänomene. Bringt man das Thema in den Schulunterricht, ist die Elementarisierung unumgänglich.

2.3 Zur Erforschungsgeschichte: Ein pelagischer Fluß als Warmwasserheizung Europas

Der Golfstrom, der nach Modellrechnungen - wenn auch weniger ausgeprägt - aufgrund der planetarischen Windfeld-Zirkulation auch ohne die Düsenwirkung der 150 km breiten Florida-Straße bestehen würde, rechnet zu den 'Freistrah'-regionen des Weltmeeres an den Westflanken der Ozeane. Stark gebündelte polwärts setzende Strombänder vor den Ostküsten der Kontinentalmassen gehören somit zu den großen Naturgesetzmäßigkeiten unseres Planeten. Der Golfstrom entspricht in allen seinen Einzelphänomenen somit dem neuerdings besser erforschten Kuroshio vor Japans Küste und den weniger ausgeprägten und bekannten Ostaustral-, Brasil- und Agulhas-Strömen auf der Südhemisphäre.

Unsere Vorstellung vom Verlauf und Transportgeschehen in Meeresströmungen, die in physikalischer Hinsicht auch heute noch zu den kompliziertesten Naturphänomenen des Ozeans rechnen müssen, sind im allgemeinen sehr schematisch und beschränken sich auf die Kenntnis der Existenz von großen Strömungskreisen in den Teilen des Weltmeeres. Die gängigen Schulatlanten und auch ältere Schulbuchtexte bewahren bis heute wissenschaftliche Erkenntnisse, wie sie Ende des 19. Jhdts. Gültigkeit hatten. Neuere empirische und theoretische Forschungen der Meereskunde zeigen aber, daß eine Revision fortlebender traditioneller Vorstellungen unabdingbar ist.

In diesem begrenzten Rahmen muß insbesondere die Frage aufgeworfen werden, inwieweit die immer wieder im Zusammenhang mit dem Golfstrom zur Erklärung des nordatlantischen Strömungsgeschehens herangezogenen, an und für sich sehr anschaulichen und deshalb auch in der Schule stereotyp verwendeten drei Modellvorstellungen noch aufrecht zu erhalten sind. Dies sind als Idealbilder erstens die Idee von einem 'großen Fluß im Meer', zweitens die Vorstellung einer Auswirkung ähnlich einer Warmwasserheizung für Europa und drittens die Konzeption eines in sich zurückführenden großen Strömungskreislaufes im Nordatlantik.

Es soll zunächst versucht werden, die historischen Wurzeln dieser drei Idealbilder aufzuspüren. Im Mittelpunkt steht zunächst die Aufgabe, diese Topoi vor dem Hintergrund teilweise erst in den letzten 10 Jahren erzielter Forschungsergebnisse zu überprüfen und zu modifizieren. Die genannten Modelle lassen sich dabei in regionaler Hinsicht einzelnen Abschnitten des Golfstromsystems zuordnen: Eine Revision des Bildes vom 'großen Strom im Meer' erfolgt vor der amerikanischen Küste im Bereich des Golfstroms im engeren Sinne, die Diskussion des 'Warmwasserheizungsmodells' am offenen Atlantik und die Revision des Kreislauf-Schemas in den ostatlantischen Gewässern.

Beginnen wir mit dem 'großen Strömungskreislauf', der sich aus der Ursachenkoppelung Passatdrift/Golfstrom herleitet: Sie wurde bereits im Zeitalter der Entdeckungen erkannt und nautisch ausgenutzt (vgl. KOHL 1868/1966; GASKELL 1968). Die 'bewußte' Entdeckung des eigentlichen Golfstroms wird dem spanischen Seefahrer PONCE DE LEON zugeschrieben, der 1513 trotz günstigen Windes nicht gegen den Florida-Strom in den Golf von Mexiko aufkreuzen konnte. In den folgenden zwei Jahrhunderten machten sich die Spanier das Wind- und Strömungsfeld des Nordatlantiks im Verkehr mit ihren amerikanischen Kolonien dienstbar: Die Anfahrt erfolgte auf der von COLUMBUS und später HEYERDAHL gewählten südlichen Gunstroute über die Kanaren in die Karibik, die Rückreise dagegen über den Yukatan- und Florida-Strom sowie den Golfstrom bis zur Westwinddrift.

- Ältere und neuere Schulatlanten sowie Textdarstellungen in Lehr- und Schulbüchern beziehen sich allesamt auf diesen großen atlantischen Stromwirbel um eine von Stromstillen gekennzeichnete Mitte in der Sargasso-See mit ihren legendären Tangwäldern.

Es war dann aber der große Naturforscher Alexander von HUMBOLDT (1796 - 1859), der dieses Kreislauf-Modell vor dem Hintergrund der damaligen wissenschaftlichen Kenntnisse auch theoretisch in seine physische Weltbeschreibung einbrachte und den Golfstrom erstmals im Prinzip richtig aus der Äquatorialwestströmung ableitete, wie man in seinem "Kosmos" (1845 - 1862) nachlesen kann. HUMBOLDT war auch der erste, der nach dem Prinzip der 'thermometrischen Vermessung' empirisch im Golfstrom gearbeitet hat und sogar eine wissenschaftliche Forschungs-expedition anregte.



B. FRANKLIN 1770

Abb. 1: Benjamin FRANKLIN (unten rechts mit Neptun) entwarf 1770 aufgrund von Informationen amerikanischer Walfänger von Nantucket seine berühmte Golfstromkarte. Sie betont bereits den Flußcharakter und deutet die von 4 auf 2 sm/h abnehmende Fließgeschwindigkeit an. Auch die nautische Bedeutung des Flusses im Meer geht aus der Karte hervor: Zweck der Karte sollte eine Verkürzung der Fahrtzeiten im Transatlantikverkehr sein.

