



METEOROLOGICAL OFFICE

TRANSLATION

Translation No. 1579

Not to be reproduced except by permission of the Director-General, U.K. Meteorological Office.

Systematic errors in the observed surface water and air temperatures at sea and their effect on the determination of the heat exchange between the sea and the atmosphere. By Günter Dietrich.

Translation of Hamburg, D. Hydrogr. Inst., D. Hydrogr. Z., 3, 1950, H. 5/6, pp. 314-324.

p.315

Introduction. Basing themselves on the fundamental investigations on evaporation by H.U.Sverdrup (1936), F.Albrecht (1940, 1949) and W.C.Jacobs (1942, 1943, 1949) have, independently of one another, in the last decade put forward methods for determining the heat exchange between the ocean and the atmosphere, and have applied them to the Pacific and Northern Atlantic Oceans. The most important observational material for these investigations is provided by the records of the wind speeds and the relative humidity as well as the temperatures of the water surface and the air, as measured by merchant ships on the oceans of the world in accordance with an international agreement.

The observation programme for shipping, which goes back to the initiative of the American oceanographer and sailor M.F.Maury, has remained in force with few alterations from its introduction in 1853 to the present day. The seamen voluntarily provide observations which, collected by the various national hydrographic and meteorological offices and partly processed scientifically, nowadays provide the most important basis for our knowledge of the physical conditions on the surface of the oceans and in the lower atmosphere above them. So long as it was a matter of obtaining an idea of the large-scale distribution of the meteorological-hydrographic elements on the oceans of the world, no serious errors were introduced into the accounts if the systematic faults in the observation material were ignored. With relatively little material one could often justifiably expect these errors to fade into the background, compared with the weather-related variability and the other fluctuations in the ocean and the atmosphere.

One was nevertheless aware that on board ship there are numerous possibilities of errors creeping into the normal observation material

provided by merchant ships. The weaknesses were frequently pointed out, e.g. with regards the surface temperatures by C. F. Brooks (1926, 1928, 1932), P. M. van Riel (1928), F. Stupart (1929), J. R. Lumby (1935) and with regards the temperature of the air by E. Kuhlbrodt (1936a). Recently (1950) E. Wahll made a detailed study of the effect of radiation on drawn samples of water on board ship and obtained indications of a reduction of the surface temperature related to the time of day and year and cloud cover. Based on these experiences and the conclusions therefrom, instruments have recently been developed which are more suitable to conditions on board, e.g. the insulating towing scoop by O. Sund (1931) as improved by A. Schumacher (1938), the insulating buckets by O. M. Ashford (1948) and by E. Wahll (1949), whirling thermometers for use on board by E. Kuhlbrodt (1936b), or, with regards water temperatures, recording has been adopted. Such developments justify the hope that in future the possibilities for errors in normal shipboard usage will be greatly reduced and that the observations will meet the increased demands for accuracy.

The characterisation of the air masses over the sea for the synoptic weather service, as well as the determination of the heat exchange between water and air already mentioned, demand a high accuracy of measurement of $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ if their quantitative results are to have credibility for the various components of the heat exchange. To date, the investigations into the heat exchange have been almost exclusively based on the older material from ships' observations, whose faultiness has often been pointed out, although the latter was very difficult to determine by a critical, systematic process in the absence of any means of comparison.

p. 316

Basis of a critical investigation. A critical investigation must start out from a comparison of at least two independent collections of temperature observations. These do not exist for the oceans, but

they are available for the shallow seas, where lightships and island stations carry out a fixed observation programme and where there is extensive material from normal ships' observations (merchant vessels, fishing boats). These means for a critical investigation, available for European waters, will be used below for the temperatures of water and air.

With regards normal ships' observations, extensive material was available, chiefly collected by German ships. After a critical analysis these observations were committed to punched Hollerith cards by the former German Naval Observatory and, since 1945 by the Meteorological Office for NW-Germany, and tabulated in single-degree squares by year, day and hour for the period 1906 to 1938.¹⁾ A single-degree square which comprises an area of c. 6500 to 7500 square km in the geographical latitude of the North Sea and the Baltic is too large if one wishes to compare the mean values of certain elements for the entire area with the mean values for a fixed measuring point within that area. This inadequacy was largely eliminated by selecting only those single-degree squares in which the shipping routes passed ^{close to} the fixed station, closely bunched together. Moreover, there must be no major local differences on this line. Taking this into account 9 single-degree squares were selected in the first instance, in which there was a fixed station with a schedule of hydrographic-meteorological observations. The stations were: the Finnish lighthouse Märket in the Åland Sea; the Danish lighthouse Christiansø in the southern Baltic, the Danish lightships Gedser-Rev in the southern Baltic, Anholt-Knob in the Kattegat, Skagens-Rev in the Skagerrak, Horns-Rev in the eastern North Sea, the Norwegian lighthouse Utsire in the northern North Sea and the British lightships Varne, in the Straits of Dover and Seven Stones at the western exit of the English Channel. It soon emerged that the observations, even on the selected small

1. Thanks are due to the Meteorological Office of N.W. Germany (Division for Maritime Meteorology) for making available the tables for selected one-degree squares and for other cooperation.

islands were subject to local influences to such an extent that they appeared unsuitable for strict comparison with conditions on the open sea. Märket, Christiansö and Utsire were thus eliminated. In the degree square of the lightship Horns-Rev, the local differences, especially in winter, were so great that the dispersion of the ship's observations became too great. In the case of the British lightships the 5 to 7 day interval between the observation periods of the water temperature was too great to obtain sufficiently secure monthly means for the purposes intended.

Fig. 1. Position of one-degree squares for merchant ship observations and comparison stations (Danish lightships).

There remained only the three Danish lightships Gedser-Rev, Anholt-Knob and Skagens-Rev, whose geographical position, together with their corresponding degree-square, is shown in Fig. 1.

p. 317

Another favourable fact makes these three lightships particularly suitable for the task in hand. During the period 1906 - 1913, when the observations by the German merchant ships were at their peak to date, these lightships carried out a systematic observation programme, measuring the temperature of the air every hour and that of the water every two hours. The hourly and diurnal mean for each month of the various years are available in the Nautisk-Meteorologisk Aarbog (1911, 1916). This material provides a basis for comparison, the like of which is not even approximately available for any other maritime area of the world. Certainly, this material must also be viewed critically, but unfortunately there is no way of doing so, as there is no detailed information on the methods of observation applied. However, as the observations on the lightships were made under the supervision and control of the Danish Meteorological Institute, one may assume that they were carried out with infinitely greater care than is usually the case during the voyage of merchant ships.

Fig. 2. Difference in water temperature, degree square-lightship (diurnal mean)

1) Number of observations.

Grundlagen einer kritischen Betrachtung. Eine kritische Betrachtung muß von dem Vergleich von wenigstens zwei unabhängigen Kollektiven von Temperaturbeobachtungen ausgehen. Sie fehlen im Ozean, sie existieren aber im beschränktem Umfange von den Flachmeeren, dort wo Feuerschiffe und Inselstationen ein festes Beobachtungsprogramm durchführen und wo zugleich ein umfangreiches Material von normalen Schiffsbeobachtungen (Handelsschiffe, Fischdampfer) vorliegt. Diese Möglichkeit einer kritischen Untersuchung, die in den europäischen Gewässern erfüllt ist, sei im folgenden für die Temperaturen von Wasser und Luft genutzt.

