

Untersuchungen der Wärmebilanz der südlichen Ostsee im Bereich des Feuerschiffes „Fehmarnbelt“

Von M. STURM, *Institut für Meereskunde Warnemünde der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, DDR*

(Manuscript received April 14, 1967; revised August 1, 1967)

ABSTRACT

Some new results of studying the heat balance in the southern Baltic are given. The mean annual course of the net energy flux from the sea surface and of the heat storage in the Fehmarnbelt are investigated in detail using observations of the lightship "Fehmarnbelt" ($54^{\circ} 36' N$, $11^{\circ} 09' E$) for the period 1949–1961. Likewise the mean heat transport through the Fehmarnbelt has been calculated making use of the computed and actual values of the variations of heat storage in the Fehmarnbelt. It is shown that the mean annual heat advection through the Fehmarnbelt into the Baltic Sea is important for the heat budget of the southern Baltic area. A clear annual course of heat advection is found; there are three characteristical periods in winter/spring (Feb.–May), in summer (June–Sept.) and in autumn/winter (Oct.–Jan.).

Einleitung

Untersuchungen des Wärmehaushaltes des Meeres sind im Bereich der südlichen Ostsee in zweierlei Hinsicht von besonderem Interesse. Einmal ist infolge der großen Veränderlichkeit der hydrographischen wie hydrometeorologischen Verhältnisse in diesem Meeresgebiet eine ähnlich intensive Variabilität des Wärmehaushaltsganges der Meeresoberfläche und darüber hinaus der gesamten Wassermasse zu erwarten. Zum anderen erscheint — das Vorhandensein geeigneten Beobachtungsmaterials vorausgesetzt — durch die vollständige Anwendung der Wärmehaushaltsgleichung des Meeres eine quantitative Erfassung der im Übergangsgebiet zwischen der Nord- und Ostsee in erheblichem Maße wirksamen Warm- und Kaltwasseradvektion aussichtsreich.

Wärmehaushaltsbetrachtungen des Meeres stellen für die Ostsee kein Novum dar, wenn auch infolge zumeist methodischer Unzulänglichkeiten eine systematische Wärmehaushaltsanalyse der Ostsee erst in den vergangenen beiden Dezennien möglich wurde. Standen in früheren Jahren überwiegend Teilprobleme des Wärmehaushaltes der Ostsee im Mittelpunkt der Betrachtungen (Simjoki, 1948 — Verdun-

stung; Hela, 1951 und Strokina, 1956 — konvektiver und latenter Wärmestrom; Palmén, 1963 — latenter Wärmestrom), so rückten in den letzten Jahren mehr und mehr quantitative Untersuchungen des Gesamtwärmehaushaltes der Ostsee (Hankimo, 1964; Pomeranec, 1964; Hupfer, 1967) in den Vordergrund. Auch im Rahmen der zahlreich durchgeführten Untersuchungen des Wasserhaushaltes der Ostsee sind ab und an Teilstudien des Wärmehaushaltes berührt worden, die insbesondere für die Klärung von Problemen der Wärmeadvektion durch die dänischen Meerengen von Bedeutung sind (Jensen, 1940; Brogmus, 1952; Wyrtki, 1954; Soskin, 1959).

Der Weg, das über einen relativ langen Zeitraum vorliegende und vergleichsweise homogene Meß- und Beobachtungsmaterial von stationären Wetter- und Feuerschiffen für die Belange der maritimen Wärmehaushaltsforschung zu nutzen, ist in der Vergangenheit schon des öfteren beschritten worden. Als Beispiele seien für den Atlantik Manier (1961) und für die nördliche Ostsee Hela (1951; Feuerschiff „Finngrundet“) und aus jüngerer Vergangenheit Hankimo (1964; Feuerschiff „Finngrundet“) genannt.

Dagegen ist das im Bereich der südlichen Ostsee und im Übergangsgebiet zur Nordsee vorhandene und in seinem zeitlichen wie räumlichen Umfang einzigartige Feuerschiffmaterial für spezielle Untersuchungen des Wärmeumsetzes zwischen der Hydrosphäre und Atmosphäre bisher nur ungenügend genutzt worden. Die nachfolgend herausgestellten Untersuchungsergebnisse helfen somit eine Lücke schließen in unserer Kenntnis des charakteristischen Wärmeaushaltsregimes der südlichen Ostsee, wobei insbesondere durch die quantitative Abschätzung der advektiven Komponente der Wärmeaushaltsgleichung die komplexen hydrologischen Verhältnisse im Übergangsgebiet zwischen der Nord- und Ostsee von einer neuen Seite beleuchtet werden.

Material und Methodik

Die in der vorliegenden Untersuchung wiedergegebenen Ergebnisse sind Bestandteil einer umfangreicher Analyse des Wärmeaushaltes der südlichen Ostsee, die auf der Grundlage des Beobachtungs- und Meßmaterials des Feuerschiffes „Fehmarnbelt“ aus dem Zeitraum 1932–1961 vorgenommen wurde. Die in der Folge diskutierten Resultate beschränken sich in der Hauptsache auf spezielle Untersuchungen des mittleren Jahresganges der Wärmebilanz der Meeresoberfläche und der resultierenden Wärmebilanz der Gesamtwassermasse sowie des mittleren Jahresganges der aus der Wärmeaushaltsgleichung als Restglied berechneten Wärmeadvektion beim Feuerschiff „Fehmarnbelt“. Die berechneten Mittelwerte beziehen sich auf den Zeitraum 1949–1961.

Bei der Auswahl der Berechnungsmethoden mußte von vornherein der Tatsache Beachtung geschenkt werden, daß auf Feuerschiffen gewonnenes Untersuchungsmaterial nur bedingt für Wärmeaushaltsuntersuchungen geeignet erscheint. Der Umfang des Meßprogramms und die Genauigkeit der Feuerschiffsmessungen erachten für die wärmeaushaltsmäßige Bearbeitung des Materials prinzipielle Schranken, denen nur durch eine zweckmäßige Auswahl der Berechnungsverfahren sowie eine sinnvolle Festlegung des Mittelungskontinuums Rechnung getragen werden kann. In Tabelle 1 sind die ausgewählten Verfahren zur Berechnung der Hauptkomponenten der Wärmeaushaltsgleichung der Meeresoberfläche

Tabelle 1. Angewandte Verfahren zur Berechnung der Hauptkomponenten des Wärmeaushaltes der Meeresoberfläche

Hauptkomponenten		Verfahren nach
Globalstrahlung	Q_S	Albrecht (1955)
Albedo	Q_R	Laevastu (1960)
σT-Strahlung der Meeresoberfläche	Q_A	Stefan-Boltzmann
Atmosphärische Gegenstrahlung	Q_G	Bolz-Falckenberg (1949)
Konvektiver Wärmestrom	Q_K	Laevastu (1960)
Latenter Wärmestrom	Q_V	Rohwer (1931)

$$Q_B = (Q_S - Q_R - Q_A + Q_G) \pm Q_K \pm Q_V$$

zusammengestellt worden (s. auch Sturm, 1962). Die Berechnungen der Wärmesummen wurden in der Regel über jeweils ein Dekadenintervall vorgenommen.