Hiermit kommen wir zur zweiten Modellvorstellung, dem 'großen Fluß im Meer', den HUMBOLDT als "reißendes Gewässer" im Meer beschrieb. Ihm lag auch eine noch heute vielfach - auch in einigen Schulbüchern der 60er Jahre - wiedergegebene Karte des Golfstroms vor, die

Benjamin FRANKLIN, seinerzeit Generalpostmeister der englischen Kolonien in Nordamerika, nach sorgfältigen Erkundigungen bei Walfangkapitänen 1770 zur Beschleunigung der Postwege mit dem Mutterland anfertigen ließ (Abb. 1).

Diese erste und sehr anschauliche kartographische Darstellung des Golfstroms sollte noch lange nachwirken: Sie zeigt den Strom, wenn auch viel zu breit, von Florida bis zu den Neufundlandbänken mit weitgehend geradlinigen, scharf ausgebildeten Ufern und deutet richtig das Abrücken vom Festlandsschelf bei Kap Hatteras sowie ein Südwärtsschwenken im Nordbereich an. Die zunehmende Breite weist auf eine vermehrte Wasserführung hin. Die Strömungsgeschwindigkeit nimmt gleichzeitig von 4 auf 2 sm/h ab. Mehrere Schiffe nutzen die ostwärts setzende Strömung aus und betonen den Zweck dieser thematischen Karte.

Nachhaltig untermauert wurde diese Vorstellung durch die Darstellung des amerikanischen Hydrographen Matthew Fontaine MAURY (1855), der in seiner 1856 auch in deutscher Sprache erschienenen "Physischen Geographie des Meeres" die beiden ersten Kapitel allein dem Golfstrom widmete. Seine wissenschaftliche Leistung ist besonders in der noch heute im DHI verwendeten Durchschnittsmethode zu sehen, die Tausende von Bestecksversetzungen nach der Auswertung von Schiffslogbüchern in einem begrenzten Seegebiet ermittelt.

Für die frühe Phase des Erdkundeunterrichts in Preußen und anderen deutschen Ländern wurden MAURYS Erklärungen zum System der atlantischen Strömungen deshalb besonders wirksam, weil sie im Textauszug in GRUBES "Geographische Charakterbilder in abgerundeten Gemälden für die obere Stufe des geographischen Unterrichts" (14. Auflage 1875) aufgenommen wurden. Diese weitverbreiteten Bände fanden sich noch lange in jeder Schulbibliothek. Einige disziplingeschichtlich besonders interessante Passagen seien deshalb im Originaltext angeführt, weil sie sowohl die Klischeevorstellung vom 'Fluß im Meer' als auch den Vergleich mit der 'Warmwasserheizung' begründeten, die noch heute fortleben und zu revidieren bzw. weiterzuentwickeln sind. MAURY schrieb:

"Im Ozean ist ein großer Fluß. Er verstopft nie, wenn sonst auch alles verdorrt, er tritt nicht aus seinen Ufern, wenn auch die mächtigsten Fluthen ihn schwellen. Seine Ufer und sein Grund besteht aus kaltem Wasser, während seine Strömung warm ist. Der Golf von Mexico ist seine Quelle und seine Mündung liegt in den Arktischen Meeren. Es ist der Golfstrom ...".

In der äußerst bildhaften Sprache dieses in didaktischer Hinsicht deshalb - zumindest als Quelle - auch heute noch wertvollen Textes fährt MAURY dann fort, den Golfstrom mit der gerade in seiner Washingtoner Sternwarte neu installierten "hübschen Methode der Stubenheizung" zu vergleichen, die seinerzeit den modernsten Stand der Heizungstechnik entsprach:

"Um nun das Große (d. h. den Golfstrom) mit dem Kleinen (d. h. der Zentralheizung) zu vergleichen, so haben wir in den warmen, im Golf von Mexico eingeschlossenen Gewässern gerade solch einen Heizungsapparat für den Norden und das westliche Europa. Der Ofen ist die heiße Zone, der Mexicanische Golf und das Karibische Meer sind der Kessel, und der Golfstrom ist das Heizungsrohr. - Von den großen Bänken Neufundlands nach den Küsten Europas liegt jenes Zimmer voll heißer Luft, in welchem sich das Rohr erweitert, so daß es eine große Abkühlungsfläche hat. Hier wird die Zirkulation von der atmosphärischen Luft besorgt ..."

