

Zum Verhalten der Wassertemperatur und bioklimatischer Parameter im Bereich der deutschen Ostseeküste

Von BIRGER TINZ und PETER HUPFER

Zusammenfassung

Die oberflächennahen Wassertemperaturen an der deutschen Ostseeküste und im vorgelagerten Seegebiet zeigen in den letzten ca. 100 Jahren ausgeprägte, eng mit der Lufttemperatur verbundene Schwankungen, jedoch keinen durchgehenden Abkühlungs- oder Erwärmungstrend. Das Verhalten dieser Größe kann in den einzelnen Monaten und Jahreszeiten sehr unterschiedlich sein.

Die Badesaison, definiert als Anzahl der Tage mit einer Wassertemperatur über 15 °C (Terminwert 08 Uhr UTC), folgt ebenfalls dieser Entwicklung. Die erste Augushälfte erweist sich als der Zeitraum mit der höchsten Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Badetagen.

Durch die Berechnung von Korrelationsfeldern konnte der enge Zusammenhang zwischen den Monatsmitteln der Wassertemperatur und der atmosphärischen Zirkulation sowie dem großräumigen Lufttemperaturfeld nachgewiesen werden. Dabei existieren mit dem Luftdruckfeld im Winter und im Sommer zwei unterschiedliche Muster. Mit dem Feld der bodennahen Lufttemperatur besteht ganzjährig eine hohe Korrelation im Gebiet um Norddeutschland, die sich teilweise über mehrere Monate erstreckt.

Mit einem multiplen linearen Regressionsmodell, das die mittleren bodennahen Lufttemperaturen des Gebietes 50–60° N und 5–15° E des gleichen Monats und der beiden Vormonate als Prädiktoren enthält, kann in den einzelnen Monaten zwischen 61 % und 84 % der Varianz der Monatsmittel der Wassertemperatur erklärt werden. Die Berechnung der Wassertemperaturen mit den Lufttemperaturreihen des gleichen Gebietes des Klimamodells ECHAM4/OPYC3 ergab im Kontrolllauf keine signifikanten Änderungen im Simulationszeitraum, während es im Treibhausgasszenario IS92a zu einem kritisch zu bewertenden Anstieg von 3–4 K bis zum Ende des Simulationszeitraumes kommt.

Das thermische Behaglichkeitsgefühl des Menschen im Strandbereich, ausgedrückt durch den Predicted Mean Vote (PMV), weist im August sein Maximum auf. Durch geeignete Wahl der Bekleidung und bei moderater körperlicher Aktivität kann mittags im größten Teil des Jahres thermische Behaglichkeit beim Aufenthalt am Strand erreicht werden. Die enge Korrelation des PMV mit der Lufttemperatur lässt bei einer Erwärmung eine deutliche Verlängerung der thermischen Behaglichkeit am Strand und damit des Erholungswertes erwarten.

Summary

During the last 100 years nearshore and offshore water surface temperatures at the German Baltic coast show remarkable fluctuations, corresponding to the air temperature; however, there is no significant cooling or warming trend. Temperature variations differ between the months and seasons.

The number of days with a sea temperature above 15 °C (08 UTC), called bathing season, reveals the same development. The first half of August is the period with the highest probability of occurrence of bathing days.

The close relation between the monthly average of sea temperature and the atmospheric circulation as well as the wide area air temperature field can be documented by calculations of correlation fields. In summer and winter two different patterns of the sea level pressure can be found. The water temperatures are highly correlated, sometimes for several months, to surface air temperatures around Northern Germany during the entire year.

A multiple linear regression model, employing the mean near surface air temperature of the area 50–60° N and 5–15° E of the same month and the two preceding months as predictors, can explain 61 % to 84 % of the variance of the monthly average of sea temperatures. Calculating water surface temperatures using air temperature time series of the same area obtained from a control run of the climate model ECHAM4/OPYC3 revealed no significant changes during the simulation period. However, calculations for the greenhouse gas scenario IS92a resulted in an increase of the sea temperature of about 3–4 K for every months, which has to be interpreted critically.