Neben der Abschätzung der Wärmebilanz der Meeresoberfläche im betrachteten Untersuchungszeitraum ist der Berechnung der horizontalen Wärmeadvektion im Fehmarnbelt besondere Aufmerksamkeit geschenkt worden. Die quantitative Erfassung der einem Wasserkörper in der Zeiteinheit horizontal zu- oder abgeführten Wärmemenge wird möglich, wenn dessen durch die Wärmeaushaltsgleichung der Wasseroberfläche beschriebene Wärmeinhaltsänderung (Sollwert) dem aktuellen Betrag der Änderung seines Wärmeinhaltes (Istwert) gegenübergestellt wird. Als Voraussetzung gilt, daß durch die Bodenfläche des betreffenden Wasserkörpers zu keiner Zeit ein Wärmetransport erfolgt. Im einzelnen werden den mittels der Wärmeaushaltsgleichung berechneten Wärmebilanzwerten der Meeresoberfläche und den daraus unter Berücksichtigung der Mächtigkeit der Wassermasse resultierenden interdekadiischen Änderungen der Schichtmitteltemperatur die gemessenen aktuellen interdekadiischen Änderungen der Schichtmitteltemperatur gegenübergestellt. Die sich ergebenden Differenzbeträge sind unter der Annahme vernachlässigbar kleiner methodischer und Meßfehler je nach Vorzeichen identisch mit erfolgter Warm- bzw. Kaltwasseradvektion pro Zeiteinheit (Dekade) und Volumeneinheit¹ (2800 cm³).

¹ Als Volumeneinheit wird hier die Einheitswassersäule mit 1 cm² Grundfläche und 28 m Länge (Stationstiefe bei FS. „Fehmarnbelt“) bezeichnet.

Die Methode der Advektionsbestimmung über die Wärmehaushaltsgleichung setzt somit voraus, daß zur Berechnung der zeitlichen Änderungen des Wärmeinhaltes der betrachteten Wassermasse

- a) regelmäßige hydrometeorologische Messungen aus einem Seegebiet mit klar definierter Wassertiefe vorliegen;
- b) aus mehreren Tiefenhorizonten gleichen Abstandes Messungen der Wassertemperatur zur Verfügung stehen.

Beide Voraussetzungen werden durch das vorliegende Meßmaterial erfüllt. Die hydrometeorologischen Beobachtungen auf dem auf etwa 28 m Wassertiefe verankerten Feuerschiff „Fehmarnbelt“ wurden im betrachteten Untersuchungszeitraum täglich zu den vier meteorologischen Hauptterminen vorgenommen. Ebenso enthält des Material tägliche Meßwerte der Wassertemperatur vom 8-Uhr-Termin aus der Oberflächenschicht und aus den Tiefenhorizonten 5, 10, 15, 20 und 25 m.

Gewiß ist die Annahme vernachlässigbar kleiner methodischer und Meßfehler nur mit Vorbehalt aufzunehmen. Auf Schiffen gewonnenes hydrometeorologisches Meßmaterial ist grundsätzlich mit zumeist systematischen Meßfehlern behaftet (Markgraf, 1962), die im Zusammenwirken mit nicht vermeidbaren methodischen Fehlern in Einzelfällen durchaus zu einer nennenswerten Verfälschung der Wärmeumsatzberechnungen führen können (Dietrich, 1950). Zweifellos muß dem in der vorliegenden Untersuchung verwendeten Meßmaterial zugute gehalten werden, daß es von einem stationären Feuerschiff stammt, dessen hydrometeorologische Beobachtungen der Betreuung und Kontrolle des Seewetteramtes Hamburg unterliegen. Zum anderen beziehen sich die berechneten Wärmeumsatzsummen auf klimatologische Zeiträume, so daß mögliche methodische und Meßfehler nicht in dem Maße in Erscheinung treten.

Die Gesamtwärmebilanz der südlischen Ostsee

Das Feuerschiff „Fehmarnbelt“, dessen Beobachtungsmaterial durch das Deutsche Hydrographische Institut und das Seewetteramt Hamburg veröffentlicht wird, ist in einem Seegebiet stationiert, das sich durch einen intensiven

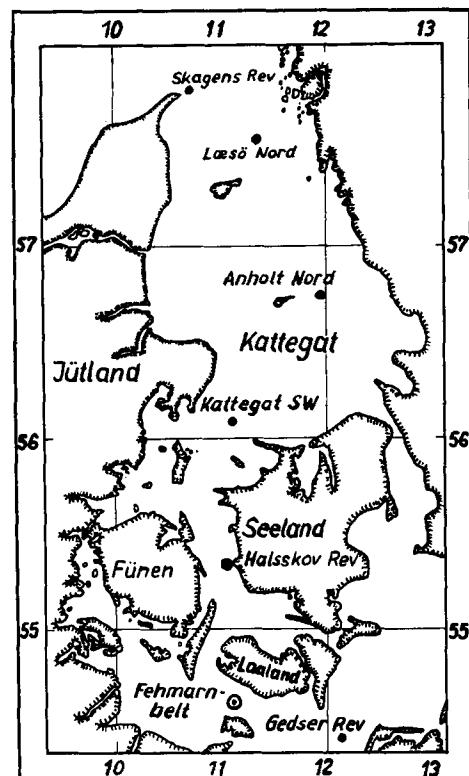


Abb. 1. Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes.

zweiseitigen und jahreszeitlich sehr variierenden Wasseraustausch auszeichnet (s. Abb. 1). Hinzu kommt, daß unter dem Einfluß des benachbarten Festlandes im Untersuchungsgebiet meteorologische Bedingungen anzutreffen sind, die von den ozeanischen Verhältnissen sehr stark abweichen und demzufolge nicht ohne Einfluß auf das Wärmehaushaltsregime des Fehmarnbelt bleiben können. Es muß erwartet werden, daß beide Einflußphären, sowohl die hydrographische in Gestalt der ständig wechselnden Warm- und Kaltwasseradvektion wie auch die meteorologische in Form der Wärmebilanz der Meeresoberfläche, die Gesamtwärmebilanz der Wassermasse und damit deren Wärmeinhalt bestimmen.