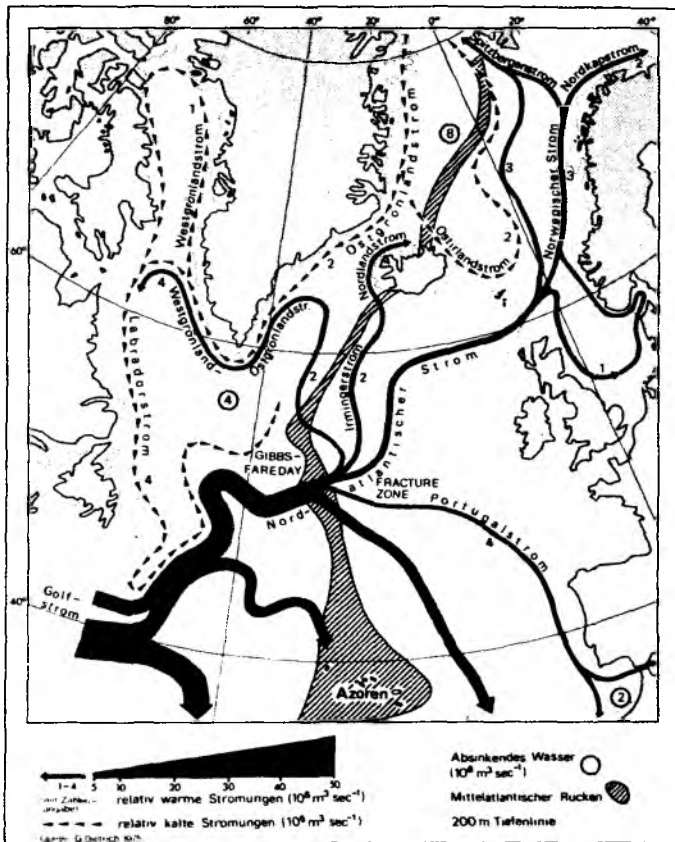


Abb. 2: Der Nordatlantische Strom und seine Verästelungen in der ostatlantischen Warmwassersphäre sind nach neueren ozeanographischen Forschungen nur eine indirekte Fortsetzung des Golfstroms vor der amerikanischen Ostküste. Die Aufgabelung der Stromäste (mit Angaben des Wassertransportes) erfolgen aus noch nicht ganz geklärten Ursachen nach dem Überströmen des Mittelatlantischen Rückens und der Faröer-Schwelle.

Hiermit wurden die drei mit dem Golfstrom allgemein verbundenen klassischen Anschauungen in ihrem Ursprung belegt, die unsere erdkundlichen Schulbuchtexte bis 1970 bestimmten. Es ist nun auf die zentrale Frage zurückzukommen, inwieweit diese angesichts der gerade im Golfstrombereich erzielten umfangreichen Forschungsergebnisse der modernen Ozeanographie bestehen können. Es sei schon hier angedeutet, daß diese aus didaktischer und geographischer Sicht bei einer Revision nicht vollständig aufgegeben werden sollten, sondern durchaus auch die Möglichkeit einer Weiterentwicklung und Aktualisierung zulassen (Abb. 2).

2.4 Ausgewählte neuere ozeanographische Forschungsergebnisse

2.4.1 Revision der Vorstellung vom 'großen Fluß im Meer'

Beginnen wir mit einer kritischen Überprüfung des von FRANKLIN und MAURY begründeten Idealbildes eines großen 'Seeflusses'. Alleine der Gedanke einer Analogie von terrestrischen und ozeanischen Fließgewässern (HUMBOLDT: "pelagische Flüsse") ist noch heute von großer motivierender Wirkung: Etwas Bekanntes, ein Festlandsstrom wie z. B. die Donau, wird mit etwas Unbekanntem, zunächst Rätselhaftem verglichen. Hierin liegt etwas nicht zu unterschätzender didaktischer Reiz, zumal ein systematischer Vergleich beider Fließsysteme sehr wohl in der lehrplanmäßig von einigen Bundesländern für die Klasse 7 ausgewiesenen 14stündigen Unterrichtseinheit "Fließende Gewässer und ihre Auswirkungen" erarbeitet werden könnte. Hierin liegt somit auch eine bislang ungenutzte Zuordnungschance für den Unterricht. Führen wir diesen Vergleich skizzenhaft am Beispiel des Golfstromes im Abschnitt von Florida bis Neufundland durch, ergibt sich die nachfolgende Übersicht (vgl. Schema 2).

Schema 2: Vergleich von Festlandsflüssen und Meeresströmungen (Entwurf G. Kortum)

| | Festlandsflüsse | Meeresströmungen |
|---------------------------------|--|---|
| Typ des Fließgewässers | terrestrischer Abfluß von Niederschlägen mit der Schwerkraft | ozeanischer geostrophischer Ausgleichstransport, dynamische Kompensation von Dichteunterschieden beeinflusst von der Coriolis-Kraft |
| Dimension: Länge | 1000 - 5000 km (Donau 2860 km) | mit Ausläufern um 10 000 km |
| Breite | 50 - 200 m | 50 - 200 km |
| Tiefe | 5 - 50 m | 500 - 1500 m |
| Strömungen und Transport | 1 - 3 m/s 6000 m ³ /s Hoch- und Niedrigwasser | bis 2 m/s (220 km/Tag) 24 - 100 Mio. m ³ /s Pulsationen |
| Verlauf | starres, lineares Bett, Quelle, Nebenflüsse, Mündung, Mäanderbildungen, Delta u. a., Einzugsgebiet | breites, veränderliches Stromband mit Mäandern und Wirbeln, seitlicher Zustrom und Wasserabgabe, Querkirkulation mit Auftrieb, Gegenströmungen, Verästelungen |
| Auswirkungen | großräumige Entwässerung, Erosion und Akkumulation, Hochwassergefahr, Energiegewinnung (Staudämme), Binnenschifffahrt, "potamische Kulturen" (Nitt), u. a. | meridionale Wärmetransporte, Klimabeeinflussung, westöstlicher Formwandel, Eisverhältnisse, Seeverkehr, transoceanische Kulturübertragung u. a. |

Gemeinsam ist beiden Stromsystemen zunächst der Wassertransport über eine Distanz in einer bestimmten Richtung. Flußwasser ist homogen, während der hydrographische Aufbau des Golfstroms eine deutliche Schichtung zeigt.