The thermal comfort feeling of humans at the beach, defined with the Predicted Mean Vote (PMV), has its maximum in August. By choosing appropriate clothing and performing moderate exercise thermal comfort at the beach can be reached at noon during most of the year. Because of the close correlation between PMV and air temperature a clear prolongation of thermal comfort and the corresponding leisure value at the beach can be expected for a warmer climate.

Inhalt

| | |
|---|-----|
| 1. Einführung | 212 |
| 2. Die Wassertemperaturverhältnisse im Gebiet der westlichen Ostsee | 213 |
| 2.1 Daten | 213 |
| 2.2 Statistik | 214 |
| 2.3 Dauer der Badesaison | 216 |
| 2.4 Langzeitänderungen | 218 |
| 2.5 Feldkorrelationen | 219 |
| 2.5.1 Bodenluftdruckfeld | 219 |
| 2.5.2 Lufttemperaturfeld | 220 |
| 2.6 Regression | 220 |
| 2.7 Die Wassertemperatur im Klimamodell ECHAM4/OPYC3 | 224 |
| 2.7.1 Das Klimamodell | 224 |
| 2.7.2 Die Wassertemperaturen in zwei Szenarien | 224 |
| 3. Das thermische Behaglichkeitsgefühl im Strandbereich | 224 |
| 3.1 Einführung | 224 |
| 3.2 Das Klima-Michel-Modell des Deutschen Wetterdienstes | 225 |
| 3.3 PMV-Werte für Rostock-Warnemünde | 225 |
| 4. Schlussbemerkung | 228 |
| 5. Danksagung | 229 |
| 6. Schriftenverzeichnis | 229 |

1. Einführung

Die thermischen Verhältnisse an der deutschen Ostseeküste und im vorgelagerten Seegebiet können durch die Wassertemperaturen, die eng damit zusammenhängenden winterlichen Eisverhältnisse und das thermische Behaglichkeitsgefühl des Menschen im Strandbereich charakterisiert werden. Über die Langzeitvariabilität des Eisvorkommens an der deutschen Ostseeküste hat TINZ (1998, S. 33–45) berichtet.

Ziel dieser Untersuchungen ist es, zunächst die rezenten Änderungen der thermischen Verhältnisse zu analysieren und mit großskaligen meteorologischen Parametern (Zirkulation, Lufttemperaturfeld) zu verknüpfen und die gefundenen Regressionsgleichungen auf verschiedene Experimente eines Klimamodells anzuwenden. Dadurch wird es möglich, erste Anhaltspunkte über regionale thermische Veränderungen im Fall einer anthropogenen Klimaschwankung zu gewinnen.

2. Die Wassertemperaturverhältnisse im Gebiet der westlichen Ostsee

Der Jahresgang der Temperatur des Oberflächenwassers des fast abgeschlossenen Nebenmeeres Ostsee wird vor allem durch den Jahresgang der lokalen Wärmebilanz bestimmt. Advektive und konvektive Prozesse sind in ihrer Bedeutung für die Wassertemperaturänderungen vom Ort, von der Jahreszeit und von der herrschenden Wetterlage abhängig.

2.1 Daten

Im Gegensatz zu anderen ozeanographischen Größen (z. B. Pegelstand) liegen von der oberflächennahen Wassertemperatur (0 bis 1 m Wassertiefe) an der deutschen Ostseeküste nur wenige lange und hinreichend lückenlose Reihen von Tageswerten vor. Angaben zu den von verschiedenen Institutionen freundlicherweise zur Verfügung gestellten Datensätzen sind in der Tab. 1 zusammengestellt. Die geographische Lage der Messstationen kann der Abb. 1 entnommen werden. Wie dort ersichtlich ist, handelt es sich sowohl um Stationen der Innen- und der Außenküste als auch um Feuerschiffe (FS), die sich im vorgelagerten Seegebiet befanden. Die Feuerschiffe wurden in den letzten Jahrzehnten aus Kostengründen eingezogen. Teilweise erfolgte ein Ersatz durch automatische Messsysteme (Großtonnen).

