

Strahlungseinflüsse bei der Wassertemperaturmessung an Bord von Schiffen

(Ein Beitrag zur Fehlersystematik von Schiffsbeobachtungen)

von Eberhard Wahl, Hamburg

DK 551.526.6 : 551.501

Zusammenfassung: Aus den normalen Schiffsbeobachtungen werden durch die Untersuchung des „gemessenen Tagesganges“ der Wassertemperatur die systematischen Strahlungsfehler dieses Elements abgeleitet und deren Abhängigkeit von der Tages- und Jahreszeit sowie der Bedeckung festgelegt. Die Einwirkung der Fehler in den Einzelmessungen auf die Ergebnisse klimatologischer Mittelwerte wird diskutiert und die Fälschungsbeträge werden überschlagsweise bestimmt. Die Fehlerverteilung zeigt den Vorteil des hier benutzten Aufbereitungsverfahrens, die verstrahlten Werte zu streichen, und bietet Anhaltspunkte für die Systematik derartiger Vorschriften.

Summary: The systematic radiation error of sea-surface temperature is derived from normal ships' observations by examination of the „diurnal variation observed“, and its relation to season, day-time, and cloud amount is determined. The effect of these errors in the results of climatological means is discussed and the amounts of falsification are calculated roughly. The distribution of errors shows the advantage of the evaluation procedure applied here, with respect to the cancellation of the values affected by radiation, and presents view points for the systematics of such procedures.

I. An einer bestimmten Stelle des Meeres und zu einer bestimmten Zeit besitzt die Lufttemperatur wie auch die Temperatur des Wassers in der Meeresoberfläche einen wohl definierten Wert. Sollen diese Größen jedoch durch Messung bestimmt werden, dann treten erhebliche Schwierigkeiten auf, die im wesentlichen dadurch bedingt sind, daß der Beobachter sich an Bord eines Schiffes befindet, welches in verhältnismäßig großem und oft unkontrollierbarem Umfange das Feld der „wahren Temperaturverteilung“ stört. Die Verfälschung durch das „Eigenklima“ des Schiffes, dem sich der Beobachter kaum entziehen kann, hängt aber nicht nur von der Größe und Bauart des Schiffes, der Lage der Meßstelle und der Art der benutzten Instrumente ab, sondern auch weitgehend von den verschiedenen Gegebenheiten des momentanen Wetters und auch der Eigenfahrt des Schiffes gegenüber der Hydro- und Atmosphäre. Dadurch wird eine einzelne Messung dem wahren Wert nur mehr oder weniger nahekommen: der Fehler entsteht durch die kombinierte Wirkung von zufälligen Meßfehlern und derartigen systematischen Verfälschungen durch das Temperatur-Eigenfeld des Schiffes.

Einen wesentlichen Anteil an diesem schiffseigenen Temperaturfeld werden diejenigen Einflüsse haben, welche infolge der Erwärmung des Schiffskörpers durch die Einstrahlung und ggf. die Eigenheizung entstehen. Welche Beträge die Strahlungserwärmung erreichen kann, zeigen Messungen von WAGNER (1), der feststellte, daß mittags in den Tropen die Decksplanken bei direkter Sonnenbestrahlung Übertemperaturen bis 40° über der wahren Lufttemperatur aufweisen, und daß selbst noch 1 m oberhalb einer mittschiffs liegenden Luke Lufttemperaturen gemessen wurden, die mehr als 2° zu hoch waren. In den Schiffsräumen sind ebenfalls die Übertemperaturen erheblich; WAGNER fand z.B. bei einer Decksplanken-Übertemperatur von 35° noch eine um 12° zu hohe Temperatur der Luft in dem darunter liegenden Raum. Schon allein das Aufsuchen eines etwas windgeschützten Platzes an Deck kann die Messung der Lufttemperatur gegenüber den wahren Werten verfälschen; so fand Verfasser bei einem Feuerschiffsaufenthalt im Sommer 1948 in der Nordsee, daß hierdurch Unterschiede in den Messungen bis zu 0,8° entstanden. Aber auch bei der Messung der Wassertemperatur können derartige Verfälschungen - wenn auch vielleicht nicht in diesem Ausmaße - entstehen. Im allgemeinen geschieht ja diese Messung in folgender Art: Mittels einer Pütz aus Segeltuch oder Zinkblech wird eine Wasserprobe an Deck geholt und dann mittels Thermometer die Temperatur dieser Probe bestimmt. Abgesehen davon, daß mit dieser Methode nur die mittlere Temperatur einer etwa 1 m dicken Schicht bestimmt wird, daß aber nicht die wirkliche Temperatur der Oberfläche erfaßt werden kann - und es besteht die begründete Vermutung, daß gerade für die unmittelbare Wechselwirkung zwischen Wasser und Luft diese Temperatur maßgebend ist, und daß sie selbst anders ist als die oben bestimmte (vgl. hierzu (2)) - kann man auch annehmen, daß z.B. schon durch das Abstellen der Pütz an Deck Verfälschungen der Temperatur der Wasser-

probe entstehen können, die nicht zu vernachlässigen sind, wenn es sich um die Zehntel eines Grades handelt. Und diese Genauigkeit ist sicherlich für viele Zwecke erforderlich. Bei der in manchen Fällen üblichen Meßmethode, die Wassertemperatur an dem Einlaufstutzen des Kondenswassers zu messen oder zu registrieren, müssen andere systematische Verfälschungen angenommen werden, die z.T. abhängig von der momentanen Durchmischung durch Seegang usw., z.T. auch gegeben sind durch die Bauart des Schiffes (Tiefe des Wassereinlasses, Entfernung der Meßstelle von der Bordwand, vorhergehende Erwärmungsmöglichkeiten des Wassers durch Anheizung usw.). Hierüber sind einige Erfahrungen in (3) zu finden.

Derartige Verfälschungen der Einzelwerte werden sich aber auch bei einer Zusammenfassung von vielen Werten zu klimatologischen Mittel- und Häufigkeitswerten nicht völlig herausheben, vor allem dann nicht, wenn die systematischen Einflüsse bei allen Schiffen etwa gleichartig sind. Am Tage wird jedes Schiff durch die Einstrahlung erwärmt, der Fehlerbetrag kann zwar der Größe nach verschieden sein; aber er wird immer positiv sein. Andere systematische Fehler in den Einzelmessungen können sich dagegen bei der Zusammenfassung weitgehend aufheben, sich also dann ebenso wie zufällige Fehler verhalten; z.B. sind alle normalen Instrumentalkorrekturen, die beim Einzelschiff naturgemäß rein systematisch sind (alle Werte sind etwa $0,5^\circ$ zu hoch), bei der Zusammenfassung von Beobachtungen vieler Schiffe als zufällig anzusehen.