Zur Klärung dieses Zusammenhangs sind auf der Grundlage des Beobachtungsmaterials des Feuerschiffes „Fehmarnbelt“ aus dem Zeitraum 1949–1961 der mittlere Jahresgang der Wärmebilanz der Meeresoberfläche Q_B und unter Zugrundelegung des aktuellen Wärmein-

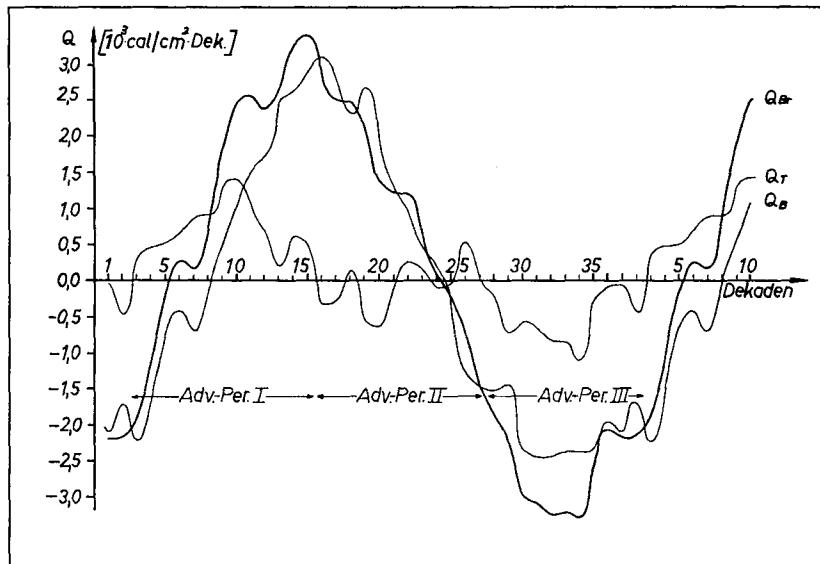


Abb. 2. Mittlere Jahresgänge der Wärmebilanz der Meeresoberfläche Q_B , der resultierenden Wärmebilanz der Gesamtwassermasse Q_{Br} und der Wärmeadvektion Q_T beim Feuerschiff „Fehmarnbelt“. Zeitraum: 1949–1961 [$10^3 \text{ cal/cm}^2 \text{ Dek.}$].

haltes der Gesamtwassermasse am Untersuchungsort der mittlere Jahresgang der Wärmeadvektion Q_T berechnet und dargestellt worden (Abb. 2). Es zeigt sich, daß in der ersten Junidekade der Meeresoberfläche mit beinahe $+3,12 \cdot 10^3 \text{ cal/cm}^2 \text{ Dek.}$ der höchste Wärmeenergiebetrag im Jahresablauf zugeführt wird. Der größte Wärmeverlust durch die Meeresoberfläche ist im mehrjährigen Mittel mit über $-2,42 \cdot 10^3 \text{ cal/cm}^2 \text{ Dek.}$ in den ersten beiden Novemberdekaden zu erwarten. Der Umschlag von negativer zu positiver Wärmebilanz der Meeresoberfläche vollzieht sich zwischen den Dekaden 8 und 9 (Mitte bis Ende März); erste negative Bilanzwerte stellen sich im mehrjährigen Mittel zu Anfang des September (Dekade 25) ein.

Der mittlere Jahresgang der horizontalen Wärmeadvektion wird im Bereich des Feuerschiffs „Fehmarnbelt“ durch drei charakteristische Perioden gekennzeichnet:

- Periode I mit vorwiegender Warmwasseradvektion von Ende Januar (Dek. 3) bis Ende Mai (Dek. 15);
- Periode II mit alternierenden Advektionsverhältnissen von Anfang Juni (Dek. 16) bis Ende September (Dek. 27);

c) Periode III mit vorwiegender Kaltwasseradvektion von Anfang Oktober (Dek. 28) bis Mitte Januar (Dek. 2).

Die additive Verbindung beider Jahresgänge Q_B und Q_T bestimmt den mittleren Jahresgang der resultierenden Wärmebilanz der Gesamtwassermasse Q_{Br} . Man erkennt (Abb. 2), daß der Jahresgang von Q_{Br} durch die Wirkungsweise der advektiven Komponente im Bereich des Feuerschiffes „Fehmarnbelt“ in teilweise erheblichem Maße vom Jahresgang der Wärmebilanz der Meeresoberfläche Q_B abweicht. So beginnt durch die in der zweiten Winterhälfte und im Frühjahr im Fehmarnbelt wirksam werdende Warmwasseradvektion die Periode mit positiven Wärmebilanzwerten der Gesamtwassermasse bereits Ende Februar (Dek. 6) und nicht erst, wie die Wärmebilanz der Meeresoberfläche erwarten läßt, im letzten Märzdrittel. Ebenso ist die Vorverlagerung des Maximums der Gesamtwärmebilanz der Wassermasse von Dek. 16 auf Dek. 15 dem Einfluß der Advektion warmen Wassers im Fehmarnbelt zuzuschreiben. Im Gegensatz dazu führt die in der Abkühlungsperiode beim Feuerschiff „Fehmarnbelt“ wirksam werdende Kaltwasseradvektion zu einer merklichen Verschärfung der negativen