An normalen Schiffsbeobachtungen stand ein umfangreiches Material zur Verfügung, das vornehmlich deutsche Schiffe gesammelt haben. Diese Beobachtungen wurden nach kritischer Aufbereitung von der ehemaligen Deutschen Seewarte und seit 1945 vom Meteorologischen Amt für NW-Deutschland in Hollerith-Lochkarten überführt und für Eingradfelder nach Jahr, Tag und Stunde für den Zeitraum 1906-38 tabuliert¹. Ein Eingradfeld, das in der geographischen Breite der Nord- und Ostsee etwa 6500 bis 7500 qkm umfaßt, stellt ein zu großem Gebiet dar, wenn man die Mittelwerte bestimmter Elemente für die ganze Fläche mit den Mittelwerten für eine punktförmige feste Meßstelle vergleichen will; die in diesem Gebiet liegt. Diese Unzulänglichkeit ließ sich weitgehend ausschalten, indem nur solche Eingradfelder aus-

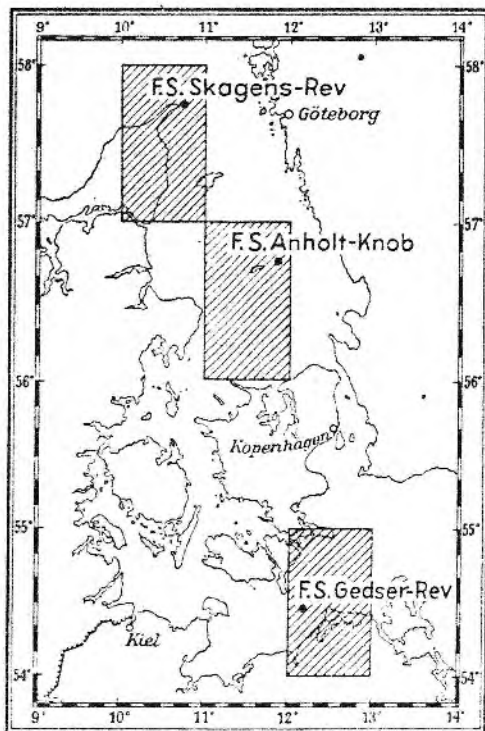


Abb. 1: Lage der Eingradfelder mit Handelsschiffsbeobachtungen und den Vergleichsstationen (Dänische Feuerschiffe)

Es verblieben nur die drei dänischen Feuerschiffe Gedser-Rev, Anholt-Knob und Skagens-Rev, deren geographische Lage mit den dazugehörigen Eingradfeldern in der Abb. 1 skizziert

¹ Dem Meteorologischen Amt für NW-Deutschland (Abt. f. Marit. Met.), das die Tabellen für ausgewählte Eingradfelder zur Verfügung stellte, sei für das Entgegenkommen besonders gedankt.

gewählt wurden, in welchen der Schifffahrtsweg auf einer Linie gebündelt unmittelbar die feste Station passiert. Große örtliche Unterschiede dürfen außerdem auf dieser Linie nicht auftreten. Unter diesen Gesichtspunkten wurden zunächst 9 Eingradfelder ausgewählt, in denen eine feste Station mit terminmäßigen hydrographisch-meteorologischen Messungen lag. Die Stationen waren: der finnische Leuchtturm Märket in der Ålandsee, der dänische Leuchtturm Christiansö in der südlichen Ostsee, die dänischen Feuerschiffe Gedser-Rev in der südlichen Ostsee, Anholt-Knob im Kattegat, Skagens-Rev im Skagerrak, Horns-Rev in der östlichen Nordsee, der norwegische Leuchtturm Utsire in der nördlichen Nordsee und die englischen Feuerschiffe Varne in der Straße von Dover und Seven Stones vor dem Westausgang des Englischen Kanals. Es zeigte sich sehr bald, daß die Beobachtungen selbst auf den ausgesuchten sehr kleinen Inseln bereits lokal soweit beeinflusst sind, daß sie für einen strengen Vergleich mit den Verhältnissen auf der offenen See als ungeeignet erscheinen. Märket, Christiansö und Utsire fielen damit aus. Im Gradfeld des Feuerschiffs Horns-Rev erwiesen sich die örtlichen Unterschiede besonders im Winter als stark, so daß die Streuung der Schiffsbeobachtungen zu groß wurde. Bei den englischen Feuerschiffen sind die Beobachtungstermine der Wassertemperatur von 5 bis 7 Tagen zu weitabständig, um genügend gesicherte Monatsmittel für den vorliegenden Zweck zu erhalten.

Dietrich, U

ist. Ein weiteres besonders geordnetes Handelsschiffsystematisches Beobachtungsprogramm, die die einzelnen Material ist es nur annähernd aber leider nach methoden fehlenden Meteorologischen Material gerech-

Zahl der Beobachtungen

0.5
0.0
0.4
0.2
0.0
-0.2
-0.4

Abb. 2: D

Systemat
Abb. 2 sind die aus den Beobachtungen 1906-1938 Gruppen herausgearbeitet, die in den verschiedenen Monaten zum Vergleich der Beobachtungen der einzelnen Monate

Die Temperatur der Feuerschiffe weist die Monatsmittel im Winter 0.5 bis 0.6 Grad Celsius aus, als Folge eines zwar eines Feuerschiffes Anteil etwas

ist. Ein weiterer günstiger Umstand macht diese drei Feuerschiffe für die vorliegende Aufgabe besonders geeignet. Im Zeitraum 1906-13, in dem die Beobachtungstätigkeit der deutschen Handelsschiffe bisher am intensivsten betrieben wurde, haben diese Feuerschiffe ein systematisches Beobachtungsprogramm durchgeführt und stündlich die Lufttemperatur und zweistündlich die Wassertemperatur gemessen. Die Stunden- und Tagesmittel in jedem Monat für die einzelnen Jahre liegen im Nautisk-Meteorologisk Aarbog (1911, 1916) vor. Mit diesem Material ist eine Vergleichsbasis gegeben, wie sie in keinem anderen Seegebiet der Erde auch nur annähernd erfüllt ist. Gewiß ist auch an dieses Material ein kritischer Maßstab anzulegen, aber leider mangelt es an einer Handhabe dafür, da nähere Angaben über die Beobachtungsmethoden fehlen. Da die Feuerschiffsbeobachtungen der Betreuung und Kontrolle des Dänischen Meteorologischen Instituts unterstanden, kann aber mit einem ungleich sorgfältigeren Material gerechnet werden, als es auf der Fahrt der Handelsschiffe zustande zu kommen pflegt.

Zahl der Beobachtungen	317	292	296	355	441	425	494	522	472	438	395	454	[Sk.-R. 2880/Monat]
	124	153	125	156	176	174	196	219	198	193	176	165	[A.-K. 1800] " "]
	353	372	514	461	496	547	576	595	593	671	654	553	[G.-R. 2880] " "]

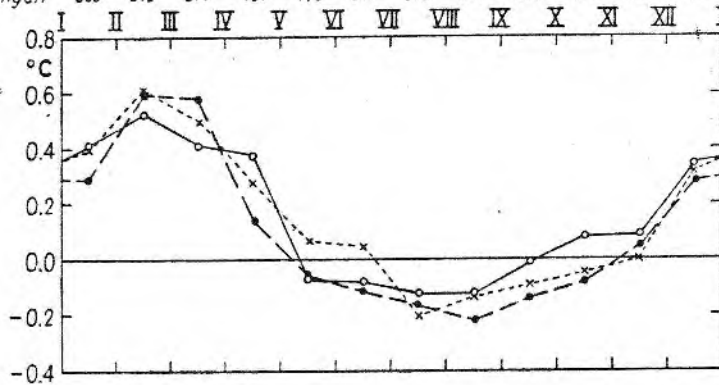


Abb. 2: Differenz der Wassertemperaturen Gradfeld-Feuerschiff (Tagesmittel)