Die auch in den Mittelwerten noch systematischen Verfälschungen können grundsätzlich noch in zwei Gruppen unterteilt werden, von denen vor allem die zweite hier betrachtet werden soll. Die erste Gruppe umfaßt alle Einflüsse, die im wesentlichen für alle Schiffe und alle Zeiten konstant sind. Hierzu gehört als wesentlichstes die Wirkung der Heizung des Schiffes durch seine Eigenwärme. Alle Schiffe, vor allem die modernen Dampf- und Motorschiffe, werden durch die Maschine und die vielen Heizkörper im Innern ständig eine gewisse Übertemperatur gegenüber der umgebenden Luft bzw. dem Wasser aufweisen. Aber dieser Einfluß hängt in seiner Größe so sehr von den dem Schiff eigentümlichen Verhältnissen ab und variiert so sehr mit nicht exakt faßbaren Umständen, daß die Erfassung der hierdurch erzeugten systematischen Verfälschungen praktisch nicht möglich ist. Übersichtsweise wird man nur annehmen können, daß die erhaltenen Mittelwerte grundsätzlich um einige Zehntel Grad zu hoch sein werden, und zwar wird der Einfluß der Schiffseigenheizung im Winter etwas stärker sein als im Sommer, in der Nacht (vielleicht) ebenfalls etwas größer als am Tage. Aber die Beträge können bei der Lufttemperatur nur wenig ausmachen, und bei der Wassertemperatur wird man eine derartige Beeinflussung im allgemeinen vernachlässigen können; nach den hier gewonnenen Erfahrungen scheinen diese Einflüsse die Mittelwerte um höchstens $0,2^\circ$ zu erhöhen.

Die zweite Gruppe von Verfälschungen zeigt bei gleichartigem Verhalten auf allen Schiffen eine deutliche Veränderung je nach den äußeren Gegebenheiten, verursacht im wesentlichen durch die Veränderung des schiffseigenen Temperaturfeldes durch die Einstrahlung am Tage und die Ausstrahlung in der Nacht. Da diese Variation der Fehlergröße neben einem täglichen auch einen jährlichen Gang zeigen wird, außerdem aber die Einstrahlungsverhältnisse auch wesentlich von der Bewölkung abhängen werden, kann man die Wirkung dieser Fehler auf die Mittelwerte (etwa Monatsmittel usw.) nur durch die Untersuchung von umfangreichem Beobachtungsmaterial erfassen, und die oben angeführten Ursachen geben auch den Weg an, auf welchem man die Fehlergröße bestimmen kann. Es wird im folgenden untersucht werden, welche (mittleren) systematischen Fehler unter den verschiedenen Verhältnissen in dem Beobachtungsmaterial vorhanden sind und wie sich diese Fehler dann auf die Mittelwerte auswirken.

II. Als Grundmaterial für diese Untersuchung der systematischen Strahlungsfehler, wie sie im folgenden kurz genannt werden sollen, dienen die normalen Schiffsbeobachtungen, wie sie an der ehemaligen Deutschen Seewarte aus den meteorologischen Tagebüchern der deutschen Handelsschiffe herausgezogen worden sind. Diese Beobachtungen sind etwa seit

1940 nach entsprechender kritischer Aufbereitung in Hollerith-Lochkarten überführt worden; z.Zt. sind von den etwa 22 Millionen Beobachtungen, die von allen Meeren im Archiv der Schiffstagebücher enthalten sind, rund 7 Millionen derartig bearbeitet worden, und diese Anzahl steht also zu einer weiteren Bearbeitung mit Hilfe des Hollerith-Verfahrens zur Verfügung. Aus diesem Material wurden alle Wassertemperaturbeobachtungen in 3 Testfeldern im Atlantik ausgewählt, die meteorologisch etwa gleichartige Verhältnisse besitzen; es sind dies die Felder A zwischen 50° und 51° Nord, 0° - 1° West, B zwischen 50° und 51°N, 1° und 2° W und C zwischen 49° und 50°N, 16° und 20° W. In diesen Feldern standen zusammen etwa 46.000 Beobachtungen, verteilt über die Jahre 1904 - 1914 und 1920 - 1939, zur Verfügung. Es ist klar, daß bei einer derartig großen Zahl von Beobachtungen - die zur Ableitung des typischen Verhaltens schon aus Gründen des Fehlerausgleichs der zufälligen Fehler nötig ist - nur eine rein statistische Arbeitsweise unter Heranziehung aller Möglichkeiten der Hollerith-Methode anwendbar ist. Eine eingehende Beschreibung des Verarbeitungsverfahrens ist hier auch nicht möglich; es wird nur, soweit nötig, kurz angedeutet werden, in welcher Weise die Grundlagen für die weiteren Diskussionen erhalten wurden.

Es sei hier noch erwähnt, daß die zuerst beabsichtigte Unterteilung der Untersuchung für die 3 Einzelfelder sich im Laufe der Verarbeitung als unnötig herausstellte, so daß die weiteren Schlüsse aus dem Gesamtmaterial gewonnen werden konnten. Die unterschiedliche Lage der Felder (A und B am Westausgang des Engl. Kanals, C im freien Atlantik) macht bei der Diskussion der hier betrachteten Einflüsse nichts aus; bei der Lufttemperatur müßte man wohl eine derartige Unterteilung vornehmen. Die Errechnung der Abweichungen vom Tages- bzw. Monatsmittel geschah allerdings auch hier für jedes Feld besonders und erst diese Abweichungen wurden dann zusammengefaßt. Damit fallen auch die durch die teilweise unterschiedliche Belegungsstärke der Felder in den verschiedenen Monaten erzeugten Mittelwertsunterschiede weitgehend heraus.

III. Alle Beobachtungen wurden (innerhalb eines Feldes) zunächst nach Monaten sortiert und dann innerhalb jedes Monats eine weitere Unterteilung nach 4 Bedeckungsstufen vorgenommen. Hierbei sind gewählt worden (in Zehntel Gesamtbedeckung) die Stufen: heiter = 0 - 3, halb bedeckt = 4 - 6, bewölkt = 7 - 8 und trübe = 9 - 10. Innerhalb jeder dieser 12 x 4 Gruppen wurde nun der Tagesgang der Wassertemperaturmessungen dadurch errechnet, daß die Temperaturmittelwerte für jeden der 6 Beobachtungstermine 0,4,8,12,16 und 20 Uhr (Bordzeit = näherungsweise mittlere Ortszeit) bestimmt werden. Nun bildet man die jeweiligen Abweichungen vom Tagesmittel (des betreffenden Monats und Feldes) und erhält dann durch Zusammenfassung der drei Felder für jeden Termin einen mittleren Tagesgang in dem betreffenden Monat bei der bestimmten Bewölkungsstufe. Diese 48 „Tagesgänge“ bilden die Grundlage für die weitere Untersuchung. In der Tabelle 1 sind 4 Beispiele für derartig errechnete Tagesgänge zusammengestellt; da es sich hier sicherlich nicht nur um den wirklichen Tagesgang der Temperatur im Wasser handelt, sondern zum überwiegenden Teil um die systematischen Verfälschungen, seien diese Gänge als „gemessene Tagesgänge“ bezeichnet.