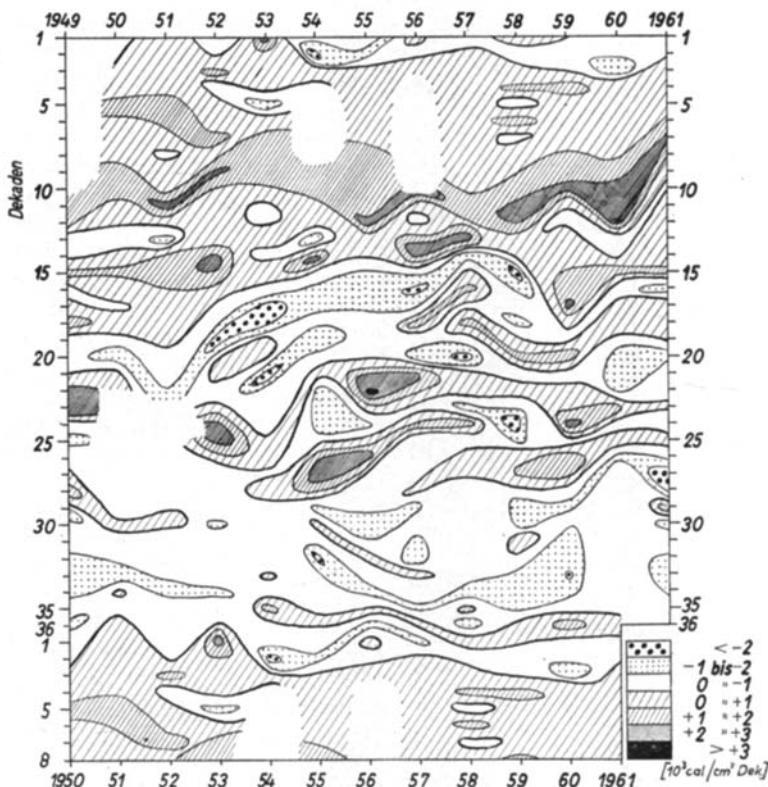


Abb. 3. Isoplethen der horizontalen Wärmeadvektion (Dekadensummen) beim Feuerschiff „Fehmarnbelt“ über den Zeitraum 1949–1961 [10^3 cal/cm 2 Dek.].

Wärmebilanz der Gesamtwassermasse; der Maximalwert des Wärmeverlustes der Wassermasse wird Anfang Dezember (Dek. 34) beobachtet.

Die Darstellung der mittleren Verhältnisse in Abb. 2 gibt naturgemäß keine Auskunft über die zeitliche Veränderlichkeit der advektiven Komponente im Verlauf des 13jährigen Untersuchungszeitraums. Die in Abb. 3 dargestellten Isoplethen der Wärmeadvektion beim Feuerschiff „Fehmarnbelt“ lassen über den Zeitraum 1949–1961 die oben gekennzeichneten drei Advektionsperioden klar erkennen. Besonders deutlich nachweisbar ist der Übergang zwischen der herbst-/winterlichen Kaltwasseradvektion und der Warmwasseradvektion im Winter/Frühjahr. Auch der sich Ende Mai anschließende Übergang zur Periode mit alternierenden Advektionsverhältnissen kommt in der Darstellung klar zum Ausdruck. Hervorzuheben ist der episodenhafte Charakter der Verteilung einzelner kurzzeitiger Advektionsperioden im Verlauf

der Beobachtungsjahre, der offensichtlich auf die Variabilität der Zirkulationsverhältnisse und die Kompliziertheit der thermohalinen Struktur der Wassermassen im Fehmarnbelt und in den benachbarten Seegebieten zurückzuführen ist. Trotzdem sind die charakteristischen Grundzüge des mittleren Jahresgangs der Wärmeadvektion in Abb. 3 wiederzufinden. Näheren Einblick in die Besonderheiten des Jahresgangs der Wärmeadvektion in zwei Beobachtungsjahren mit extrem positiver (1952) und extrem negativer Advektionsbilanz (1961) vermitteln die Summenkurven in Abb. 4. Für die Jahre 1952 und 1961 waren jährliche Advektionsbilanzen von $+6,68 \cdot 10^8$ cal/cm 2 Jahr und $-4,07 \cdot 10^8$ cal/cm 2 Jahr berechnet worden. In beiden Jahresgängen treten die drei Advektionsperioden mit a) vorwiegender Warmwasseradvektion, b) alternierenden Advektionsverhältnissen und c) vorwiegender Kaltwasseradvektion klar in Erscheinung. Die erheblichen Abweichungen

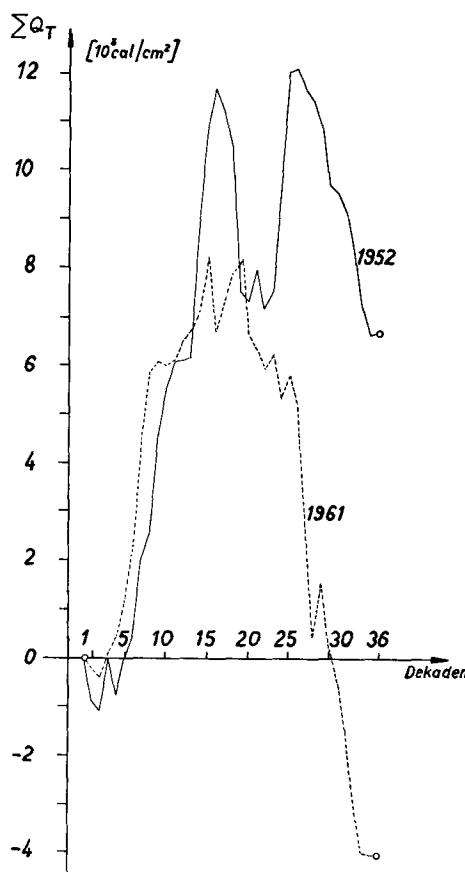


Abb. 4. Summenkurven der horizontalen Wärmeadvektion beim Feuerschiff „Fehmarnbelt“ in den Jahren 1952 und 1961 [10^3 cal/cm^2].

in den jährlichen Advektionsbilanzen beider Jahre haben in erster Linie ihre Ursache in der unterschiedlichen Länge der drei Advektionsperioden (vergl. Tabelle 2).