- 57°-58° N, 10°-11° E - Skagens-Rev F.S. (1906-13)
- 56°-57° N, 11°-12° E - Anholt-Knob F.S. (1909-13)
- - - x - 54°-55° N, 12°-13° E - Gedser-Rev F.S. (1906-13)

Systematische Fehler in den Angaben der Oberflächentemperatur und ihre Korrektur. In Abb. 2 sind für drei Beispiele die Differenzen der Wassertemperaturen dargestellt, wie sie sich aus den Beobachtungen der Handelsschiffe und Feuerschiffe ergeben. Sie stellen die Mittelwerte 1906-13 aus den Differenzen der Monatsmittel der Einzeljahre dar. Beide Materialgruppen beruhen auf Tagesmitteln, die der Handelsschiffe auf Beobachtungen in vierstündlichen, die der Feuerschiffe in zweistündlichen Abständen, die beide auf $\frac{1}{10}^{\circ}$ C vorgenommen wurden. Die Gesamtzahl der zugrunde liegenden Beobachtungen der Handelsschiffe, die auf jeden Monat der einzelnen Eingradfelder entfällt, ist am oberen Rande der Abb. 2 angegeben. Zum Vergleich ist die Zahl der Beobachtungen von den Feuerschiffen pro Monat in der rechten Ecke angeführt. Das umfangreiche Material aus dem betrachteten Zeitraum läßt gesicherte Monatsmittel erwarten, die sich auf Tagesmittel beziehen.

Die Temperaturdifferenzen nach den Beobachtungen im Eingradfeld und von den Feuerschiffen weisen einen bemerkenswerten einheitlichen jährlichen Gang auf. Im Sommer sind die Monatsmittel auf Grund der Handelsschiffsbeobachtungen etwa 0,1-0,2^o C zu niedrig, im Winter 0,5-0,6^o C zu hoch. Da die Feuerschiffsbeobachtungen als recht zuverlässig gelten können und die Homogenität des Materials weitgehend erfüllt ist, werden die Abweichungen als Folge eines systematischen Fehlers in den Handelsschiffsbeobachtungen aufgefaßt, und zwar eines Fehlers, der aus verschiedenen Anteilen besteht. Im folgenden sei versucht, diese Anteile etwas näher zu erfassen. Eine vollständige Analyse ist schwerlich zu erreichen.

Systematic errors in the data on surface temperature and their correction. Fig. 2 shows three examples of the differences in water temperature of the kind that occur in the observations of merchant ships and lightships. They represent the mean values 1906-13 from the differences of the monthly average of the individual years. Both groups of material consist of diurnal means, those of the merchant ships being based on observations made at four hour intervals, those of the lightships at two hour intervals, in both cases to $1/10^{\circ}$ C. The total number of observations made by the merchant ships for every month of the individual single-degree squares, is shown on the top of Fig. 2. For the sake of comparison, the number of observations made by the lightships per month are shown in the upper right hand corner. The extensive material available for the period of observation justify the assumption that the monthly mean, related to the diurnal mean, is accurate.

The temperature differences shown by the observations in the single-degree square and by the lightships disclose a remarkable, uniform annual cycle. In the summer, the observations made by the merchant ships for the monthly mean are some $0.1 - 0.2^{\circ}$ C too low, in winter they are $0.5 - 0.6^{\circ}$ C too high. As the observations on the lightships are considered to be very reliable and the homogeneity of the material is largely met, the deviations are interpreted as a result of a systematic error in the merchant shipping observations, an error consisting of several components. An effort is made below to narrow down these components. A complete analysis will be difficult to achieve.

p. 318

The following factors may in part affect the measured temperatures.

1. The different mixture of the surface layer for moving ships and anchored lightships.
2. Radiation of the water sample, especially by the sun.
3. Heat exchange between the water sample and the ambient air.
4. Inadequate adaptation of the thermometers.

ad 1: The data from moving ships need not necessarily be identical with the data from anchored ships, as the moving ships take the temperature in a much more agitated surface layer than the ships at anchor do. This fact might be contributory if the observations made by merchant ships in the summer provided too low a mean. They cannot however explain the considerable, positive deviations in winter as shown in Fig. 2. As all three lightships are in areas with relatively strong currents - this applies especially to the Skagens-Rev with an average 1 nautical mile per hour - little significance can be attributed to this part.

Fig. 3 Difference in water temperature degree square ^{minus} lightship

- x daytime mean
- e nighttime mean
- o difference of equivalent temperatures...

ad 2: The effect of the radiation on the total monthly mean becomes very obvious if one compares the differences in the water temperatures based on the mean of the whole day with the differences based entirely on night-time observations (20h, 0h, 4h) on merchant ships and lightships. Such a comparison for the area Gedser-Rev is shown in Fig. 3. The number of observations is shown at the top as in Fig. 2. The result is an annual course of radiation effect of the diurnal mean according to the equation $F_g = 0.08^\circ + 0.04^\circ \sin(294^\circ + \alpha)$, with the phase angle α being counted from 1 January. According to this result the effect of the radiation on the diurnal mean is relatively small and has an aggravating effect on the differences of temperatures measured on merchant ships and lightships. The results from Skagens-Rev are as to be expected.

ad. 3: The heat exchange between the water sample and the surrounding air takes place by way of evaporation and the convective heat transmission. According to the results of the psychrometer theory, the total heat exchange is proportional to the difference

Folgende Faktoren können an einer Beeinflussung der gemessenen Temperaturen beteiligt sein.

- 1. Die unterschiedliche Durchmischung der Oberflächenschicht bei fahrenden Schiffen und bei verankerten Feuerschiffen.
- 2. Verstrahlung der Wasserprobe besonders durch Sonnenstrahlung.
- 3. Wärmeaustausch der Wasserprobe mit der umgebenden Luft.
- 4. Ungenügende Anpassung der Thermometer.

Zu 1: Die Angaben von fahrenden Schiffen brauchen nicht notwendig identisch zu sein mit den Angaben von verankerten Schiffen, da bei fahrenden Schiffen die Temperatur in stärker durchwirbeltem Deckschichtwasser gemessen wird als bei verankerten. Diese Tatsache könnte vielleicht mitsprechen, wenn Handelsschiffsbeobachtungen im Sommer zu niedrige Monatsmittel ergeben. Die starken positiven Abweichungen im Winter, wie sie Abb. 2 zeigt, können sie aber nicht erklären. Da alle drei Feuerschiffe in Gebieten mit relativ hohen Stromgeschwindigkeiten liegen – das gilt besonders für Skagens-Rev mit 1 sm/Std im Mittel – kann diesem Anteil keine wesentliche Bedeutung beigegeben werden.