Monat	Bedeckungsgrad	Abweichungen vom Tagesmittel (°C)						Amplitude Max.-Min.
		00	04	08	12	16	20 ^h	
1) Januar	0 - 3	-0,08	-0,03	+0,09	+0,12	+0,02	-0,12	0,24
2) August	9 - 10	-0,01	-0,17	-0,06	+0,13	+0,12	+0,01	0,30
3) August	4 - 6	-0,21	-0,10	0,00	+0,13	+0,23	-0,08	0,44
4) August	0 - 3	-0,16	-0,24	-0,13	+0,18	+0,36	+0,03	0,60

Tabelle 1. Beispiele für die „gemessenen Tagesgänge“

Ein Blick auf diese Tabelle läßt schon die überwiegende Wirkung der Strahlungsverhältnisse erkennen; je stärker diese sind, um so größer sind die Abweichungen vom Tagesmittel - sowohl im Tages- wie auch im Jahresgang. Diese gemessenen Gänge enthalten aber

noch den wahren Tagesgang der Wassertemperatur im Meere selbst, und die erste Aufgabe ist die Elimination dieses Ganges. Aus theoretischen Gründen ist bekannt, daß diese Größe nur wenige Zehntel eines Grades ausmachen kann; die Bestimmung des wahren Tagesganges im Meere war daher lange Zeit nur unbefriedigend. Erst sehr genaue und von systematischen Verfälschungen möglichst freie Meßreihen haben verlässliche Werte ergeben; nach den Messungen KUHLBRODT'S (4) bei der Meteor-Expedition im Südatlantik beträgt die Amplitude des täglichen Ganges etwa $0,25^{\circ}\text{C}$, welcher Wert auch von DEFANT (5) bei der Reduktion der bei derselben Fahrt unabhängig angestellten ozeanographischen Messungen bestätigt wird. Dieser Wert ist allerdings ohne Berücksichtigung der sicherlich auch beim wahren Tagesgang vorhandenen Abhängigkeit von der Bedeckung abgeleitet worden; man wird annehmen können, daß die Amplitude bei trübem Wetter noch erheblich kleiner ist, daß bei voll wirksamer Einstrahlung dagegen noch etwas größere Amplitudenwerte auftreten können. Immerhin sind die Beobachtungen im Südatlantik meist bei geringer Bewölkung, die außerdem meist wenig dicht war, angestellt worden, und außerdem sind die Einstrahlungsbeträge auf eine horizontale Fläche infolge der geringeren geographischen Breite höher als in unseren Feldern, so daß dieser Wert sicherlich nicht zu klein sein kann. In der Abb.1 ist der Tagesgang im Wasser nach KUHLBRODT noch einmal aufgezeichnet worden; die Werte für die Termine 0, 4, 8

... Uhr wurden dieser Kurve entnommen und von den „gemessenen Tagesgängen“ abgezogen, um dadurch den wahren Temperaturverlauf im Wasser wenigstens näherungsweise zu elimi-

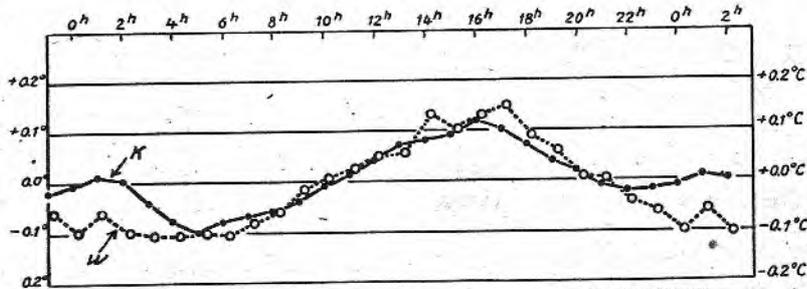


Abb. 1 Der Tagesgang der Wassertemperatur K: Kuhlbrodt W: Wahl

nieren. Als Beispiel dafür, daß ganz ähnliche Gänge bei entsprechend genauen Messungen auch in nördlichen mittleren Breiten festgestellt werden, sind in dieser Abbildung auch noch die Werte eingezeichnet, die der Verfasser in der Nordsee (im Sommer) gemessen hat (vgl. hierzu (6)). Auch diese Werte sind ohne Rücksicht auf die Bedeckung erhalten worden, im allgemeinen waren aber hohe Bedeckungsgrade vorherrschend. Wenn so auch vor allem bei geringer Bewölkung die Elimination nicht völlig ausreichend sein wird, kann man doch bei der Zusammenfassung von vielen Beobachtungen aus den verschiedensten Wetterlagen annehmen, daß der Restanteil des wahren Temperaturganges gegenüber den Fehlern zurücktreten wird, so daß im wesentlichen in den Restgängen nur noch die systematischen Strahlungsverfälschungen enthalten sind.

IV. Für die in der Tab.1 gegebenen Beispiele sind nun in der Abb.2 (s.folg.S.) diese „Restgänge“ nach Elimination des wahren Temperaturganges dargestellt worden; die unabhängigen Termin-Mittelwerte sind als Punkte eingetragen, während die ausgleichende Kurve das Ergebnis der harmonischen Analyse der 6 Werte im Intervall 1 Tag (1.Welle) darstellt. Diese Darstellungsart ist hier vor allem deshalb gewählt worden, um diese Gänge in eine für die Weiterverarbeitung einheitliche Form zu bringen (man erhält ja 48 derartige Gänge aus je 6 Werten) und um von den Zufälligkeiten einer möglichen Fehleranhäufung in den einzelnen Terminmittelwerten frei zu kommen. Der hinzugefügte Wert $2h$ ist die (doppelte) Fourier-Amplitude, also der Abstand zwischen Maximum und Minimum, Δ dagegen die Differenz größter minus kleinster Wert. Zwar wird der Tagesgang keine reine sin-Welle sein, schon wegen der verschiedenen Tageslänge in den verschiedenen