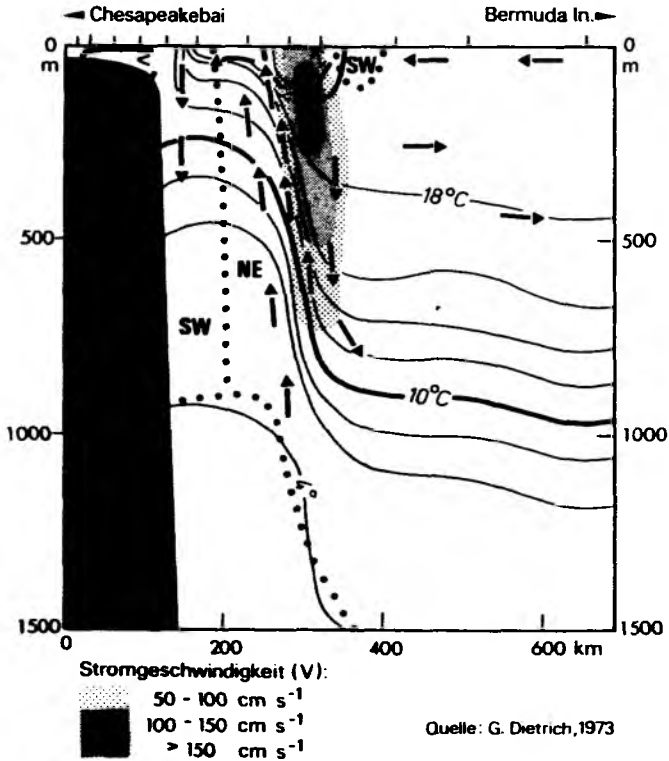
Die Dimensionen sind sehr unterschiedlich: Sowohl nach der Länge und Breite als auch besonders nach der Tiefe übertrifft der Golfstrom etwa den Amazonas um das 10fache! Der Hauptstromstrich des Golfstroms vor Neuengland transportiert 100 Mio m³/s; dieser zunächst unvorstellbar große Wert entspricht immerhin einem Wasserwürfel von 1/2 km Kantenlänge. Hierbei ist festzuhalten, daß diese Wasserführung diejenige aller Festlandsströme um das 100fache übertrifft.

Die Entwicklung der Erforschung des Golfstroms spiegelt in allen ihren Phasen auch die Geschichte der Ozeanographie wider. Die klassischen Vorstellungen des 19. Jahrhunderts (vgl. auch PETERMANN 1870) wurden von der deutschen Seite besonders von KRÜMMEL (1907/1911, 1908), MECKING (1911), SCHOTT (1912/1942) und WÜST (1930; 1934) fortentwickelt. Nach dem 2. Weltkrieg waren es wiederum vornehmlich amerikanische Meeresforscher, die im Strombereich vor ihrer Haustür mittels neuer Methoden und großangelegter Meßprogramme gänzlich neue Erkenntnisse erzielten (FLUGLISTER 1951; 1963; 1967; ISELIN 1952; STOMMEL 1955; WORTHINGTON 1962; 1971 u. a.). Gegenwärtig ist nun auch die deutsche Meeresforschung wieder stark im Bereich des Nordatlantischen Stroms engagiert (DIETRICH 1957; HANSEN 1952; KRAUSS 1980; 1982; MEINCKE 1977; 1982; 1983; vgl. auch WOODS 1983).

Nach neueren Forschungen schwankt auch die Wasserführung und Transportleistung des Golfstroms ähnlich wie bei Festlandsflüssen, und zwar in einem von größeren Unregelmäßigkeiten überlagerten jahreszeitlichen Rhythmus. Durch bisher in ihrer Ursache noch nicht gänzlich geklärte 'Pulsationen' in der Florida-Straße kann sich die dort im Durchschnitt 32 Mio m³/s betragende Wassermenge innerhalb von nur 10 Tagen sogar verdoppeln - nicht ohne Folgen als Energieimpuls für das Gesamtsystem. Ozeanographen rechnen heute mit einer Variationsbreite von +/- 25 %. Derartige Schwankungen kann man auf dem Festland aus unterschiedlichen Niederschlägen im Einzugsgebiet eines Stromgebiets erklären. Ein solches besteht trotz der Ursachenkoppelung an die Passatzone beim Golfstrom eigentlich nicht. Der Golfstrom hat zwar ein Anfang und Ende, aber keine Quelle und Mündung im MAURYschen Sinne. Dies erklärt sich auch aus den unterschiedlichen Ursachen: Flüsse transportieren mit dem topographischen Gefälle auf erodierten Linienstrukturen gesammeltes Oberflächenwasser zu einem Vorfluter, normalerweise zum Meer; Gradientenströme im Ozean hingegen ergeben sich aus dem inneren Druckfeld des Ozeans.

Die Wasserführung nimmt in beiden Flußsystemen bei vergleichbaren Geschwindigkeiten stromab zu, der Golfstrom als gebündelter Freistrahler mit einer Breite von 50 km und Tiefe von 1000 m steigert seine 'Leistung' auf 2000 km von Florida bis Neufundland von 32 Mio auf 100 Mio m³/s, wobei er nur den Antillenstrom als 'Nebenfluß' aufnimmt. Die Zunahme der Wasserführung um 7 % auf 100 km ist nach neueren Messungen nur durch seitliche Wasseraufnahme an den Ufern zu erklären. Hiemit können wir zu einem wesentlichen Unterschied: Der Golfstrom hat im Gegensatz zu FRANKLINS Karte nach heutiger Anschauung zwar ein strahlartiges, in Schwingungen übergehendes Strömband, aber eigentlich keine festen Ufer. Nur das linke Ufer ist durch einen starken Temperaturgradienten als in die Tiefe gehende Front zweier Wassermassen ausgeprägt, die

Temperaturen und Strömungen im Golfstrom



Marken am oberen Rand: Ozeanographische Stationen

Abb. 3: Hydrographisches Profil durch den Golfstrom vor der Ostküste der USA: Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten treten in einem bis 50 km breiten und an die 500 m tief reichenden Strömungsband auf, das sich mit dem Durchschwingen von Mäandern in seiner Lage schnell verschleben kann. Diese wird durch die scharfe Grenze von zwei Wasserkörpern mit starken Temperaturgradienten bestimmt.