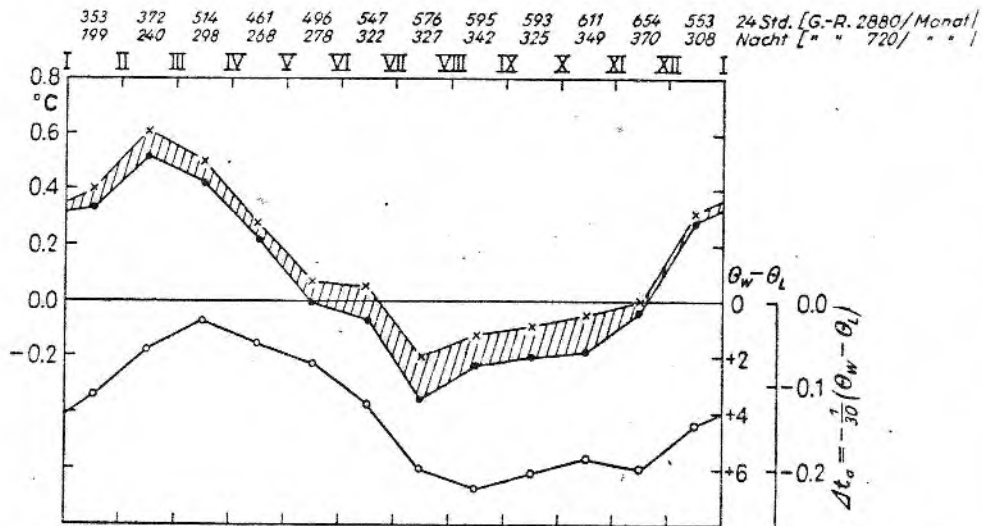


Abb.3: Differenz der Wassertemperaturen Gradfeld-Feuerschiff

- x— Tagesmittel
- o— Nachtmittel (20^h, 0^h, 4^h) } 54° - 55° N, 12° - 13° E, - Gedser-Rev F.S.(1906-13)
- o— Differenz der Äquivalenttemperaturen $\theta_w - \theta_l$ Gedser-Rev F.S.(1906-13)

Zu 2: Der Einfluß der Verstrahlung auf die Gesamtmonatsmittel zeigt sich deutlich, wenn man die Differenzen der Wassertemperaturen, die auf Gesamttagesmittel beruhen, den Differenzen gegenüberstellt, die auf Handelsschiffen und Feuerschiffen ausschließlich auf Nachtbeobachtungen (20^h, 0^h, 4^h) fußen. Eine solche Gegenüberstellung für das Gebiet von Gedser-Rev enthält die Abb. 3. Die Zahl der Beobachtungen ist am oberen Rande entsprechend der Abb. 2 angeführt. Es ergibt sich ein jährlicher Gang im Verstrahlungseinfluß der Tagesmittel von der ausgeglichenen Form $F_s = 0,08^\circ + 0,04^\circ \sin(294^\circ + \alpha)$, wobei der Phasenwinkel α vom 1. Januar gezählt wird. Der Effekt der Verstrahlung auf die Tagesmittel ist nach diesem Ergebnis verhältnismäßig gering und wirkt sich verschärfend auf die Unterschiede der gemessenen Temperaturen von Handels- und Feuerschiffen aus. Die Ergebnisse von Skagens-Rev lauten entsprechend.

Zu 3: Der Wärmeaustausch der Wasserprobe mit der umgebenden Luft erfolgt auf dem Wege der Verdunstung und der konvektiven Wärmeübertragung. Nach den Ergebnissen der Psychrometertheorie ist der totale Wärmeaustausch proportional der Differenz der Äquivalent-

p. 319

of the equivalent temperatures, with the ventilation and the specific heat of the air being absorbed in the proportionality factor. R. B. M o n t g o m e r y (1948) arrived at a similar result for the total heat exchange of moist surfaces in a thermodynamically open system: $W_z = B \cdot c_p (\theta_w - \theta_L)$, wherein θ_w is determined by the water temperature and the saturation pressure of the water vapour at that temperature, and θ_L by the air temperature and the observed vapour pressure; c_p is the specific heat of the dry air and B contains the exchange coefficient. Even if one considers that the ventilation of the scoop of a moving ship is approximately constant throughout the year, B cannot be explicitly expressed. Perhaps it is possible to make statements about it by means of a series of tests under the observation conditions of the merchant service. As in summer the 4th factor may be considered insignificant with regard to this error, the un-irradiated diurnal mean of temperature must be affected mainly by the heat discharged by the water sample. On this assumption, there is a temperature error for the diurnal mean of $F_A = 0.033(\theta_w - \theta_L)$ for the degree square with Gedser-Rev as well as the Skagens -Rev. This statement for the temperature error by evaporation and convective heat discharge contains two conditions, which we shall repeat:

1. the consistency of ventilation throughout the year and 2. the decline of errors other than the heat exchange with the surrounding air at the observed summer temperatures of c. 16° , when radiation is eliminated. The annual course of the difference of the equivalent temperatures in Fig. 3 for Gedser-Rev shows, that on average a loss of heat by the water samples must be anticipated in every month and that in winter this drops to 10% of the summer values. Even in the relatively high differences of the equivalent temperatures which occur under the influence of the proximity of the mainland in the southern Baltic at Gedser-Rev and in the Skagerrak at Skagens-Rev, the errors remain at a maximum of -0.2° in summer. The considerable positive

deviations of the monthly mean according to the merchant shipping observations in winter can however never be explained by the total heat exchange of the water sample, as it merely contributes towards a heat loss in the examples quoted.

Fig. 4: Error of the surface temperatures from moving ships as a result of inadequate thermometer adaptation. (after elimination of the error by heat exchange of the water sample and radiation)

- degree square around Gedser-Rev L.S., + degree square around Skagens-Rev L.S.

ad 4. Part 4 appears to have a decisive influence on the positive deviations of the merchant navy observations in winter. If one eliminates the effect of radiation and the errors by heat exchange, there remains a residual error, which may be considered to be the effect of the inadequate adaptation of the thermometers. If one applies this residual error F_v as a function of the measured air temperature t_L , the error will increase with a drop in the air temperature. As Fig. 4 demonstrates, approximately the same relationship results for the two lightships Skagens-Rev and Gedser-Rev. For $t_L < 10^\circ$ it can be expressed approximately by the formula

$$F_v = 0.7 \left(1 - \frac{t_L}{10}\right)^{3/2}$$

p. 320

This fairly strong error at low temperatures may become understandable if one considers the method of observation on board ship. Owing to the risk of damage, the water thermometer on merchant ships has a wooden mantle and consequently has a considerable heat capacity. The thermometers are usually kept in the wheel house or at least in a protected place on the bridge and are therefore well pre-heated compared with the low temperatures of the scooped water sample. To this must be added the fact that in cold weather it is unlikely that this pre-heated thermometer will be allowed to adjust to the temperature of the water sample.

temperaturen, wobei in den Proportionalitätsfaktor die Ventilation und die spezifische Wärme der Luft eingeht. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt R. B. Montgomery (1948) für den totalen Wärmeaustausch feuchter Flächen in einem thermodynamisch offenen System: $W_z = B \cdot c_p (\theta_w - \theta_L)$, wobei θ_w bestimmt ist durch die Wassertemperatur und den Sättigungsdruck des Wasserdampfes bei dieser Temperatur, θ_L durch die Lufttemperatur und den beobachteten Dampfdruck; c_p ist die spezifische Wärme der trockenen Luft, und B enthält den Austauschkoefizienten. Auch wenn man bei fahrenden Schiffen die Ventilation des Schöpfgefäßes als angenähert konstant über das ganze Jahr ansieht, ist B explizit nicht auszudrücken. Vielleicht lassen sich durch Versuchsreihen unter den Beobachtungsbedingungen der Handelsschiffahrt Angaben darüber machen. Da im Sommer der 4. Anteil bei der Verfälschung als unbedeutend angesehen werden kann, müßten die unverstrahlten Tagesmittel der Temperatur vor allem von der Wärmeabgabe der Wasserprobe beeinflusst sein. Unter dieser Voraussetzung ergibt sich für das Gradfeld mit Gedser-Rev ebenso wie bei Skagens-Rev ein Temperaturfehler des Tagesmittels von $F_A = 0,033 (\theta_w - \theta_L)$. In diesem Ausdruck für die Temperaturverfälschung durch Verdunstung und konvektive Wärmeabgabe sind zwei Voraussetzungen enthalten, die noch einmal genannt seien: 1. die Konstanz der Ventilation im Laufe des Jahres und 2. das Zurücktreten anderer Verfälschungen als die des Wärmeaustauschs mit der umgebenden Luft bei den angetroffenen Sommertemperaturen von etwa 16° , wenn die Verstrahlung eliminiert ist. Der Jahresgang der Differenz der Äquivalenttemperaturen in Abb. 3 zeigt für Gedser-Rev, daß in jedem Monat im Mittel mit Wärmeverlust der Wasserproben zu rechnen ist, der im Winter bis auf 10% der Sommerwerte absinkt. Selbst bei den verhältnismäßig hohen Differenzen der Äquivalenttemperaturen, wie sie unter den Einflüssen der Festlandsnähe in der südlichen Ostsee bei Gedser-Rev und im Skagerrak bei Skagens-Rev eintreten, bleiben die Verfälschungen maximal bei $-0,2^\circ$ im Sommer. Die beachtlichen positiven Abweichungen der Monatsmittel nach den Handelsschiffsbeobachtungen im Winter vermag aber der totale Wärmeaustausch der Wasserprobe niemals zu erklären, da er immer nur zu einem Wärmeverlust in den angeführten Beispielen beiträgt.