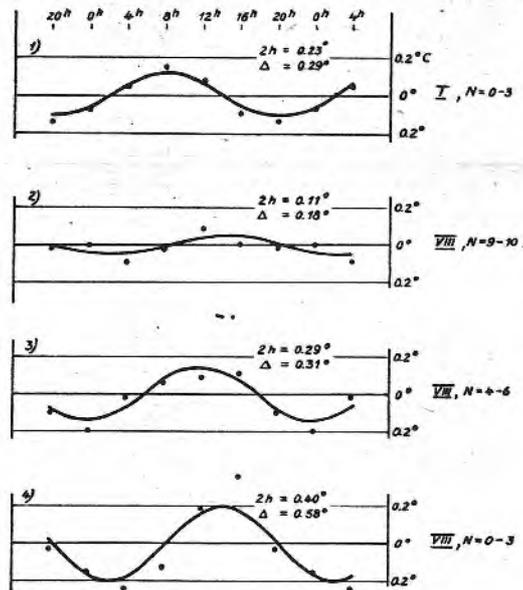


Abb. 2 Beispiele für die Restgänge der Wassertemperaturmessungen nach Elimination des Tagesganges im Wasser selbst.

amplitudengröße des wahren Tagesganges: Wenn die Strahlungseinflüsse unwesentlich werden - also im Winter bei trübem Wetter - dann werden sich auch bei nicht sehr sorgfältigen Messungen etwa die richtigen Werte des Tagesganges ergeben; eliminiert man diese, dann bleiben eben nur noch die zufälligen Fehler übrig, die dann keine Beziehung mehr zur Strahlung aufweisen. Im Sommer dagegen und bei wenig Bewölkung liegen die Maxima der Fehler richtig in den Tagesstunden und zwar meist zwischen den 12 und 20 Uhr-Terminen. Eine Diskussion der genauen Phasenlage ist auf Grund des 4-stündigen Beobachtungsintervalls natürlich nicht möglich, und auf dieses Element ist daher hier auch nicht weiter eingegangen worden.

V. Um den Zusammenhang zwischen den Restgängen, wie sie oben abgeleitet wurden, und der Strahlung auch numerisch festzulegen, wurden weiter die Ein- und Ausstrahlungsbeträge für die hier betrachtete geographische Breite berechnet. Hierbei muß berücksichtigt werden: die Veränderung der Einstrahlung mit der Sonnenhöhe (im Tages- und Jahresgang) und mit der Bedeckung, und das entsprechende gilt auch für die Ausstrahlung. Im folgenden sollen kurz die verschiedenen Komponenten der Strahlung zusammengestellt und ihre Berechnung erläutert werden. Sie können - etwa für eine horizontale Fläche von 1 qcm - wie folgt angesetzt werden:

1) Direkte Sonneneinstrahlung. Auf eine Fläche senkrecht zur Einfallrichtung der Sonnenstrahlen fällt eine bestimmte Energie pro Minute, die von der Länge der durchstrahlten Luftsäule und dem Trübungsfaktor abhängt. Nach STEINHAUSER (7) kann man für See etwa dieselben Trübungs faktoren ansetzen wie über Land (l.c. Tab.5), und in der Tab.3 seiner Arbeit gibt Steinhauser dann die Einstrahlungswerte für jede Stunde des 15. jedes Monats. Diese Werte wurden unter Benutzung der Sonnendeklination dieses Tages auf eine horizontale Fläche (durch Multiplikation mit $\sin h$) umgerechnet. Für jede Stunde (Mitte eines Monats) ergibt sich so die Energie, die bei wolkenlosem Wetter auf die Wasseroberfläche oder eine horizontale Fläche eines Schiffes direkt eingestrahlt wird.

2) Diffuse Einstrahlung. Nach EXNER (8) läßt sich die diffuse Himmelsstrahlung theoretisch ziemlich einfach berechnen. Vielfache Messungen haben auch gezeigt, daß diese Wer-

Monaten und wegen der bekannten Asymmetrie im Temperaturgang selbst, aber die Darstellung derartig kleiner Wellen kann in Anbetracht der Genauigkeit der Einzel-Terminmittel ohne Willkür durch eine einzige sin-Welle vorgenommen werden.

In dieser Abbildung kommt nun noch klarer als in Tab.1 der Zusammenhang der Restwellen mit der Einstrahlung heraus: je größer diese, um so größer auch die Restamplitude. Im Winter scheint die Phasenlage sogar anzudeuten, daß die Elimination des wahren Ganges schon zu weit geht - das Maximum des Fehlers liegt nicht mehr mittags, wie es zu erwarten ist, sondern früh. Hier scheinen sich also schon Gänge zu ergeben, die weitgehend durch die zufälligen Fehler des Materials bedingt sind und nicht mehr durch die Strahlungsbeeinflussung verursacht werden. Dieser Umstand bestätigt aber auch wieder die Richtigkeit der Am-

re zuverlässig sind. Die diffuse Einstrahlung hängt bei sonst gleichbleibenden Verhältnissen von der Sonnenhöhe ab. Aus einer Tabelle im Lehrbuch der Meteorologie v. HANN-SÜRING (V. Auflage) (9) können die Werte mit dem Argument Sonnenhöhe direkt entnommen werden, wobei hier die theoretischen Werte benutzt wurden, die ausreichend sicher sind.

3) Effektive Ausstrahlung. Dieser Teil der Strahlungsbeeinflussung setzt sich aus zwei entgegengesetzt gerichteten Anteilen zusammen, nämlich der reinen thermischen Ausstrahlung der Oberfläche und der Gegenstrahlung der Atmosphäre. Die erste Größe ist eine Funktion der absoluten Temperatur der Fläche, die zweite hängt weiterhin auch noch vom Wasserdampf der Atmosphäre ab (bei wolkenlosem Wetter, das zunächst hier vorausgesetzt wird). Diese beiden Größen lassen sich einigermaßen genau abschätzen, so daß man für eine bestimmte Stelle der Erdoberfläche zu recht guten Werten für die Ein- und Ausstrahlungsverhältnisse kommen kann. Nach ÅNGSTRÖM (10) kann die effektive Ausstrahlung (als Summe dieser beiden Anteile) bei einer absoluten Temperatur T und dem Wasserdampfdruck e nach der Formel

$$E_{\text{eff}} = \sigma T^4 \cdot (0,194 + 0,236 \cdot 10^{-0,069e})$$

berechnet werden. Unter der Annahme einer mittleren relativen Feuchte der Luft über dem Ozean an der betrachteten Stelle von 85% und der mittleren Wassertemperatur des betreffenden Monats wurde hiernach für jeden Monat die effektive Ausstrahlung berechnet. Die Abhängigkeit von dem Dampfdruck ist verhältnismäßig klein, so daß die Benutzung eines festen Wertes der rel. Feuchte zulässig ist; die Benutzung der Wassertemperatur an Stelle der eigentlich hier einzuführenden Lufttemperatur hat ebenfalls keinen wesentlichen Fehler zur Folge, weil auf dem freien Ozean der Unterschied Luft minus Wasser im Mittel nur klein ist. Aus demselben Grunde braucht auch die tägliche Variation der Temperatur nicht berücksichtigt zu werden.