Bis auf die Station Glücksburg (Flensburger Förde) weisen alle Reihen größere Lücken von 1 % bis 16 % des potentiellen Wertumfangs auf. Bei den Feuerschiffen kam es z. B. in einigen sehr strengen Wintern wegen des Vorkommens von Meereis zu Unterbrechungen der Messungen. In diesen Fällen wurde bei Kenntnis von Eisvorkommen als Wassertemperatur die Schmelztemperatur des Eises in Abhängigkeit vom mittleren Salzgehalt des Wassers im betreffenden Seegebiet angenommen. Ansonsten erfolgte bei bis zu fünf aufeinander folgenden fehlenden Tageswerten eine lineare Interpolation.

Zwischen den Monatsmitteln der Wassertemperaturen der Stationen bestehen sehr enge Korrelationsbeziehungen. Die Korrelationskoeffizienten nach Pearson (s. SCHÖNWIESE,

Tab. 1: Zeitreihen der Wassertemperatur

| Ort | Dauer | vorhandene Werte | Anzahl fehlender Werte in % | zeitliche Auflösung | Tiefe in m |
|---------------------|-----------------|------------------|-----------------------------|---------------------|--------------------------|
| Travemünde | 08/1946–06/1995 | 17 694 | 0,9 | Tag | 0,5 |
| Zingst, Brückenkopf | 01/1976–12/1990 | 5 176 | 4,7 | 3 h | 0,5 |
| Zingst, Hafen | 01/1976–12/1990 | 5 345 | 1,8 | Tag | 0,5 |
| Zingst, Strand | 01/1969–10/1995 | 9 630 | 8,7 | Tag | 1 |
| Warnemünde | 01/1969–10/1995 | 7 409 | 7,5 | Tag | 1 |
| Koserow | 08/1975–10/1995 | 9 809 | 7,3 | Tag | 1 |
| Glücksburg | 01/1960–12/1995 | 13 140 | 0,0 | Tag | 1 |
| FS Flensburg | 07/1936–06/1963 | 8 672 | 12,1 | Tag | 0; 5; 10; 15; 20; 25; 28 |
| FS Kiel | 07/1936–07/1967 | 9 978 | 4,3 | Tag | 0; 5; 10; 15; 18 |
| FS Fehmarnbelt | 01/1924–03/1984 | 20 096 | 9,1 | Tag | 0; 5; 10; 15; 20; 25; 28 |
| FS Adlergrund | 01/1924–12/1939 | 5 558 | 3,1 | Tag | 0; 5; 10; 19 |
| FS Gedser Rev | 01/1897–03/1976 | 24 481 | 16,3 | Tag | 0; 5; 10; 15; 20 |