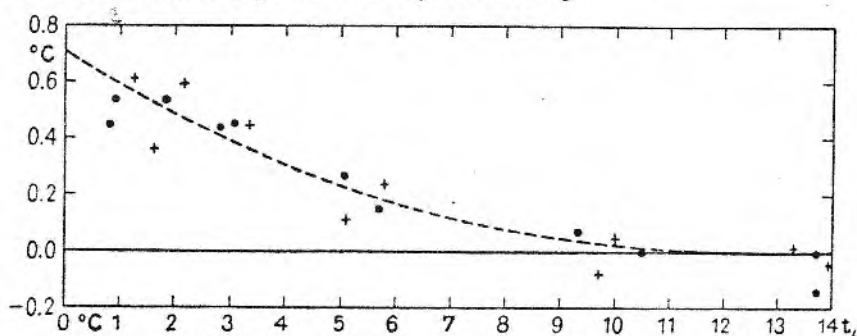


Abb. 4: Verfälschungen der Oberflächentemperaturen von fahrenden Schiffen durch ungenügende Anpassung der Thermometer
 (n. Eliminierung d. Verfälschung durch Wärmeaustausch d. Wasserprobe u. Verstrahlung)
 • Gradfeld um Gedser-Rev F. S., + Gradfeld um Skagens-Rev F. S.

Zu 4: Für die starken positiven Abweichungen der Handelsschiffsbeobachtungen im Winter scheint der 4. Anteil entscheidend mitzusprechen. Eliminiert man die Einflüsse der Verstrahlung und der Verfälschung durch Wärmeaustausch, dann verbleibt ein Restfehler, der als Wirkung einer ungenügenden Anpassung der Thermometer angesehen werden kann. Trägt man diesen Restfehler F_V als Funktion der gemessenen Lufttemperatur t_L auf, so zeigt sich eine Zunahme des Fehlers mit abnehmender Lufttemperatur. Bei beiden Feuerschiffen Skagens-Rev und Gedser-Rev ergibt sich annähernd die gleiche Beziehung, wie aus Abb. 4 zu ersehen ist.

Sie läßt sich für $t_L < 10^\circ$ näherungsweise durch den Ausdruck darstellen: $F_V = 0,7 \left(1 - \frac{t_L}{10}\right)^{3/2}$.

Diese verhältnismäßig starke Verfälschung bei niedrigen Temperaturen wird vielleicht verständlich, wenn man die Beobachtungsmethode an Bord berücksichtigt. Das Wasserthermometer für die Handelsschiffe besitzt zur Verminderung der Bruchgefahr eine hölzerne Verkleidung und weist daher insgesamt eine beachtliche Wärmekapazität auf. Die Thermometer pflegen vornehmlich im Ruderhaus oder mindestens geschützt auf der Brücke aufbewahrt zu werden und sind damit gegenüber geringen Wassertemperaturen der geschöpften Probe erheblich vorgewärmt. Hinzu kommt, daß wahrscheinlich in der kalten Jahreszeit die völlige Anpassung dieser vorgewärmten Thermometer an die Temperatur der Wasserprobe vom Beobachter nicht abgewartet wird. Diese Tatsachen, die im einzelnen nachträglich unkontrollierbar bleiben, machen es verständlich, daß Handelsschiffsbeobachtungen bei niedrigen Temperaturen zu hohe Werte in der angegebenen Weise erbringen.

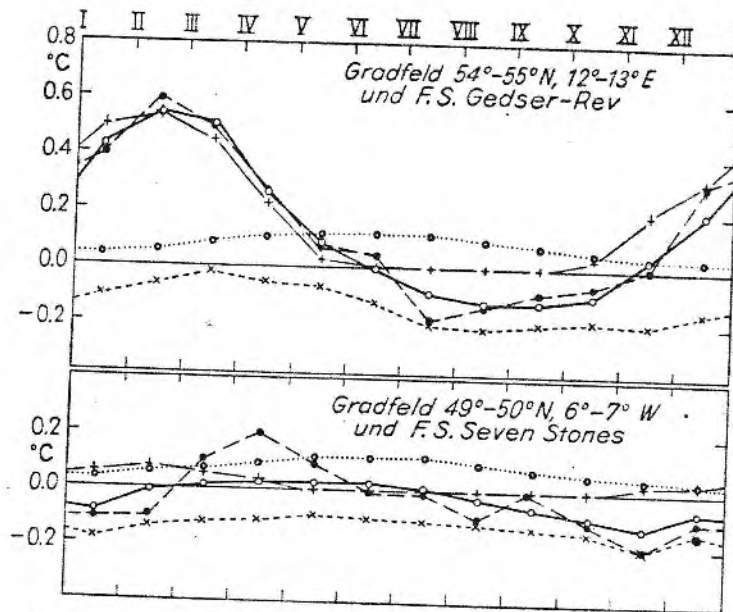


Abb. 5: Anteile an der Verfälschung der Oberflächentemperaturen (Tagesmittel) nach fahrenden Schiffen (1906-13)

- x a. Temperaturänderung durch Wärmeaustausch der Wasserprobe
-o b. Temperaturänderung durch Verstrahlung
- + c. Temperaturänderung durch ungenügende Anpassung der Thermometer
- o d. a+b+c = Gesamtverfälschung
- x e. Differenz t_w Gradfeld - t_w Feuerschiff (Tagesmittel)

Der jährliche Gang der drei Komponenten der Verfälschung, nämlich Verstrahlung, totaler Wärmeaustausch der Wasserprobe sowie ungenügende Anpassung des Thermometers sind in Abb. 5 für Gedser-Rev im einzelnen und zusammengesetzt als Korrekturen dargestellt. Für das Feuerschiff Seven Stones wurden diese Korrekturen gesondert nach den aus Gedser-Rev und Skagens-Rev bestimmten Grundwerten berechnet. Sie führen zu einer befriedigenden Übereinstimmung mit den mittleren Abweichungen zwischen Handelsschiffs- und Feuerschiffsbeobachtungen. Wenn die Abweichungen um die mittlere Gesamtverfälschung streuen, so ist dabei zu beachten, daß die Feuerschiffsbeobachtungen mit Abständen von 5-7 Tagen keine derartigen sicheren Mittelwerte liefern wie im Falle der dänischen Feuerschiffe. Die Beobachtungsdichte auf den englischen Feuerschiffen verhält sich zu der auf den dänischen im betrachteten Zeitraum 1906-13 wie 1 : 50.

These facts, which cannot be individually checked at a later date, provide a reason for observations, carried out on merchant ships in the manner stated, providing too high a value at low temperatures.

Fig. 5: Shares in the errors of surface temperatures (diurnal mean) on moving ships (1906-13).