4) Berücksichtigung der Bedeckung. Alle bisherigen Überlegungen galten zunächst für wolkenlosen Himmel; die Berücksichtigung der mehr oder weniger starken Himmelsbedeckung kompliziert die Verhältnisse erheblich. Wenn es auch Formeln gibt, die einen Zusammenhang zwischen Bedeckung und den Strahlungsgrößen darstellen lassen, so ist doch klar, daß diese nur näherungsweise richtig sein können; auf die ganz wesentlichen Unterschiede der Dichte der Bewölkung (bei gleicher Gesamtbedeckung) können diese Formeln im allgemeinen nicht eingehen und es wäre auch nicht möglich, diesen Einfluß in dem hier verarbeiteten Material zu berücksichtigen. Immerhin kann man einigermaßen brauchbare Mittelwerte für die Strahlung erhalten, wenn man die von verschiedenen Autoren festgestellten Zusammenhänge zwischen Strahlung und Bedeckung benutzt. Für die Einstrahlung, also die Summe von direkter und diffuser Strahlung, ist die Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad von verschiedenen Autoren (z.B. vgl. (11)) untersucht worden. Eine zusammenfassende Formel (entnommen (9)) gibt

$$Q = Q_1 (0,23 + 0,77 S)$$

wobei Q die Gesamteinstrahlung (direkt + diffus) ist und $S = 1$ für wolkenlosen Himmel, $S = 0$ für ganz bedeckten Himmel gilt. Der bei der vorliegenden Untersuchung benutzten Verteilung der Bedeckungsstufen entsprechen folgende Faktoren (= Klammerwerte): heiter bis trübe nacheinander 0,88, 0,61, 0,42 und 0,25. Durch Multiplikation der für wolkenlosen Himmel gültigen Werte mit diesen Faktoren können so die Einstrahlungswerte für die einzelnen Stufen errechnet werden.

Ähnliches gilt auch für die effektive Ausstrahlung. Allerdings ist hier der Zusammenhang mit der Bewölkung noch schwieriger zu übersehen, und wie DEFANT (12) bemerkt, ist es sehr auffallend, daß trotz dieser theoretischen Schwierigkeiten eine recht einfache empirische Beziehung zwischen Ausstrahlung und Bedeckung festgestellt werden konnte.

ÅNGSTRÖM (10) hat für Upsala die einfache Formel

$$E_m = (1 - 0,08 m) E_0; \quad (m = 0: \text{wolkenlos}, m = 10: \text{bedeckt})$$

abgeleitet, wobei der Faktor 0,08 für tiefe Wolken gilt; für höhere und dünnere Wolken muß er verkleinert werden, schon deshalb, weil dann die Gegenstrahlung der Luftmasse un-

terhalb der Wolken zunimmt. Der Klammerausdruck wird für die vier Stufen unserer Bedeckungsskala wieder von heiter bis trübe nacheinander zu 0,88, 0,60, 0,40 und 0,22. Die Ausstrahlung wird nun am ganzen Tag als konstant angenommen - was in erster Näherung jedenfalls richtig ist, und die Genauigkeit der Abschätzung des Wolkeneinflusses ist sicher nicht größer. Am Tage werden also diese Ausstrahlungswerte von der Einstrahlung abgezogen, um damit die wirklich zur Verfügung stehende Energie zu erhalten; in der Nacht wird bei fehlender Einstrahlung der Wert als (negative) Konstante benutzt.

In der Abb. 3 sind als Beispiele für die so erhaltenen Strahlungskurven

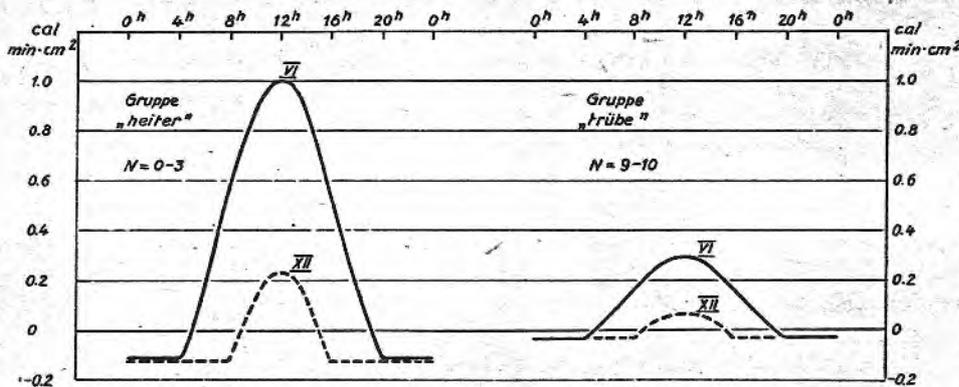


Abb. 3 Der tägliche Strahlungsgang (50°N) für Juni und Dezember

die für die beiden extremen Monate Juni und Dezember gegeben; unterteilt sind sie für heiteres und trübes Wetter entsprechend unserer Stufeneinteilung. Die Abbildung zeigt den großen Unterschied zwischen den Monaten und vor allem auch zwi-

schenden den verschiedenen Bedeckungsgraden.

VI. Nachdem nun die Strahlungsverhältnisse numerisch erfasst sind, kann der Zusammenhang mit den Restfehlern diskutiert werden. Je mehr Energie an einer Stelle einfällt, um so höher werden die Fehler werden; je länger in der Nacht die Ausstrahlung wirkt, um so tiefer werden die Temperaturen fallen. Die gesamte Strahlungsmenge, die eine bestimmte Fläche im Laufe eines Tages erhält, wird durch Integration der Strahlungskurve dieses Tages erhalten, wobei die Einstrahlung am Tage positiv, die nächtliche Ausstrahlung als negativ anzusehen ist. Der Einfachheit halber wurden hier die Stundenordinaten addiert, ohne eine weitergehende numerische Integration - denn es kommt hier ja nur auf die Verhältniszahlen zwischen den verschiedenen Monaten und Bedeckungsgraden an. Es ergeben sich dann die Energiebeträge auch in einer willkürlichen Einheit, deren Beziehung zu direkten Energieeinheiten hier nicht interessiert. Dividiert man nun den positiven durch den negativen Anteil, so erhält man das Verhältnis zwischen Ein- und Ausstrahlung, das natürlich in den verschiedenen Monaten (und in geringerem Maße auch bei den verschiedenen Bedeckungsstufen) verschieden ist; im Winter überwiegt sogar die Ausstrahlung. Übrigens kann man auch auf die oben angeführte Integration völlig verzichten, indem man einfach annimmt, daß die momentanen Einstrahlungswerte die Restfehler bedingen - aber man kommt im Rahmen der hier erforderlichen Genauigkeit auch dann zu genau denselben Schlüssen.