Die Analyse des Wärmehaushaltes eines Meeressgebietes gewinnt an Bedeutung, wenn neben

der separaten Betrachtung von ausgewählten Beobachtungsjahren und Einzelsituationen das mittlere Wärmehaushaltsregime des betreffenden Seengebietes in die Untersuchungen mit einbezogen wird. Erst die quantitative Erfassung der mittleren Wärmehaushaltsverhältnisse über einen möglichst langen Beobachtungszeitraum versetzt uns in die Lage, die verschiedenen Einzelsituationen in ihrem Verhältnis zueinander abzuschätzen und richtig einzuordnen. In Tabelle 3 sind daher die über den Zeitraum 1949–1961 berechneten mittleren Monatssummen des Strahlungsumsatzes, des konvektiven und latenten Wärmestromes, der Wärmebilanz der Meeresoberfläche, der resultierenden Wärmebilanz der Gesamtwassermasse und der horizontalen Wärmeadvektion beim Feuerschiff „Fehmarnbelt“ sowie die dazugehörigen mittleren jährlichen Bilanzwerte zusammengestellt worden. Als bemerkenswertes Ergebnis dieser Tabelle ist zweifellos an erster Stelle die mit $+3,045 \cdot 10^3 \text{ cal/cm}^2 \text{ Jahr}$ in beträchtlichem Maße positive Bilanz der Wärmeadvektion im Bereich des Feuerschiffes „Fehmarnbelt“ zu nennen. Ihr steht mit $-3,279 \cdot 10^3 \text{ cal/cm}^2 \text{ Jahr}$ eine beinahe um den gleichen Betrag negative Wärmebilanz der Meeresoberfläche gegenüber. Die resultierende Wärmebilanz der Gesamtwassermasse kommt mit $-0,234 \cdot 10^3 \text{ cal/cm}^2 \text{ Jahr}$ im Jahresdurchschnitt dem für die Ostsee wie auch für jedes andere ihrer Teilgebiete zu erwartenden thermischen Gleichgewichtszustand

$$Q_{Br} = Q_{US} \pm Q_K \pm Q_V \pm Q_T = 0.$$

sehr nahe.

Der mittlere Jahrestypus der horizontalen Wärmeadvektion im Fehmarnbelt

Die Frage nach den möglichen Ursachen der positiven Advektionsbilanz im Fehmarnbelt be-

Tabelle 2. Wärmesumme der Advektion beim Feuerschiff „Fehmarnbelt“ in den Perioden I–III der Jahre 1952 und 1961 [$10^3 \text{ cal/cm}^2 \text{ Periode}$]

Die in Klammern stehenden Dekadennummern sind unsicher

	Periode I mit vorwieg. Warmwasseradvektion		Periode II mit altern. Advektion		Periode III mit vorwieg. Kaltwasseradvektion	
	Dauer	Wärmesumme	Dauer	Wärmesumme	Dauer	Wärmesumme
1952	(3)–16	+ 12,79	17–26	+ 0,38	27–(35)	– 5,43
1961	(3)–15	+ 8,58	16–19	– 0,05	20–(36)	– 12,22

Tabelle 3. Mittlere Monatssummen¹ des Strahlungsumsatzes Q_{US} , des konvektiven Wärmestromes Q_K , des latenten Wärmestromes Q_V , der Wärmebilanz der Meeresoberfläche Q_B , der resultierenden Wärmebilanz der Gesamtwassermasse Q_{Br} und der horizontalen Wärmeadvektion Q_T beim Feuerschiff „Fehmarnbelt“ aus dem Zeitraum 1949–1961 [$10^3 \text{ cal/cm}^2 \text{ Mon.}$]

	Q_{US}	Q_K	Q_V	Q_B	Q_{Br}	Q_T
Januar	– 2,718	– 1,282	– 2,051	– 6,051	– 6,233	– 0,182
Februar	– 1,323	– 0,415	– 1,055	– 2,793	– 1,106	+ 1,687
März	+ 0,916	– 0,095	– 1,089	– 0,268	+ 2,820	+ 3,088
April	+ 4,872	+ 0,349	– 0,943	+ 4,278	+ 7,410	+ 3,132
Mai	+ 9,369	+ 0,299	– 1,705	+ 7,963	+ 9,302	+ 1,339
Juni	+ 11,204	+ 0,006	– 2,976	+ 8,234	+ 7,745	– 0,489
Juli	+ 10,359	– 0,232	– 4,089	+ 6,038	+ 4,732	– 1,306
August	+ 6,608	– 0,463	– 4,506	+ 1,639	+ 1,976	+ 0,337
September	+ 2,435	– 0,819	– 4,582	– 2,966	– 2,396	+ 0,570
Oktober	– 0,367	– 1,050	– 3,918	– 5,335	– 6,870	– 1,535
November	– 2,066	– 1,796	– 3,389	– 7,251	– 9,562	– 2,311
Dezember	– 2,669	– 1,615	– 2,483	– 6,767	– 8,052	– 1,285
Jahr	+ 36,620	– 7,113	– 32,786	– 3,279	– 0,234	+ 3,045

röhrt eine ganze Reihe von Problemen, die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nur zum Teil und auch nur qualitativ geklärt werden können. Ebenso ist eine plausible Interpretation des mittleren Jahresganges der horizontalen Wärmeadvektion in Ermangelung kontinuierlicher Strömungsmessungen aus mehreren Tiefenniveaus nur auf der Grundlage bereits bekannter Gesetzmäßigkeiten des Wasseraustausches zwischen der Nord- und Ostsee möglich.

Charakterisieren wir als erstes die allgemeine hydrographische Situation des Untersuchungsgebietes, so ist der Fehmarnbelt als südlichster Teil der Beltsee noch unmittelbar zum Übergangsgebiet zwischen der Nord- und Ostsee, also zwischen zwei thermisch sehr unterschiedlichen Meeresgebieten zu rechnen. Während die Nordsee als Randmeer des Atlantischen Ozeans in ihrem thermohalinen Aufbau auf direktem Wege durch die Wassermassen des Nordostatlantiks beeinflußt wird, können sich in der Ostsee, die als intrakontinentales Mittelmeer ein weitgehend abgeschlossenes Becken darstellt, relativ eigenständige hydrographische Verhältnisse herausbilden. Ein unmittelbarer Wasseraustausch zwischen den beiden hydrographisch gegensätzlichen Wassermassen der Nord- und Ostsee kann nur durch die dänischen Meerengen erfolgen, sein Umfang wird durch den geringen