- x a. Temperature change by heat exchange of the water sample
 -o b. temperature change by radiation
 - + c. temperature change by inadequate adaptation of the thermometers.
 - • d. a+b+c total error
 - • Difference t_w degree square - t_w lightship (diurnal mean).
-

The annual cycle of the three components of the error namely radiation, total heat exchange of the water sample and the inadequate adaptation of the thermometer are shown in Fig. 5 for the Gedser-Rev, both singly and together as corrections. For the Seven Stones lightship these corrections were calculated separately on the strength of the basic values determined at Gedser-Rev and Skagens-Rev. They result in a satisfactory conformity with the mean deviations between the observations on merchant ships and on lightships. If the deviations are dispersed around the mean total error it should be remembered that the observations on the lightships were made at intervals of 5 - 7 days and cannot provide mean values as certain as those from the Danish lightships. The ratio of observations on the British lightships compared with those on the Danish ones was 1 : 50 during the period 1906 - 13.

p. 321

Systematic errors in the air temperature data. The fact that the monthly mean of the air temperature based on observations on merchant ships also contains substantial systematic errors is demonstrated by Fig. 6, the lay-out of which corresponds to Fig. 2. The accurate measurement of the air temperature on board ship is faced with even greater difficulties of principle than the measurement of the water temperature.

Fig. 6: Differences of air temperature degree square-lightship
(diurnal mean).

The ease with which the air temperature can be affected by the body of the ship has been dealt with in detail by E. K u h l b r o d t on the basis of the "Meteor" observations (1936a). On the strength of these results and experiences on other ships one must assume that the observations made on the Danish lightships, which are to serve for comparison, are not altogether free of systematic errors either.

Air temperatures on board ship are invariably quoted too high and in general the less trouble is taken to ensure an accurate measurement, the higher they get. In view of these experiences it is not surprising if the merchant navy observations in Fig. 6 provide monthly means that are around $0.2 - 0.9^{\circ}$ higher than the ones based on the observations on lightships. This is partly due to the radiation on the thermometers from the sun and the sky. This is proved by the juxtaposition of the

Fig. 7: Difference of air temperatures degree square-lightship
-- x -- x mean during daytime
_____ . mean at night.

differences in the air temperatures in total means for night time and daytime illustrated in Fig. 7. Radiation makes the total mean during the daytime appear on average 0.1° too high. According to this result the main share of the error must be attributed to the effect of the ship, which, in this example for the Gedser-Rev area, makes an annual average of $+0.5^{\circ}$. In fact it is probably slightly larger if the observations on the lightships themselves are in error. The overall mean of $+0.5^{\circ}$ for the normal ships' observation conforms well with

Systematische Fehler in den Angaben der Lufttemperatur. Daß auch die Monatsmittel der Lufttemperatur auf Grund von Handelsschiffsbeobachtungen beachtliche systematische Fehler enthalten, verdeutlicht die Abb. 6, die in ihrer Anlage der Abb. 2 entspricht. Die einwandfreie Messung der Lufttemperatur an Bord stößt auf noch größere prinzipielle Schwierig-

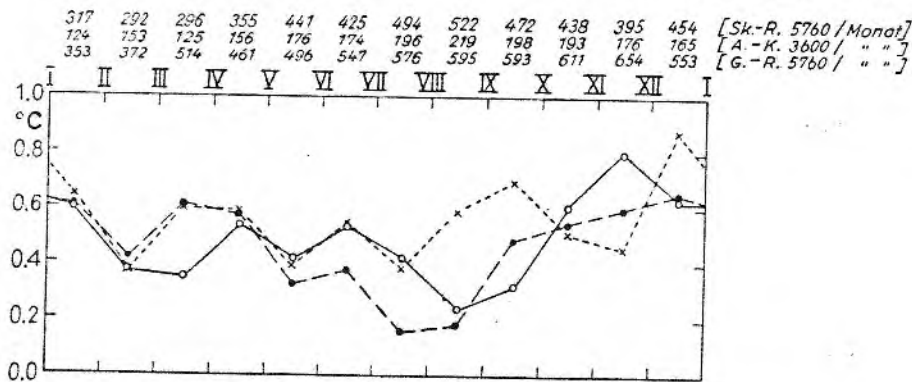


Abb. 6: Differenz der Lufttemperaturen Gradfeld-Feuerschiff (Tagesmittel)

- 57°-58° N, 10°-11° E - Skagens-Rev F.S. (1906-13)
- 56°-57° N, 11°-12° E - Anholt-Knob F.S. (1909-13)
- x--- 54°-55° N, 12°-13° E - Gedser-Rev F.S. (1906-13)

keiten als die der Wassertemperatur. Die leichte Beeinflussbarkeit der Lufttemperatur durch den Schiffskörper wurde von E. Kuhlbrodt (1936a) an Hand der „Meteor“-Beobachtungen eingehend diskutiert. Nach diesen Ergebnissen und den Erfahrungen auf anderen Schiffen muß man annehmen, daß die dänischen Feuerschiffsbeobachtungen, die die Vergleichsbasis abgeben sollen, auch nicht völlig frei von systematischen Fehlern sind.

Lufttemperaturen werden an Bord durchweg zu hoch angegeben, und zwar im allgemeinen um so höher, je weniger Mühe auf eine korrekte Messung verwandt wird. Aus dieser allgemeinen Erfahrung ist es verständlich, wenn die Handelsschiffsbeobachtungen nach Abb. 6 um 0,2-0,9° höhere Monatsmittel ergeben als die Feuerschiffsbeobachtungen. Zu einem geringen Teil ist die

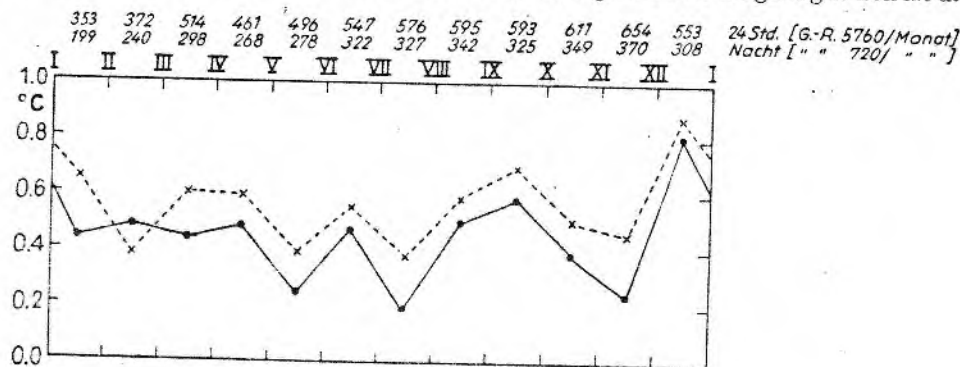


Abb. 7: Differenz der Lufttemperaturen Gradfeld-Feuerschiff

- x--- Tagesmittel
- Nachtmittel (20°, 0°, 4°) } 54°-55° N, 12°-13° E - Gedser-Rev F.S. (1906-13)

Verstrahlung der Thermometer durch Sonnen- und Himmelsstrahlung daran beteiligt. Dies weist die Gegenüberstellung der Differenz der Lufttemperaturen nach Gesamttagesmitteln und Nachtmitteln, die in Abb. 7 vorgenommen ist. Die Verstrahlung läßt die Gesamttagesmittel durchschnittlich um 0,1° zu hoch erscheinen. Nach diesem Ergebnis muß der Haupt-

anteil der Verfälschung auf den Schiffseinfluß zurückgeführt werden, der im vorliegenden Beispiel für das Gebiet von Gedser-Rev $+ 0,5^\circ$ im Jahresdurchschnitt ausmacht. In Wirklichkeit ist er vielleicht noch etwas größer, wenn die Feuerschiffsbeobachtungen selbst verfälscht sein sollten. Das Gesamtmittel der Abweichungen der normalen Schiffsbeobachtungen von $+ 0,5^\circ$ steht in guter Übereinstimmung mit dem Gesamtmeßfehler, den E. Kuhlbrodt (1936a) für die höheren Breiten mit $+ 0,4^\circ$ angibt. Ein jährlicher Gang der Abweichungen ist angedeutet, besonders bei Skagens-Rev (Abb. 6).