Zunächst ist nun zu prüfen, inwieweit der Zusammenhang zwischen Restamplituden und Strahlungsbeträgen auch numerisch bestätigt wird. Um die Restamplituden noch weiter zusammenzufassen und eine gute Glättung zu erzielen, sind Mittelwerte über die vier Vierteljahre Winter (Dezember-Februar), Frühjahr usw. gebildet worden; in derselben Weise wurden auch die Strahlungswerte zusammengefaßt. Die Tabelle 2 stellt hierfür nun die Ergebnisse zusammen, in der Abb. 4 sind diese Werte dargestellt (Ordinate: Restamplituden, Abszisse: Strahlungsbeträge).

Die Korrelation zwischen diesen Werten ist recht hoch, der Korrelationskoeffizient beträgt +0,85. Man kann also zwischen diesen Werten - zunächst als erste Näherung - eine Ausgleichsgrade festlegen, die den Funktionalzusammenhang beschreibt. Besser ist es aber, wie man leicht aus der Anordnung der Punkte für die verschiedenen Bedeckungsstufen erkennt, zu trennen zwischen den wolkenigen und den klareren Stufen; die beiden Beziehungsgraden für die Gruppen heiter und halb bedeckt und bewölkt und trübe liegen tatsächlich deutlich verschieden. Aber selbst gegenüber der Grade „heiter“ liegen die Werte der Restamplituden im Sommer noch erheblich zu tief; auf diesen Punkt wird noch weiter unten zurückgekommen.

	Winter		Frühjahr		Sommer		Herbst	
	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)
heiter	0,38	353	0,55	745	0,52	892	0,48	495
halb bedeckt	0,10	242	0,28	523	0,45	613	0,39	339
bewölkt	0,23	166	0,39	356	0,42	422	0,11	233
trübe	0,13	97	0,13	213	0,21	252	0,15	138

Tab.2: (a) Restamplituden (°C) und (b) Strahlungsbeträge (willkürl.Einh.) - Vierteljahrs-Mittelwerte -

VII. Da die Beziehung zwischen Strahlung und Restamplituden derartig eng ist, kann man auch die Restamplituden ebenso aufteilen, wie es für die Strahlung durch das Verhältnis Ein- zu Ausstrahlung gegeben ist. Am Tage werden also die Fehler positiv sein, die Temperaturen zu hoch, in der Nacht dagegen negativ. Es ergibt sich so die Lage der Nulllinie, auf die sich die von dem Strahlungseinfluß befreiten Mittelwerte beziehen.

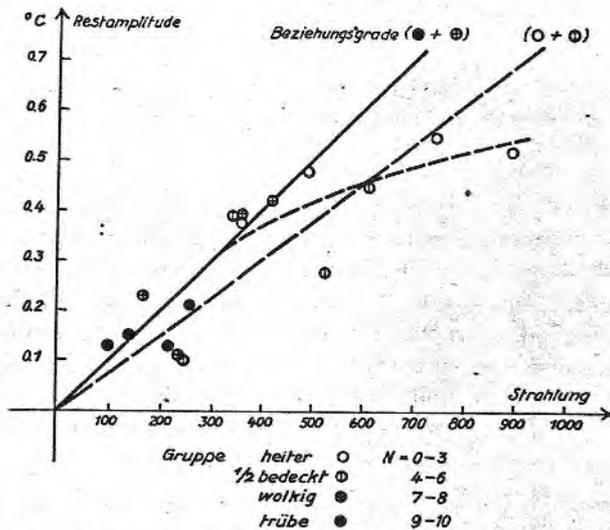
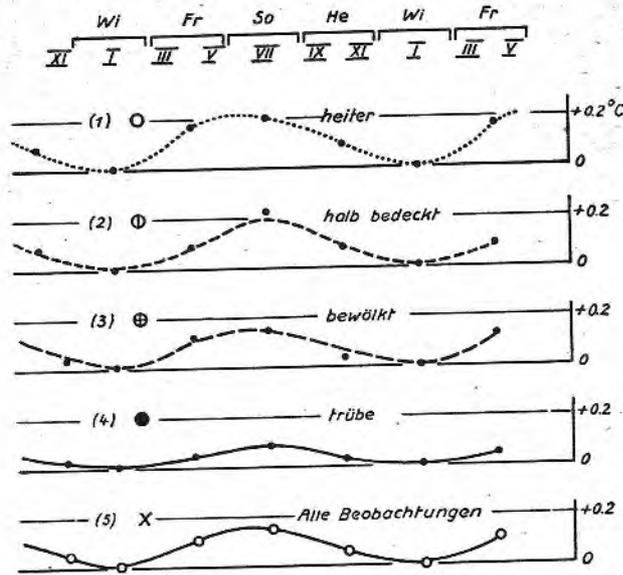


Abb.4 Korrelation zwischen Strahlung u. Restamplitude

(Infolge der Eigenheizung des Schiffes kann dieser Wert allerdings noch etwas zu hoch liegen, s.o.) Als Beispiel sei die Berechnung für einen Fall durchgeführt.

Die Restamplitude im Sommer bei heiterem Wetter ist 0,52° (s.Tab.2). Das Verhältnis von Ein- zu Ausstrahlung ist 88:12, und in demselben Verhältnis muß nun auch die Restamplitude aufgeteilt werden. Der (mittlere) systematische Fehler beträgt also am Tage +0,46°, in der Nacht -0,06°. Da nun die Nulllinie aber bisher (als Tagesmittel aller Termine) so lag, daß sich die Fehler gerade aufhoben, lagen also am Tage 0,26° oberhalb, in der Nacht 0,26° darunter. Die Nulllinie muß also nun bis zu dem Wert -0,20° abgesenkt werden; das bedeutet aber, daß die Tagesmittel bei einfacher Mittelung aller Termine um 0,20° zu hoch liegen. Entsprechend können auch alle anderen Berechnungen durchgeführt werden; und in der Abb.5 (s.folg.S.) sind die Fehler der Monatsmittel im Jahresgang dargestellt, wie sie sich für die 4 Bedeckungsstufen einzeln ergeben. Der letzte Schritt ist nun einfach: unter Benutzung der mittleren Verteilung der verschiedenen Bedeckungsstufen in der betrachteten Gegend kann man aus diesen Kurven auch den Fehler zusammensetzen, der gemacht wird, wenn man alle Beobachtungen ohne Berücksichtigung der Bedeckung zur Mittelbildung heranzieht. Im Laufe des Jahres schwankt dieser Fehler, wie die unterste Kurve in Abb.5 zeigt, zwischen 0,0° und +0,15°, ist am größten im Sommer und verschwindet praktisch im Winter. Bei der Benutzung eines Materials, das die hier gegebene



ten Ergebnisse zunächst nur auf das untersuchte Gebiet beziehen; genähert kann man sie vielleicht auch noch auf andere Gegenden derselben geogr. Breite übertragen, weil die Einstrahlungsverhältnisse von diesem Element überwiegend abhängen. In anderen Breiten - vor allem in den Tropen - sind die Verhältnisse doch wesentlich andere; auch im Polarmeer, wo zeitweise nur Einstrahlung oder nur Ausstrahlung vorkommt, muß man entsprechende Untersuchungen neu anstellen. Gerade dort aber werden diese Strahlungsfehler ja weitgehend gegenüber den anderen systematischen Fehlereinflüssen, wie Schiffsheizung usw., zurücktreten.