Querschnitt des Übergangsgebietes beträchtlich beschränkt. Dennoch ist — wie sich zeigt — der Einfluß des thermisch anomalen Nordseewassers, dessen mittlere jährliche Oberflächentemperaturen durch die Ausläufer des warmen Nordostatlantischen Stromes bis zu +8°C von den Normalwerten abweichen (Dietrich, 1950), für den Wärmeinhalt der Wassermassen im Fehmarnbelt von großer Bedeutung. Aus eingehenden Untersuchungen des Mechanismus des Wasseraustausches durch die dänischen Meerengen (Dietrich, 1951; Brogmus, 1952; Wyrtki, 1954; Soskin, 1963) wissen wir, daß der im Mittel in der Oberflächenschicht erfolgende Abtransport des relativ salzarmen Ostseewassers durch die dänischen Gewässer in die Nordsee durch einen einwärtslaufenden Strom salzreicherem Nordseewassers in der bodennahen Schicht kompensiert wird. Dieser salzreiche Bodenstrom ist nicht nur für den Wasser- und Stoffhaushalt der Ostsee von großer Bedeutung, sondern er spielt auch, wie die vorliegenden Untersuchungen belegen, im Wärmeaushalt der südlichen Ostsee eine wichtige Rolle.

Die im folgenden vorgenommene Interpretation des mittleren Jahresganges der Horizontaladvektion beim Feuerschiff „Fehmarnbelt“ gründet sich auf der Annahme, daß die Änderungen der Advektionsverhältnisse im Verlaufe eines mittleren Jahres auf jahreszeitliche Variationen der mittels der Oberflächen- und Bodenströmung advehierten Kalt- und Warmwas-

¹ Positives Vorzeichen bei zur Meeresoberfläche gerichtetem Wärmestrom.

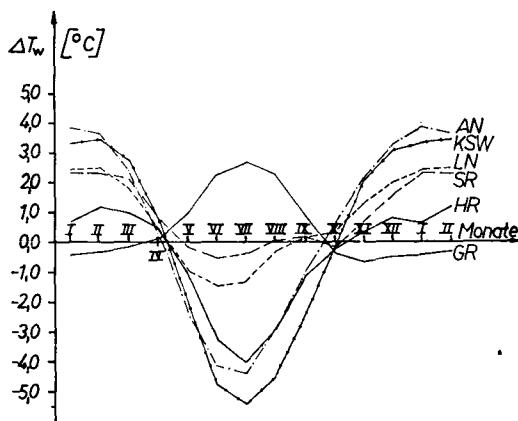


Abb. 5. Mehrjährige monatliche Wassertemperaturdifferenzen (1949-1961) zwischen den Monatsmittelwerten des jeweils tiefsten Meßniveaus der dänischen Feuerschiffe „Skagens Rev“, „Læsø Nord“, „Anholt Nord“, „Kattegat SW“ und „Halsskov Rev“ sowie des 5-m-Niveaus von „Gedser Rev“ und den mehrjährigen monatlichen Schichtmitteltemperaturen beim Feuerschiff „Fehmarnbelt“.

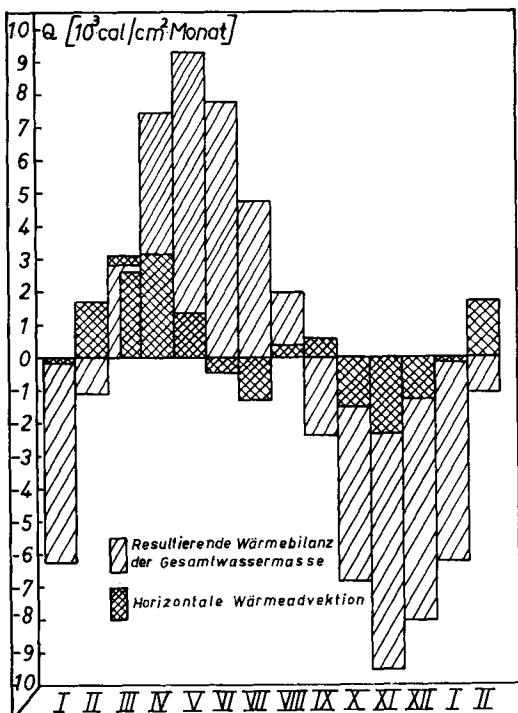


Abb. 6. Mittlere Monatssummen der resultierenden Wärmebilanz der Gesamtwassermasse und der horizontalen Wärmeadvektion beim Feuerschiff „Fehmarnbelt“ [$10^3 \text{ cal/cm}^2 \text{ Mon.}$].

sermassen zurückzuführen sind. In Ermangelung geeigneten Strömungsmeßmaterials sind die mehrjährigen monatlichen Wassertemperaturdifferenzen (1949-1961) zwischen den Monatsmittelwerten aus dem jeweils tiefsten Meßniveau der dänischen Feuerschiffe „Skagens Rev“ (38 m), „Læsø Nord“ (38 m), „Anholt Nord“ (30 bzw. 40 m), „Kattegat SW“ (37 m) und „Halsskov Rev“ (20 m) sowie aus dem 5-m-Niveau von „Gedser Rev“ und den mehrjährigen monatlichen Schichtmitteltemperaturen beim Feuerschiff „Fehmarnbelt“ berechnet und in Abb. 5 dargestellt worden.

Quantitative Aussagen sind von diesem Verfahren nicht zu erwarten, da

- die Vergleichbarkeit der Monatsmittelwerte der Wassertemperaturen im strengen Sinne nicht gewährleistet ist;
- keine Messungen der Tiefenströmung zur Verfügung stehen;
- keine Angaben über die vertikale Mächtigkeit des Oberflächen- und Bodenstromes und deren jahreszeitliche Änderungen vorliegen.

Wohl aber ermöglichen die in Abb. 5 dargestellten zeitlichen Änderungen der mittleren thermischen Situationen an den benachbarten Feuerschiffen sowohl in Richtung Nordsee (im Bereich des einlaufenden Bodenstromes) als auch in Richtung Ostsee (im Bereich des auslaufenden Oberflächenstromes) eine qualitative Deutung der Charakteristika des mittleren Jahresgangs der Wärmeadvektion beim Feuerschiff „Fehmarnbelt“ (vergl. Abb. 6). Zur Berücksichtigung des mittleren Jahresgangs des Wasseraustausches durch die dänischen Meerengen wurden die Untersuchungen von Soskin (1963) herangezogen.