Auswirkungen der systematischen Temperaturfehler auf die Bestimmung der Wärmeumsätze. Die systematischen Fehler in den Temperaturangaben auf dem Meere spielen bei den großräumigen klimatischen und ozeanographischen Betrachtungen, zu denen sie bisher vor allem herangezogen wurden, eine untergeordnete Rolle. Die Ergebnisse der Berechnungen von Wärmeumsätzen zwischen Ozean und Atmosphäre hingegen, wie sie in neuerer Zeit mehrfach angestellt wurden, können von diesen Fehlern einschneidend beeinflusst werden, da die Temperaturdifferenzen Wasser minus Luft eingehen. Bereits in den angegebenen Beispielen, die unter dem Einfluß der Festlandsnähe sehr hohe Temperaturdifferenzen Wasser minus Luft mit einem starken jährlichen Gange aufweisen, bilden die systematischen Fehler einen erheb-

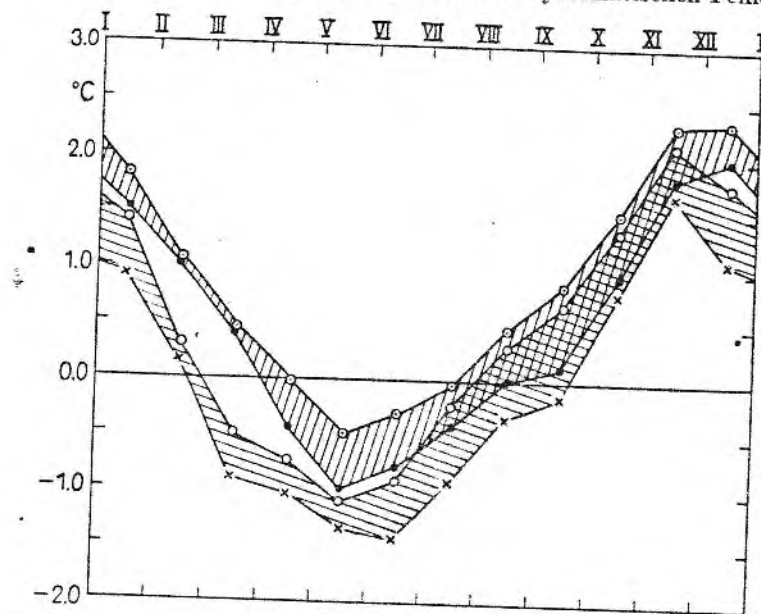


Abb. 8: Temperaturunterschied Wasser - Luft (1906-13)
nach Beobachtungen im Gradfeld und vom Feuerschiff (Tagesmittel)

—•— 57°-58° N, 10°-11° E	—x— 54°-55° N, 12°-13° E
—○— F.S. Skagens-Rev	—□— F.S. Gedser-Rev

lichen Prozentsatz der Unterschiede selbst. In Abb. 8 sind die Temperaturdifferenzen gegenübergestellt, erstens auf Grund der Messungen von Handelsschiffen, zweitens auf Grund der Messungen von Feuerschiffen. Bei ozeanischen Verhältnissen sind die Temperaturdifferenzen Wasser minus Luft in den meisten Fällen sehr viel geringer, ohne daß die systematischen Fehler schwächer werden. Damit können die aktuellen Temperaturdifferenzen durchaus von derselben Größe wie der systematische Fehler werden.

Um eine Vorstellung über den Einfluß der systematischen Temperaturfehler auf die Ergebnisse der Wärmeumsatzbestimmung zu vermitteln, wurde für die beiden Gebiete von Gedser-Rev und Skagens-Rev der Wärmeumsatz der Verdunstung V und des konvektiven Wärmeaustauschs L berechnet. Die Grundlage für diese Bestimmung bildet die Sverdrupsche

the total measurement error which E. K u h l b r o d t (1936a) quotes as $+0.4^{\circ}$ for the higher latitudes. An annual cycle of deviations is indicated, especially in the case of Skagens-Rev. (Fig. 6).

The effect of the systematic temperature errors on the determination of the heat exchanges. In the context of the large-scale oceanographic and climatic considerations for which they have hitherto been mainly used, the systematic errors in the ocean temperature data have been of only subordinate importance. The results of the calculations of the heat exchanges between ocean and atmosphere of the type frequently made in recent times, can on the other hand be decisively affected by these errors, as the temperature differences water minus air are recorded. Even in the examples already quoted, which show a very high temperature difference water minus air under the effect of the proximity of the mainland, the systematic errors form a considerable percentage of the differences themselves. The temperature

Fig. 8: Temperature difference water - air (1906-13)
according to the observations in the degree square and
on the lightship (diurnal mean).

differences are compared in Fig. 8, firstly on the basis of the measurements on merchant ships and secondly on the basis of measurements on lightships. In conditions prevailing on the oceans the temperature differences water minus air are usually much less, although the systematic errors do not diminish. As a result the actual temperature differences may well become as great as those of the systematic errors.

In order to obtain some idea of the effect of the systematic temperature errors on the results of the heat exchange calculations, the heat exchange by evaporation V and by convection L were calculated for the two areas of

p. 323

Gedser-Rev and Skagens-Rev. The basis for these calculations was provided by the Sverdrup evaporation formula and by the expression for the convective term L , as quoted by F. Albrecht (1940) in conformity with the "Bowen ratio" used by W. C. Jacobs (1942). The observation material used were the relative air humidity from the Danish coastal station Bogø for Gedser-Rev, Skagen for Skagens-Rev and the wind observations by the two lightships in 1906-13. The heat exchanges were then calculated in one case for the temperature observations by the lightships and in another for the temperature observations by the merchant ships in the single-degree square. The difference between the two heat exchanges for both fields in its annual cycle is shown in Fig. 9. For the sake of comparison the annual course of the turnover in evaporation heat on the lightship Gedser-Rev is included in Fig. 9. In some, the deviations of the heat exchanges $V + L$ resulting from the systematic temperature errors amount to 50% of the evaporation heat turnover and in Gedser-Rev they amount to an annual mean of 26 % of V .

Fig. 9: Deviations between the calculated heat transmissions $V + L$ according to the observations on lightships and in the degree square 1906-13.

———o for comparison: evaporation heat according to LS Gedser-Rev.

If one considers that, under conditions prevailing on the ocean, the effect of the systematic error will occasionally rise, then this comparison - which only accounts for the errors in two elements, namely water and air temperatures - provides sufficient reason for taking into account the large error limits in the quantitative results of the calculation of heat exchanges.

Verdunstungsformel und der Ausdruck für das konvektive Glied L , wie ihn F. Albrecht (1940) in Übereinstimmung mit der von W. C. Jacobs (1942) verwendeten „Bowen ratio“ angibt. Als Beobachtungsdaten wurden herangezogen die relative Feuchte der dänischen Küstenstation Bogö für Gedser-Rev, Skagen für Skagens-Rev sowie die Windbeobachtungen der beiden Feuerschiffe 1906-13. Die Wärmeumsätze wurden sodann einmal für die Temperaturbeobachtungen der Feuerschiffe, das andere Mal für die Temperaturbeobachtungen der Handelsschiffe im Eingradfeld berechnet. Die Differenz der beiden Wärmeumsätze für beide Gebiete ist in ihrem jährlichen Ablauf in Abb. 9 dargestellt. Als Vergleich ist der jährliche Gang des Umsatzes an Verdunstungswärme auf dem Feuerschiff Gedser-Rev in die Abb. 9 mit aufgenommen. Die Abweichungen der Wärmeumsätze $V + L$ durch die systematischen Temperaturfehler erreichen in einzelnen Monaten bis 50% des Verdunstungswärmeumsatzes und machen im Jahresmittel bei Gedser-Rev 26% von V aus.