VIII. Es interessiert aber auch noch die Frage, wie denn diese systematischen „Strahlungsfehler“ eigentlich an Bord der Schiffe entstehen. Im einzelnen wird man diese Frage natürlich aus einer derartigen statistischen Untersuchung nicht beantworten können; an einem Beispiel möge aber gezeigt werden, wie man das Entstehen eines solchen Meßfehlers, wenigstens qualitativ, deuten kann. Während eines Bordaufenthaltes des Verfassers im Sommer 1948 auf einem deutschen Nordsee-Feuerschiff (vgl. hierzu (6)) wurde zur Feststellung, welche Meßfehler durch das Stehenlassen der aufgeholten Wasserprobe im vollen Sonnenschein entstehen können, eine Sondermeßreihe durchgeführt. Eine Pütz mit etwa 7 Liter Inhalt wurde nach dem Aufholen im Windschatten der direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt, und die Temperatur in dem Wasser längere Zeit messend verfolgt. Im Mittel ergab sich, daß (im Juni-Juli auf 54°N, Bedeckung 1 - 3 Zehntel) in den ersten 5 Minuten nach dem Aufholen die Wasserprobe schon um 0,6° wärmer geworden war; nach 50 Minuten war die Temperatur in der Pütz von 13,8 auf 17,3° angestiegen, bei einer gleichzeitigen Lufttemperatur von 12,8°! Nun braucht man aber garnicht anzunehmen, daß alle Beobachter erst ihre Pütz 4 - 5 Minuten vor der Messung stehen lassen - obwohl selbst das in Einzelfällen einmal vorkommen kann; aber einmal war bei dieser Sondermeßreihe die Pütz vorher sorgfältig austemperiert, zum anderen wurde auch die Temperaturbestimmung mit einem besonders guten und sich schnell einstellenden Thermometer durchgeführt. Hat aber z.B. die Pütz auf dem Schiff vorher schon einige Zeit leer in der Sonne gestanden, ist auch das Thermometer u.U. schon vorher den Sonnenstrahlen ausgesetzt gewesen, wird man ohne Willkür annehmen können, daß schon dadurch die Messung um +0,2° verfälscht sein kann; dann braucht aber nur noch die Pütz 1 - 2 Minuten selbst stehen

Genauigkeit besitzt, begeht man also nur einen sehr geringfügigen systematischen Fehler, wenn man einfach alle Beobachtungen ohne Berücksichtigung von Bedeckung, Tageszeit usw. zur Ableitung des Monatsmittels heranzieht; jedenfalls ist es nicht ratsam, etwa nur Nachtwerte zu benutzen, da dann die negativen systematischen Fehler nicht mehr kompensiert werden. Auch die Beschränkung auf Beobachtungen, die nur aus trüben Tagen gewonnen wurden, ist nach diesem Befund nicht nötig, da der schließliche Gewinn in der Verkleinerung der systematischen Fehler in den meisten Fällen durch den allgemeinen Genauigkeitsverlust aufgehoben werden wird.

Hingewiesen sei hier aber noch einmal darauf, daß sich diese Untersuchung und die hier abgeleiteten

zu bleiben, und ein positiver Fehler von $0,46^\circ$, wie er oben für heitere Sommertage abgeleitet worden ist, wird voll verständlich.

Nun hat das hier benutzte Material aber noch einen besonderen Vorzug; es ist nämlich vor der Übernahme in Lochkarten kritisch „aufbereitet“ worden. Hierdurch sind - entsprechend der Anweisung, „verstrahlte“ Werte zu eliminieren - die abnorm großen positiven Fehler bereits entfernt. Das ist auch einer der Gründe, weshalb bei der Beziehung zwischen Strahlung und Restamplitude die Ausgleichsgerade für „heiter“ usw. flacher liegt als bei „trübe“.

Der zweite Grund aber ist der folgende: Bei heiterem Wetter - und vor allem bei Sonnenschein - wird jeder Beobachter so-

wieso schon mehr auf sorgfältige Durchführung der Messung sehen und automatisch berücksichtigen, daß die Einstrahlung erhebliche Fehler erzeugen kann. Damit wird eine Schrägerstellung der Ausgleichsgeraden sowieso gegeben; werden nun auch noch gerade die (dem zufälligen Fehlerverteilungsgesetz entsprechend zwar seltenen, aber doch noch möglichen) großen Fehler in der Aufbereitung gestrichen, dann müssen die Restamplituden, die zu den höchsten Strahlungsbeträgen gehören, auch noch kleiner herauskommen, als es ohne diese Streichung zu erwarten wäre. Der beste Zusammenhang müßte bei dem hier benutzten Material also durch eine am oberen Ende leicht gekrümmte Kurve gegeben sein, wie sie gestrichelt in der Abb.4 mit eingezeichnet ist. Bei nicht in unserer Art aufbereitetem Material sind an heiteren Sommertagen etwa Restamplituden (entnommen aus der Ausgleichsgeraden für „heiter“) von $0,68^\circ$ zu erwarten und demnach am Tage 88 % davon, also etwa $0,60^\circ$.

Nun bedeutet das aber ja nicht, daß alle Schiffe derartige Fehler machen. Nimmt man an, daß die Fehlerverteilung normal ist, also etwa dem „Gesetz der kleinen Zahlen“ gehorcht, dann kann man durch Auswertung dieser so gegebenen Streuung (= mittlerer Fehler) angeben, wie etwa bei einem Material von 1000 Beobachtungen diese Verteilung ist. Die Abb.6 zeigt zunächst die Fehlerverteilung, wenn man einen mittleren systematischen Strahlungsfehler am Tage von $0,60^\circ$ zugrunde legt. Die Kurve stellt dar, wieviel von 1000 Beobachtungen mit einem Fehler von $0,1$, $0,2$, ... Grad behaftet sind. Man erkennt, daß nur sehr wenige Schiffe bei derart ungünstigen Bedingungen etwa richtig messen; etwa die Hälfte aller Schiffe haben trotzdem Fehler, die unter $0,5 - 0,6^\circ$ liegen, und nur 83 Beobachtungen sind um mehr als 1° zu hoch. (Der Monatsmittelwert, nur abgeleitet aus derartigen Beobachtungen, würde übrigens um $0,24^\circ$ zu hoch liegen.) Nun werden aber in der Aufbereitung gerade die hohen Fehler gestrichen; und dadurch ergibt sich in unserem Material eine Veränderung des normalen Verteilungsgesetzes, das nun nicht mehr mit einer Poisson-Verteilung beschrieben werden kann. Es gelingt aber sehr einfach, aus der Poisson-Verteilung für $0,60^\circ$ zu einer modifizierten Verteilung zu kommen, die einen Mittelwert von $0,46^\circ$ repräsentiert. Man braucht nämlich nur alle Fehler, die größer als $0,85^\circ$ sind, zu streichen; damit entfallen in diesem Falle 204 Werte, und der Mittelwert der restlichen 796 Werte ist gerade $0,46^\circ$. Das bedeutet aber nichts anderes, als daß die Aufbereitung wirklich alle diese Fehler gestrichen hat; diese Annahme wird zwar in dieser zugespitzten Form nicht völlig dem wahren Sachverhalt entsprechen, aber man könnte dasselbe natürlich auch erreichen, wenn man noch einige größere Fehler als übersehen zuläßt und dafür kleinere Fehler auch als gestrichen annimmt. Für die hier durchgeführte überschlägige Betrachtungsweise genügt aber diese Kappung der Verteilungsfunktion an