tropisches Warmwasser hohen Salzgehalts (mehr als 36 ‰, mehr als 18 °C) von kälterem 'slope-water' trennt. Diese Konvergenzlinie ist den Seefahrern seit langem als 'kalter Wall' bekannt und äußert sich an der Oberfläche häufig in der Wasserfarbe und einem Saum von Treibsel. Das rechte 'Ufer' ist keine Wassermassengrenze. Das Golfstromphänomen ist eher mit einer Front als einem Strom vergleichbar. Heute weiß man, daß zu beiden Flanken und unter dem Golfstrom wenn auch gering ausgeprägte Kompensationsströme verlaufen, die nach Süden streichen. Meeresökologisch wichtig ist ferner eine Querkirkulation, die nährstoffreiches Tiefenwasser entlang der Front auftreibt, was schon FRANKLINs Walfänger aus Erfahrung wußten (Abb. 3).

Der Golfstrom hat mithin kein festliegendes Ufer und keinen starren Verlauf. Die mit mehreren Großexperimenten 1950 einsetzende Golfstromforschung der USA, hauptsächlich durch die Meereskunde-Institute in Miami und Woods Hole, konzentrierte sich auf die Untersuchung der Veränderlichkeit der Strömungsdynamik und kam (kurz zusammengefaßt) zu folgendem Ergebnis: Der Golfstrom von Florida bis Kap Hatteras strömt mit Höchstgeschwindigkeiten bis zu 2 m/s zunächst in einem engen Stromband, wird dann durch die Bodentopographie (und die Coriolis-Kraft) ins offene Meer abgelenkt. Hier gerät er, besonders nach stärkeren Impulsen in der Florida-Straße, bildlich gesprochen ins 'Taumeln'. Ozeanographen sagen, er verliert seine dynamische Stabilität. Er beginnt, zunächst längere Schwingungen von bis zu 100 km, bei einem Stromstrich von 40 - 60 km, auszuführen.

Diese Schwingungen verstärken sich südlich von New York zu größeren Mäandern, die eine Auslenkung und Wellenlänge von je 400 km aufweisen können. Eine derartige Situation wurde etwa im Unternehmen "Gulf Stream 60" durch synoptischen Einsatz mehrerer Forschungsschiffe nachgewiesen. Schon die Benennung "Mäander" legt eine Analogie zu dem geschlängelten Verlauf eines Festlandflusses nahe, der im Prinzip ebenfalls ein dynamisches Gleichgewicht widerspiegelt. Dieses Phänomen paßt mithin noch sehr gut zum klassischen Bild des Seeflusses in einer differenzierten Form. Wir wissen von mäandrierenden Festlandflüssen, daß sie unter bestimmten Bedingungen Mäanderschlingen zu Altwässern abschneiden können. Dies ist nun nach neuesten Ergebnissen der Golfstromforschung im Meer keine Ausnahme, sondern der Regelfall. Es kommt zu energetisch erklärbaren Verwirbelungen großen Stils (Abb. 4).

Hier muß auf die große Bedeutung der Raumfahrttechnik für die neuere Golfstromforschung hingewiesen werden, die ähnlich wie die Meerestechnik ('Raumfahrt in die Tiefe', vgl. Tauchfahrt des Forschungs-U-Bootes "B. Franklin" im Golfstrom, PICCARD 1972) im Unterricht sicher von erheblicher motivierender Wirkung sein dürfte. Von Satelliten können jederzeit großflächige Meeresgebiete nach der Infrarot-Methode in ihrer Oberflächentemperatur erfaßt werden. In Abb. 4 wird eine Situation erfaßt, in der sich auf dem linken Ufer des mäandrierenden Hauptstroms eine Verwirbelung mit komplexen Temperaturfronten aufbaut, die sich nach mehreren Wochen als losgelöster Ringwirbel darstellen würde. An dem Übergang von Mäandern in Wirbel ist auf heute hydrodynamisch noch ungeklärte Weise die Bodentopographie mitbeteiligt; so bildet sich beim Überströmen der Neuengland-Seamount-Kette regelmäßig ein Wirbel, der Driftbojen monatlang gefangen hält. Ehemals setzte man Treibkörper und Flaschenposten in der Golfstromforschung ein. Heute verwendet man mit sehr großem Erfolg funkgeortete Driftbojen, deren Lage mehrmals am Tag exakt über Satelliten zu fixieren ist. Erstmals kann nun das Stro-

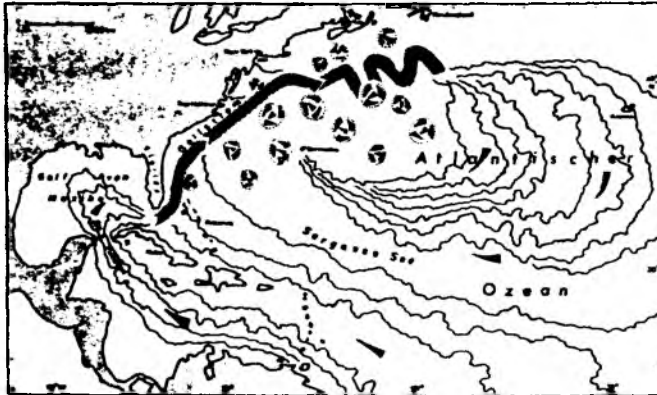


Abb. 4: Der Golfstrom vor der US-Küste ist nach neuesten Untersuchungen ein weitgehend über Wirbel ("eddies") in sich selbst zurückkehrendes Fließsystem, das als "Freistrahlsregion" in ähnlicher Form auch vor Japan und auf den Westflanken der Ozeane auf der Südhemisphäre ausgeprägt ist.