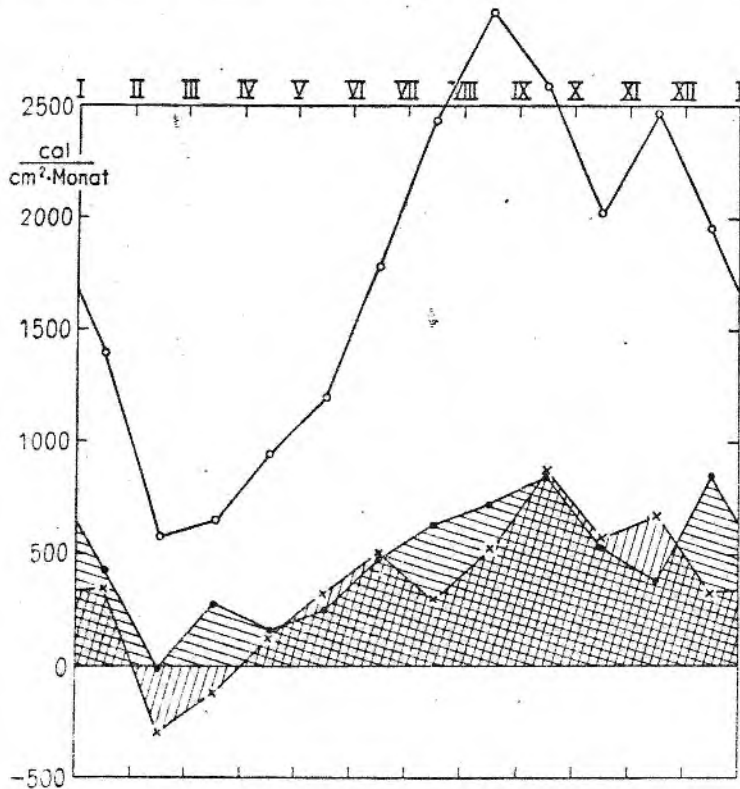


Abb. 9: Abweichungen zwischen den errechneten Wärmeübertragungen $V+L$ nach Feuerschiffs- und Gradfeldbeobachtungen 1906-13

—○— F.S. Gedser-Rev - 54°-55° N, 12°-13° E, —×— F.S. Skagens-Rev - 57°-58° N, 10°-11° E,
 —●— zum Vergleich: Verdunstungswärme nach F.S. Gedser-Rev

Wenn man beachtet, daß unter ozeanischen Verhältnissen der Einfluß der systematischen Temperaturfehler auf die berechneten Wärmeumsätze teilweise noch ansteigen wird, dann gibt diese vergleichende Betrachtung, die die Fehler von nur zwei Elementen - der Wasser- und Lufttemperatur - berücksichtigt, Anlaß genug zu dem Hinweis, die großen Fehlergrenzen bei quantitativen Ergebnissen der Wärmeumsatzbestimmung zu beachten. Diese Folgerung deckt sich im Grundsätzlichen mit der von G. Wüst (1950), die dort hauptsächlich Feuchte und Niederschlag auf dem Meere als Glieder des Wasserkreislaufs betrifft: Die Verbesserung der Beobachtungsmethoden, wie sie bereits eingeleitet ist, stellt den einen Weg dar, der für die

p. 324

The improvement in the methods of observation which is already being introduced, represents the one way which promises a more reliable basis for the determination of the heat exchange and the circulation of water for the future. For the present, the correction of the data transmitted from the past remains the only means of making use of the rich treasure of available ships' observations for even greater demands.

Literature

Schrifttum

- F. Albrecht, 1940, Untersuchungen über den Wärmehaushalt der Erdoberfläche in verschiedenen Klimagebieten. Reichsamt f. Wetterd. Wiss. Abh. 8, Nr. 2. Berlin.
- F. Albrecht, 1949, Über die Wärme- und Wasserbilanz der Erde. Ann. Meteor. 2, 129.
- O. M. Ashford, 1948, A new bucket for measurement of sea surface temperature. Quart. Journ. Roy. Meteorol. Soc. 74, 99.
- C. F. Brooks, 1926, Observing water-surface temperatures at sea. Monthly Weather Rev. 54.
- C. F. Brooks, 1928, Reliability of different methods of taking sea-surface temperatures. J. Wash. Acad. Sci. 18, No. 20. Baltimore.
- C. F. Brooks, 1932, Sea temperatures by bucket on express liners. Trans. Amer. Geophys. Un.
- Danske Meteorologiske Institut, 1911, 1916, Hourly mean-temperatures of the air by months during the years 1906-10 at Danish lightvessels. Ebenso 1911-15. Mean-temperatures of the surface-water by every second hour by months during the years 1906-10 at Danish lightvessels. Ebenso 1911-15. Naut. Meteorol. Aarb. 1910, 1915, 146. Kopenhagen.
- W. C. Jacobs, 1942, On the energy exchange between sea and atmosphere. J. Marine Research 5, 37.
- W. C. Jacobs, 1943, Sources of atmosphere heat and moisture over the North Pacific and North Atlantic Oceans. Ann. N. Y. Acad. Sci. 44, 19.
- W. C. Jacobs, 1949, The energy acquired by the atmosphere over the oceans through condensation and through heating from the sea surface. Journ. Meteorol. 6, 266.
- E. Kuhlbrodt, 1936a, Kritik der Lufttemperatur-Bestimmung auf See: Größe der Temperaturdifferenz Wasser-Luft auf dem Atlantischen Ozean. Ann. Hydrogr. u. marit. Meteorol. 64, 259.
- E. Kuhlbrodt, 1936b, Schleuderthermometer für Bordgebrauch. Ann. Hydrogr. u. marit. Meteorol. 64, 57.
- J. R. Lumby, 1935, Salinity and temperature of the English Channel. Fish. Invest. Ser. II. 14, Nr. 3. London.
- R. B. Montgomery, 1948, Vertical eddy flux of heat in the atmosphere. J. Meteorology 5, 265.
- P. M. van Riel, 1928, The influence of sea disturbance on surface temperature (Kon. Nederl. Meteorol. Inst. Meded. en Verh. 30, No. 102).
- A. Schumacher, 1938, Noch einmal der Oberflächenschöpfer nach O. Sund. Ann. Hydrogr. u. marit. Meteorol. 66, 590.
- F. Stupart u. a., 1929, Ocean surface water temperatures. Methods of measuring and preliminary results. Bull. Nat. Res. Council No. 68. Washington.
- O. Sund, 1931, A new speed surface sampler. J. Cons. perm. int. Explorat. Mer 6, 449.
- H. U. Sverdrup, 1936, Das maritime Verdunstungsproblem. Ann. Hydrogr. u. marit. Meteorol. 64, 41.
- E. Wahl, 1949, Temperaturmessungen in der Nordsee 1948. Ann. Meteorol. 2, 65.
- E. Wahl, 1950, Strahlungseinflüsse bei der Wassertemperaturmessung an Bord von Schiffen. Ann. Meteorol. 3, 92.
- G. Wüst, 1950, Wasserdampf und Niederschlag auf dem Meere als Glieder des Wasserkreislaufs. Dtsch. Hydrogr. Z. 3, 111.