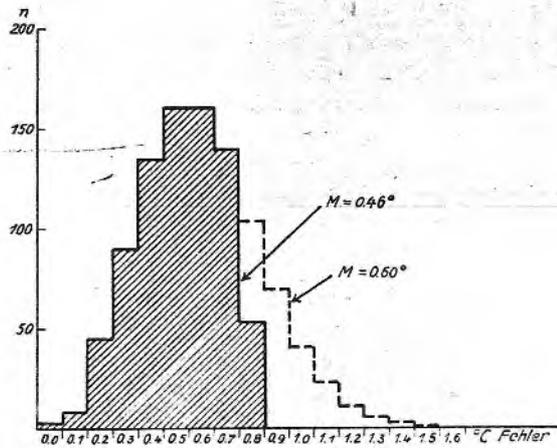


Abb. 6 Verteilungsfunktion der Fehler (bei 1000 Beobachtungen)

oberen Ende völlig, da es hier nur auf die qualitative Erläuterung des Gesagten ankommt. Daß die Zahl von rd. 20 % gestrichener Werte nicht zu hoch ist, ergibt sich daraus, daß diese Zahl ja nur heißt, daß 1/5 der an heiteren Sommertagen gemessenen Wassertemperaturen eliminiert werden. Rechnet man das auf das Gesamtmaterial um, von dem diese Beobachtungsgruppe ja nur einen Bruchteil ausmacht - und z.B. von den Nachtwerten werden ja auch im Sommer praktisch keine gestrichen -, dann ergibt sich ein auch mit den Erfahrungen der Aufbereitung völlig übereinstimmender Wert von etwa 3-4 % an gestrichenen Werten; außerdem werden ja auch aus anderen Gründen noch Temperaturwerte gestrichen (5- oder 10-Gradfehler der Ablesung, schlechte Schrift, offensichtliche Eintragungsfehler, Werte, die zwar eingetragen, aber offensichtlich garnicht gemessen, sondern von der Vormessung abgeschrieben sind usw.), und damit kommt man auf eine Streichungsquote von etwa 5-7 %, wie sie in der Aufbereitung als Norm angesehen wird. Bei den Neubearbeitungen von Wassertemperaturangaben, wie sie z.Zt. von der Abt. Maritime Meteorologie des Meteorologischen Amtes für Nordwestdeutschland vorgenommen werden, benutzt man aber ausschließlich derart aufbereitetes Material - und aus der hier vorgelegten Untersuchung geht hervor, daß auch ohne besondere Berücksichtigung von Termin und Bedeckungsgrad die abgeleiteten Ergebnisse einen hohen Grad von Sicherheit besitzen. Man kann als Anhalt etwa folgende Zahlen nennen:

Die systematischen Strahlungsfehler bewirken bei den Monatsisothermen überschlagsweise eine positive Verfälschung von $0,2^{\circ}$ im Sommer, während dieser Fehler im Winter verschwindet. Vermutlich werden dafür im Winter zusätzliche Erhöhungen der Mittelwerte durch die Eigenheizung des Schiffes auftreten, die aber sicherlich nicht höhere Werte erzeugen. So kann man annehmen, daß den neu abgeleiteten Ergebnissen schon ein recht hoher Grad von Annäherung an die wahren Verhältnisse zukommt; vielleicht liegen die Isothermen noch systematisch um etwa $0,2^{\circ}$ zu hoch.

Wesentlich - und vermutlich etwas schwieriger - ist nun eine entsprechende Untersuchung der Lufttemperatur; die ersten Vorarbeiten hierfür sind bereits durchgeführt. Vermutlich werden bei diesem Element etwas höhere Werte für die systematischen Verfälschungen durch den Strahlungseinfluß herauskommen. Und dann kann man endlich auch etwas mehr über das Verhalten des meteorologisch äußerst wichtigen Elements der Temperaturdifferenz „Luft minus Wasser“ aussagen in seiner Abhängigkeit von Tages- und Jahresgang, die infolge des vollen Eingehens aller systematischen Fehler in der Luft- und der Wassertemperatur bisher noch nicht zufriedenstellend geklärt werden konnte.

Schrifttum:

- (1) F.Wagner; Über Temperaturen am und im Schiff. Ann.Hydr., 1935, 38-40
- (2) H.U.Roll; Über die vertikale Temperaturverteilung in der wassernahen Luftschicht. Ann.Met., 1, 1948, 353
- (3) E.Wahl; Wassertemperaturmessungen an Deck und im Maschinenraum. Ann.Met., 1, 1948, 7
- (4) E.Kuhlbrodt; Wiss.Ergebn.d.Deutsch.Atl.Exp. „Meteor“, Band XIV, S.300 ff.
- (5) A.Defant; Wiss.Ergebn.d.Deutsch.Atl.Exp. „Meteor“, Band VII, S.250 ff.
- (6) E.Wahl; Temperaturmessungen in der Nordsee im Sommer 1948. Ann.Met., 2, 1949, 68
- (7) F.Steinhauser; Gerl.Beitr.Geophys. 42, 110 (1934)
- (8) F.Exner; Theorie der diffusen Strahlung. Sitz.-Ber.Akad.Wiss.Wien, IIa, 118, 899 (1909)
- (9) Hann-Süring; Lehrbuch der Meteorologie. 5.Aufl. S.61-65 (1939)
- (10) A.Ångström; Smithson.Misc.Coll. 65, No.3, 1915
- (11) Hann-Süring; Lehrbuch der Meteorologie. 5.Aufl. S.68 (1939)
- (12) A.Ångström; St.Met.-Hydr.Anstalt Stockholm, Uppsatser No.8, 136

Meteorolog.Amt f.NW-Deutschland, Zentralamt