mungsgeschehen genau verfolgt und interpretiert werden. Das Ergebnis dieser erst 1978 begonnenen Experimente war verblüffend, da es eine liebgegewonnene Hypothese zerstörte:

Golfstrom und Randwirbel müssen als regionales Phänomen verstanden werden: Langjährige Überwachungen ergaben, daß sich links der Stromrichtung meist drei mit dem Uhrzeiger drehende Warmwasserringe als abgeschnürte Mäandere bewegen, rechts, also südlich, hingegen im Mittel 10 - 12 Kaltwasserwirbel, die weiterhin mit zunächst hoher Drehgeschwindigkeit von 1,5 m/s rotieren. Sie haben Durchmesser von etwa 100 km und erhalten sich bis zu einem Jahr. Diese Golfstrom-Eddies oder -Rings wandern als mesoskalige Wirbel unregelmäßig hin und her, haben aber eine Tendenz, stromauf zu wandern (Abb. 4).

Die Driftbahnen von 100 im Strom ausgesetzten Funkbojen zeigten, daß sie überwiegend über diese Wirbel wieder in den Golfstrom zurückkehren. Der Golfstrom verliert sich nach einer neueren Theorie südlich von Neufundland und speist sich wiederum selbst. Nur 35 % des Wassers werden von einem weiteren Stromwirbel östlich Neufundlands übernommen und weitergeleitet (Abb. 5).

Hiermit wird das Bild vom Fluß im Meer nun vollständig in Frage gestellt: Ein versiegender Fluß, der in sich selbst zurückkehrt - dies widerspricht allen traditionellen Vorstellungen vom transatlantischen Wärmetransport.

2.4.2 Revision der Vorstellung von einer 'Warmwasserheizung'

Hiermit kommen wir zur Revision der beliebten Vorstellung, daß der Golfstrom und seine Ausläufer als 'Warmwasserheizung' Europas dienen. Zunächst wurde deutlich, daß der Golfstrom im engeren Sinne kein festliegendes, dichtes Heizungsrohr ist, wie MAURY annahm. Vielmehr werden ständig Wassermassen abgegeben und neu aufgenommen. Neuere Untersuchungen auch deutscher Forschungsschiffe haben zwar mehrere deutlich gebündelte Fortsetzungsströme nach Osten nachgewiesen, der weitere Wärmetransport in einem heute "Nordatlantischer Strom" genannten Fließsystem ist aber nur teilweise eine Fortsetzung des Golfstroms (Abb. 3).

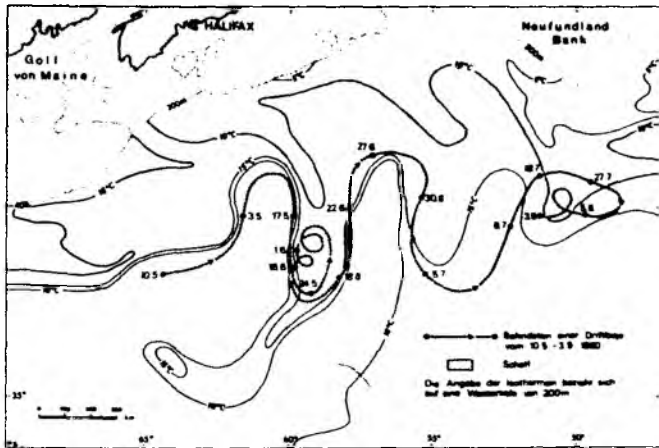


Abb. 5: Aus hydrodynamischen-energetischen Gründen verliert der Golfstrom südlich von New York seine Stabilität und löst sich nach der Bildung von schwingenden Mäandern in Wirbel auf. Die Karte zeigt die Lage der Mäandern im Sommer 1960 (Experiment Gulf Stream '60) nach dem Verdriften einer Funkboje und aufgrund der Isothermen in 200 m Wassertiefe. Nach DIETRICH (1973).

Die hydrographischen Verhältnisse im Nordatlantik waren bis zum Unternehmen 'Polar Front Survey' im Rahmen des Internationalen Geophysikalischen Jahres 1956/57) im Gegensatz zum eigentlichen Golfstrombereich nur durch Besteckversetzungen an der Oberfläche bekannt. Man nahm, wie auf vielen Karten dargestellt, eine geradlinige breite Fortsetzung des Golfstroms mit abnehmender Geschwindigkeit und Beständigkeit an. Dies trifft nun in keiner Weise zu:

Nach den hydrographischen Tiefenschnitten von 22 Forschungsschiffen während des genannten Unternehmens konnte man erstmals aufgrund der Temperaturverteilung in 200 m Tiefe auf rund 1200 Stationen im Nordatlantik und Nordmeer nach der dynamischen Methode die Strömungen ermitteln.

Nach WORTHINGTON (1962; 1976) und MEINCKE (1983) bestehen südlich von Neufundland sehr komplizierte Verwirbelungen, die sich zudem rasch verlagern. Letztlich kann diese Region vielleicht - um das didaktisch sicher vorzügliche Bild der Warmwasserheizung zumindest in einer Beziehung weiterzuentwickeln - mit einer 'Umwälzpumpe' verglichen werden, die im Strömungsband eingebaut ist.