Die Gegenüberstellung des mittleren Jahresgangs der Advektion beim Feuerschiff „Fehmarnbelt“ in Abb. 6 und des mittleren Jahresgangs der Wassertemperaturdifferenzen an den benachbarten Feuerschiffen in Abb. 5 führt zu folgenden Schlußfolgerungen:

Die im Februar im Fehmarnbelt einsetzende beträchtliche Wärmeadvektion ist nach Abb. 5 auf den Zustrom relativ warmen Kattegatwassers im Bereich des Bodenstromes zurückzuführen. Bei gleichzeitiger Abnahme der Kaltwasserzufluhr im Bereich des auslaufenden Oberflächenstroms kommt es im März und April (im März ΔT_w (GR/Fb) $> -0,2^\circ\text{C}$) trotz sich verringernden Zustroms in der Tiefe (nach

Soskin, 1963; März: 92 km^3 , April: 73 km^3) zu einer weiteren effektiven Zunahme der Wärmeadvektion im Fehmarnbelt. Die sich in den Monaten März und April wieder abbauenden positiven Temperaturdifferenzen zwischen den Temperaturen des Einstromwassers der Bodenströmung und der Schichtmitteltemperatur beim Feuerschiff „Fehmarnbelt“ sind demnach noch groß genug, um im genannten Zeitraum eine erhebliche Advektion von warmem Kattegatwasser zu bewirken (im April $+3,13 \cdot 10^8 \text{ cal/cm}^2 \text{ Mon.}$). Wie Abb. 6 erkennen läßt, wird die der Volumeneinheit (2800 cm^3) beim Feuerschiff „Fehmarnbelt“ im März zugeführte Wärmeenergie bei noch schwach negativer Wärmebilanz der Meeresoberfläche allein durch die horizontale Warmwasseradvektion im Bereich des einlaufenden Bodenstromes bestreitten ($+3,09 \cdot 10^8 \text{ cal/cm}^2 \text{ Mon.}$). Die im Mai nachgewiesene Warmwasseradvektion ist dagegen — wie Abb. 5 zeigt — ausschließlich auf die Zufuhr von bereits beträchtlich erwärmtem Oberflächenwasser aus der Ostsee, insbesondere aus den benachbarten Flachwassergebieten unter der dänischen Küste (z. B. Röd-Sand) zurückzuführen, während die im Mai erstmalig beim Feuerschiff „Fehmarnbelt“ in Erscheinung tretende Kaltwasseradvektion von Kattegatwasser in der Tiefenströmung noch nicht dominant werden kann. Erst im Juni und Juli führt die weiter zunehmende Advektion von relativ kaltem Kattegat-Tiefenwasser und die weiter abnehmende Zufuhr von wenn auch recht warmem Oberflächenwasser aus der Ostsee im Fehmarnbelt zu einer effektiven Kaltwasseradvektion, die insbesondere im Juli, zum Zeitpunkt des größten horizontalen Temperaturunterschiedes zwischen der relativ niedrigen Temperatur des Tiefenwassers im Kattegat und der Schichtmitteltemperatur im Fehmarnbelt ($\Delta T_w (\text{K2W/Fb}) < -5,4^\circ\text{C}$) mit ca. $-1,31 \cdot 10^8 \text{ cal/cm}^2 \text{ Mon.}$ erhebliche Ausmaße annimmt. Im August und September kommt es unter dem Einfluß des noch relativ warmen Oberflächenwassers der südlichen Ostsee und im Zusammenwirken mit dem raschen Abbau des negativen Temperaturgradienten zwischen der Schichtmitteltemperatur im Fehmarnbelt und der Temperatur des Tiefenwassers im Kattegat noch einmal zu einer schwachen Warmwasseradvektion. Ab Oktober ist eine beträchtliche Zunahme der effektiven Kaltwasseradvektion zu beobachten, die im November mit rund $-2,31 \cdot 10^8 \text{ cal/cm}^2 \text{ Mon.}$

ihren Höchstwert erreicht und — wie Abb. 5 zeigt — auf die Zufuhr von bereits stark abgekühltem Oberflächenwasser aus den küstennahen Flachwassergebieten der südlichen Ostsee zurückzuführen ist. In der Tiefe existieren bereits positive Temperaturdifferenzen zwischen den Temperaturen des Tiefenwassers im Kattegat und der Schichtmitteltemperatur im Fehmarnbelt ($\Delta T_w (\text{KSW/Fb}) = +2,07^\circ\text{C}$), doch das warme Kattegatwasser ist bei gleichfalls zunehmendem Bodenstrom (nach Soskin, 1963 Maxima des Zuflusses mit $124,5$ bzw. $118,6 \text{ km}^3/\text{Mon.}$ im November bzw. Januar) im November noch nicht in der Lage, die in einer relativ mächtigen Schicht herantransportierten kalten Wassermassen des Oberflächenstroms (herbstliche Konvektion) zu übercompensieren. Ab Dezember führt der zunehmende Einfluß des warmen Kattegatwassers in der Bodenströmung zu einem stetigen Abbau der effektiven Kaltwasseradvektion in der Oberflächenschicht. Im Januar halten sich beide Einflußsphären annähernd das Gleichgewicht ($Q_T \approx 0$), bis dann im Februar der warme Bodenstrom sehr rasch die Oberhand gewinnt und im Fehmarnbelt die Periode verstärkter Warmwasseradvektion einleitet.

Die Berechnungen haben ergeben, daß die in der Periode I (Ende Januar bis Ende Mai) beim Feuerschiff „Fehmarnbelt“ advehierte mittlere Wärmemenge von rund $+9,58 \cdot 10^8 \text{ cal/cm}^2 \text{ Per. I}$ den im Monat Juni im Fehmarnbelt durch die Meeresoberfläche vereinnahmten Wärmebetrag noch um rund $11,6\%$ überschreitet (vergl. Tabelle 3). In der Periode II (Anfang Juni bis Ende September) überwiegt bei allgemein alternierenden Advektionsverhältnissen mit ca. $-0,89 \cdot 10^8 \text{ cal/cm}^2 \text{ Per. II}$ die Advektion kälterer Wassermassen. Die in der Periode III (Anfang Oktober bis Mitte Januar) der Gesamtwassermasse beim Feuerschiff „Fehmarnbelt“ durch Kaltwasseradvektion entzogene Wärmemenge von rund $-5,64 \cdot 10^8 \text{ cal/cm}^2 \text{ Per. III}$ ist etwa vergleichbar mit dem durch die Meeresoberfläche im Oktober erfolgten Wärmeverlust von rund $-5,34 \cdot 10^8 \text{ cal/cm}^2 \text{ Mon.}$