Hinter dieser setzt ein relativ gebündeltes Strömungsband mit $35 \text{ Mio m}^3/\text{s}$ östlich Neufundland zunächst nordwärts und schwenkt dann unvermittelt bei 51° N entlang der ozeanologischen Polarfront nach Osten. Dieser 'Atlantische Strom' mäandriert ebenfalls und zeigt Randverwirbelungen. Überprüft man die in letzter Zeit erschienene Fachliteratur, so besteht noch keine Gewährheit, was nun im kritischen Seegebiet südlich von Neufundland passiert. Die kaum vorherzusagende Eisbergverdriftung macht

ein sehr komplexes Ineinandergreifen verschiedener Wirbelsysteme wahrscheinlich. Dies zeigen auch Driftbojenbahnen. Man sollte beim Abschätzen der sich heute noch teilweise widersprechenden Theorien wohl davon ausgehen, daß sich der Golfstrom zumindest teilweise fortsetzt, wenn auch von neuen Kräften getrieben und viel weiter nördlich als auf bisherigen Karten dargestellt.

Ein weiteres entscheidendes Seegebiet für den Wärmetransport ist der Mittelatlantische Rücken. Neuere deutsche Untersuchungen haben ergeben, daß die atlantische Strömung auf ungeklärte Weise die Bodentopographie ertastet, denn der Strom überquert das Rückensystem an einer dieses durchziehenden Bruchzone, der GIBBS-FARADAY-Fracture Zone, und gabelt sich unmittelbar danach im ostatlantischen Becken in 5 Stromäste. Der Hauptstrom von 7 Mio m³ geht in die Norwegische See und spaltet sich hier auf, wobei ein Ausläufer die Nordsee entgegen dem Uhrzeiger umströmt. Der Irminger-Strom und südliche Portugalstrom bleiben unbedeutend, während 10 Mio m³/s an der Ostflanke des Mittelatlantischen Rückens über den Azorenbereich nach Süden geführt werden (Abb. 2). Warum die deltaähnliche Stromgabelung gerade auf dem untermeerischen Gebirge in einem zur Transfluenz genutzten 'Paßweg' erfolgt, ist noch ungeklärt. Es wird aber immer wahrscheinlicher, daß die Meeresströmungen ihren Untergrund irgendwie 'ertasten' und weit mehr topographisch bedingt werden, als man bislang annahm. Die Aufgabelung, die vorher in der klassischen Theorie weiter östlich angenommen und von HUMBOLDT als 'Mündung' des Golfstromes bezeichnet wurde, läßt sich in der hier erfolgten Schematisierung zwar durchaus mit einem System sich verzweigender Heizungsrohre vergleichen. Dies trifft aber nicht den Kern der Sache, denn der Wärmetransport erfolgt wiederum nur indirekt über einzelne getrennte Wassermassen. Dies ist das Ergebnis einer Expedition des Kieler Forschungsschiffes 'Poseidon' unter J. MEINCKE, der östlich der Azoren mit Hilfe zahlreicher satellitengeorteter Driftbojen und einer systematischen hydrographischen Aufnahme östlich der Aufgabelung feststellte, daß sich hier mehrere sich drehende Warm- und Kaltwasserwirbel befinden, die durchaus mit Hoch- und Tiefdruckgebieten in der Atmosphäre gleichgesetzt werden können. Das Innere Dichte- und damit Druckfeld des geschichteten Ozeans ähnelt einer Wetterkarte, und die Meeresströmungen werden zum geostrophischen 'Wind' im Meer. Der neueste Stand der Erklärung des Strömungsgeschehens und atlantischen Wärmetransports basiert auf der Theorie der nicht-linearen Wechselwirkung weitgehend lagebeständiger mesoskaliger Wirbelsysteme (Abb. 6).

Hiermit verlagert sich nun das bisher wohl zu einseitig interpretierte MAURYsche Gedankengebäude auf eine ganz andere Analogie, die dieser durch den Vergleich des Atlantiks mit einem "Zimmer heißer Luft" umschrieb. Die dynamischen Vorgänge in der Atmosphäre, die seit längerem bekannt sind und auch Eingang in den Erdkundeunterricht fanden, entsprechen im Prinzip bis in Einzelstrukturen den Strömungsprozessen im Ozean. Nur die zeitlichen und räumlichen Dimensionen sind unterschiedlich: Tiefdruckgebiete, die sich besonders im Bereich höchster Energieabgabe am 'Ende' des Golfstroms an der Atmosphäre bilden, haben einen Durchmesser von ca. 1000 km und wandern in drei Tagen 1000 km nach Osten. Die Wirbel des Meeres, die gleichermaßen Wärmeenergie transportieren, bewegen sich im allgemeinen nur 100 km in 50 Tagen und sind nur 100 km im Durchmesser. Das Meer reagiert mithin erheblich träger. Die Auswirkungen des zweifachen Weitertransportes der Golfstromenergie durch die Luft und das Meer mit prinzipiell analogen Verwirbelungs- und Ver-

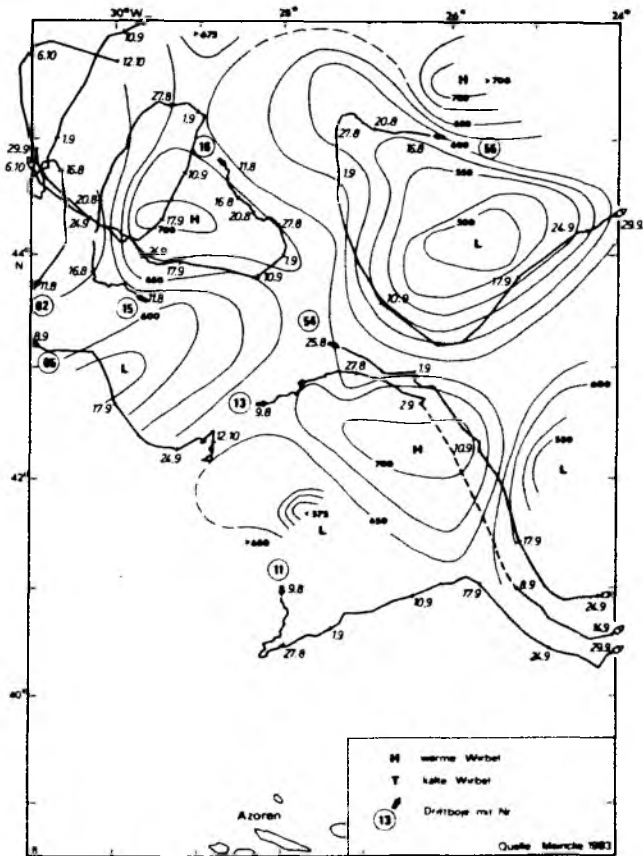


Abb. 6: "Wetter im Ozean": Nach neueren Forschungen sind die Vorgänge in der Atmo- und Ozeanosphäre als Fließmedien im Prinzip analog. Wie die Linien gleicher Dichte und Driftbahnen von satellitengeorteten Funkbojen zeigen, bilden sich auch im Ozean Hoch- und Tiefdruckwirbel aus. In der nordostatlantischen Warmwassersphäre (hier Seegebiet östlich der Azoren) erfolgt der Wasser- und Wärmetransport in den Verästelungen des Golfstromsystems als "Wind im Meer" durch langsam wandernde mesoskalige Wirbelfelder (Daten nach SFB 133 Warmwassersphäre des Nordatlantiks, gewonnen auf dem Kieler Forschungsschiff "Poseidon").

mischungsprozessen an der meteorologischen und ozeanologischen Polarfront erkannte bereits HUMBOLDT als Begründer der modernen Geographie und Meereskunde. Er schrieb um 1853 in einem bisher unveröffentlichten Manuskript über den Golfstrom vor 150 Jahren folgende klassischen Zellen, die auch heute noch als Schlüssel zum Verständnis des Golfstromphänomens dienen können:

"In den unmittelbar mit Wasser bedeckten Theilen der Erdoberfläche wie (auch) in der Atmosphäre, welche das Meer und die Feste umhüllt, bewegen sich einzelne Massen des Flüssigen zwischen ruhenden oder anders bewegten Theilen, die gleichsam die Ufer der atmosphärischen und oceanischen Strömungen bilden. Die genaue Kenntniss dieser Strömungen im Luftmeer ... und dem Ocean, welcher mit jenem in Wechselwirkung steht, hängt von der Betrachtung dreier variabler Elemente: Richtung, Geschwindigkeit und Temperatur ab ..."

Hiermit sind wir bei zentralen Forschungsproblemen der Deutschen Meereskunde zur "Warmwassersphäre des Nordatlantiks" angelangt, die sich u. a. schwerpunktmäßig mit der Interaktion Ozean/Atmosphäre und dem modellhaften Erfassen der drei von HUMBOLDT genannten Größen befassen. Auf diese kann hier ebenso wenig eingegangen werden wie auf Einzelfragen der Maritimen Meteorologie über dem Atlantik. Veränderungen in der Oberflächentemperatur und der marinen Ökologie des Ostatlantiks (BEHRMANN 1948; RODENWALD 1948; 1972) hängen offensichtlich auch mit Anomalien im komplexen Wärmetransport durch das Golfstromsystem zusammen. Zur Eiszeit verlief diese viel weiter im Süden. Langfristige Meßreihen der Ozeanweterschiffe deuten darauf hin, daß im Zuge eines 'Arktischen Umschwungs' die grönländisch-norwegischen Gewässer kälter geworden sind, während die Zahl der mit Labradorstrom in den Golfstrombereich verdrifteten Eisberge von 400 pro Jahr im Zeitraum von 1900 - 1950 auf nur noch etwa 150 zurückging. Diese Wandlungen der Meeresumwelt ließen sich noch durch MAURYS 'hübsche Stubenheizung' erklären, nicht jedoch der eigentlich fehlende Rücklauf kühlen Wassers in dem Zentralheizungssystem.

2.4.3 Revision der Vorstellung eines großen Strömungswirbels

Hierin liegt nach neueren Erkenntnissen die Hauptschwäche des MAURYSchen Modells. Schon WÜST erkannte um 1930, daß die vor den westeuropäischen Küsten südwärts setzenden Strömungssäste viel zu schwach sind, um den Kanarenstrom aufzubauen. Man geht heute davon aus, daß der Portugal-Strom vor Gibraltar in das Tiefenwasser absinkt. Es fehlt somit für das Kreislaufmodell ein entscheidendes Zwischenglied. Um in MAURYS Vorstellung zu bleiben, kann die Leistung seines Heizungsapparats 'Golfstrom' heute mit 4×10^{14} Watt berechnet werden, das entspricht der Leistung von 1 Mio mittleren Kernkraftwerken! Über 65 Mio m³ Wasser werden pro Sekunde polwärts über 40° N transportiert, aber nur 54 Mio m³/s kehren in der Gesamtbilanz in der Meeresoberfläche zurück, der Rest auf noch unbekanntem Wege im Tiefenwasser. Die Kreislaufkonzeption im Nordatlantik sollte nur noch als Problemansatz aufrechterhalten werden, zumal neue deutsche und sowjetische Untersuchungen vor der Küste Marokkos und südlich der Kanaren an dem Ausgangspunkt HEYERDAHLs Driftreise mit der "Ra" äußerst komplizierte verwirbelte Strömungen ergaben. Auch hier sind noch manche Fragen offen.

Forts. In Heft 4/1985