Die mitgeteilten Zahlenwerte der Wärmeadvektion beziehen sich — um noch einmal darauf hinzuweisen — lediglich auf das Seengebiet in unmittelbarer Nachbarschaft des Feuerschiffes „Fehmarnbelt“. Infolge ständig wirksamer Mischungsprozesse zwischen den thermisch wie halin unterschiedlichen Wassermassen des

einlaufenden Bodenstromes und des auslaufenden Oberflächenstromes muß im Übergangsgebiet zwischen der Nord- und Ostsee in Richtung des Hauptstromstriches unter mittleren Verhältnissen eine stetige Änderung der advehierten Wärmesummen angenommen werden. Über den

Betrag dieser Änderung ist gegenwärtig noch keine Aussage möglich. Erst aus der vergleichenden Betrachtung der speziellen Advektionsverhältnisse in den benachbarten Seegebieten werden darüber nähere Informationen zu erwarten sein.

LITERATUR

- Albrecht, F., 1955. Methods of computing global radiation. *Geofis. pura e appl.* 32, 131–138.
- Bolz, H. M., u. Falckenberg, G., 1949. Bestimmung der Konstanten der Ångströmschen Strahlungsgleichung. *Z. Met.* 3, 97–100.
- Brogmus, W., 1952. Eine Revision des Wasserhaushaltes der Ostsee. *Kieler Meeresf.* 8, 1.
- Dietrich, G., 1950a. Kontinentale Einflüsse auf Temperatur und Salzgehalt des Ozeanwassers. *Dt. Hydrogr. Z.* 3, 33–39.
- 1950b. Über systematische Fehler in den beobachteten Wasser- und Lufttemperaturen auf dem Meere und über ihre Auswirkung auf die Bestimmung des Wärmeumsatzes zwischen Ozean und Atmosphäre. *Dt. Hydrogr. Z.* 3, 5/6, 314–324.
- Dietrich, G., 1951. Oberflächenströmung im Kattegat, Sund und in den Belten. *Dt. Hydrogr. Z.* 4, 4/5/6.
- Hankimo, J., 1964. Some computations of the energy exchange between the sea and the atmosphere in the Baltic area. *Finn. Met. Off. Contributions*, Nr 57, 3–26.
- Hela, I., 1951. On the energy exchange between the sea and the atmosphere in the Baltic area. *Ann. Acad. Scient. Fenn.*, Ser. A, 97, 1–48.
- Hupfer, P., 1967. Die termischen Verhältnisse in der ufernahen Zone des Meeres — dargestellt am Beispiel der Ostsee bei Zingst. *Habilitationsschrift*, Leipzig.
- Jensen, J. C., 1940. The influence of the currents in the Danish waters on the surface temperature in winter, and on the winter temperature of the air. *Medd. fra Komm. for Danmarks Fisk.- og Havundersøgelser*, Ser. Hydrogr., III, 2, 3–52.
- Laevastu, T., 1960. Factors affecting the temperature of the surface layer of the sea. *Soc. Scien. Fenn., Commentationes Phys.-Math.* XXV.
- Manier, G., 1961. *Der fühlbare und latente Wärmestrom von der Meeresoberfläche an die Luft für den Nordatlantischen Ozean*. Diss., Mainz.
- Markgraf, H., 1962. Einige Methoden und Probleme aus dem Bereich der maritimen Klimatologie. *Seewetteramt Hamburg, Einzelveröff.* Nr. 33, 3–48.
- Palmén, E., 1963. Computation of the evaporation over the Baltic sea from the flux of water vapor in the atmosphere. *I.A.S.H. Comm. for Evapor.*, 62, 244–252.
- Pomeranec, K. S., 1964. Die Wärmebilanz der Ostsee. *Trudy GOIN* 82, 87–109.
- Rohwer, C., 1931. Evaporation from free water surfaces. *U.S. Dept. Agriculture Tech. Bull.* 217, 96 pp.
- Simojoki, H., 1948. On the evaporation from the northern Baltic. *Geophysica* 3, 123–126.
- Soskin, I. M., 1963. Langjährige Änderungen der hydrologischen Charakteristika der Ostsee. *Gidrometeoizdat*.
- Soskin, I. M. & Rozova, L. V., 1959. Langjährige Schwankungen der Wassertemperatur des Ostsee. *Trudy GOIN* 37, 42.
- Strokina, L. A., 1956. Der turbulente Wärmeaustausch mit der Atmosphäre und die Verdunstung von der Oberfläche der Ostsee. *Meteorologija i Gidrologija* 5, 55–60.
- Sturm, M., 1962. Über Methoden zur empirischen Berechnung der Hauptkomponenten des Wärmehaushaltes der Meeresoberfläche aus mittleren hydroeteorologischen Daten. *Beitr. Meeresf.* 9, 36–66.
- Wyrtki, K., 1954. Die Dynamik der Wasserbewegung im Fehmarnbelt. *Kieler Meeresf.* 10.
- Meteorologische Beobachtungen von deutschen Feuerschiffen der Nord- und Ostsee. Seewetteramt Hamburg.
- Meereskundliche Beobachtungen auf den deutschen Feuerschiffen der Nord- und Ostsee. Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg.
- Nautisk-Meteorologisk Årbog. Dan. Met. Inst. Charlottenlund.

ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА ЮЖНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В РАЙОНЕ МАЯКА «ФЕМАРНБЕЛТ»

Описаны некоторые новые результаты исследования теплового баланса южной части Балтийского моря. На основании наблюдений на маяке «Фемарнбельт» ($54^{\circ}36' N$, $11^{\circ}59' E$) за период 1949–1961 гг. подробно изучены средний годовой ход потока энергии с поверхности моря и запаса тепла в районе Фемарнбельт. Кроме того, вычислено количество среднего переноса тепла через Фемарнбельт с использованием рассчитанных и

реальных значений вариаций запаса тепла в районе Фемарнбельт. Показано, что среднегодовая адвекция тепла через Фемарнбельт играет важную роль в тепловом балансе южной части Балтийского моря. Обнаружен отчетливый годовой ход адвекции тепла; имеются три характерных периода: зима/весна (февраль–май), лето (июнь–сентябрь) и осень (октябрь–январь).