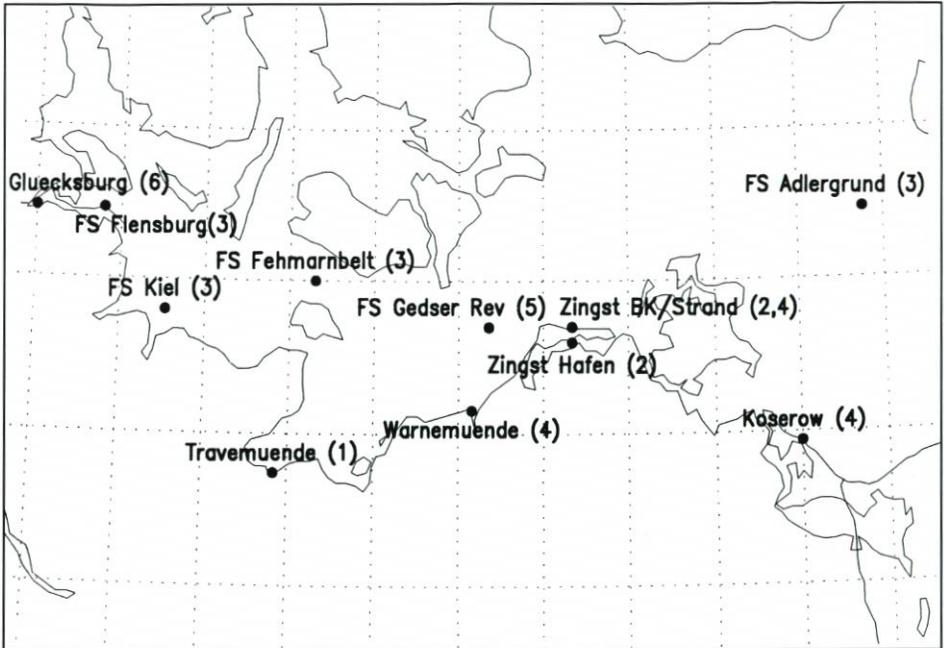


Abb. 1: Lage der Stationen, von denen Tageswerte der Wassertemperatur vorliegen. Datenquellen: 1 Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord Kiel, 2 Maritimes Observatorium Zingst, 3 Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie Hamburg (BSH), Deutsches Ozeanographisches Datenzentrum, 4 BSH Rostock, Eisdienst, 5 Institut für Ostseeforschung Warnemünde, 6 Flottenkommando der Bundesmarine Glücksburg

1992, S. 132) liegen um etwa 0,9. Allgemein ist die Korrelation innerhalb der Gruppe der Feuerschiffe und innerhalb der Gruppe der Küstenstationen größer als zwischen diesen beiden Gruppen. Mit zunehmender Entfernung nimmt die Korrelation darüber hinaus ab.

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Untersuchungen an Hand der Reihen des FS Gedser Rev (1897–1976), als Station auf der offenen See und von Travemuende (1946–1995), als Küstenstation dargestellt. Die Analyse dieser beiden Reihen ermöglicht Aussagen über die Wassertemperaturverhältnisse der letzten 100 Jahre.

2.2 Statistik

Der Jahresgang der Wassertemperatur aller Stationen zeigt den typischen Verlauf mit gegenüber dem Sonnenstand um etwa 2 Monate verzögerten Extremwerten Ende Februar und Anfang August (Abb. 2). Zum Vergleich sind die Tagesmittel der Lufttemperatur der Wetterstation Rostock-Warnemünde mit eingezeichnet. Die Werte sind nicht direkt vergleichbar, da sie verschiedene Zeitperioden repräsentieren und da es sich bei der Wassertemperatur um 08 UTC-Werte handelt, während bei der Lufttemperatur Tagesmittel vorliegen. Darüber hinaus erfolgte in Travemuende als Küstenstation die Messung in der Zone des extremen Temperaturverhaltens (HUPFER, 1974, S. 65 ff.), mit einem größeren Tagesgang der Wassertemperatur als bei Gedser Rev. Für das Studium der Eigenschaften des Jahresganges sind die Daten aber ausreichend. Bei gleichen Temperaturen im Winter ist

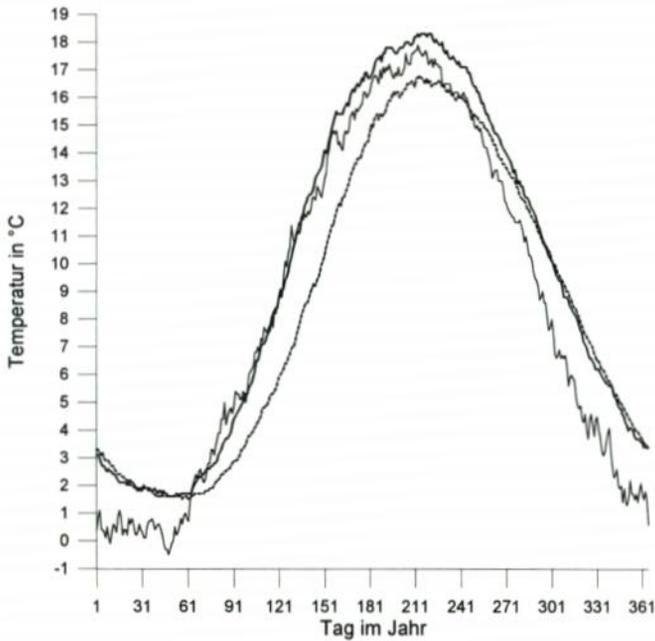


Abb. 2: Mittel der täglichen 08 UTC-Werte der Wassertemperatur. Durchbrochen: FS Gedser Rev (1897–1976), ausgezogen fett: Travemünde (1947–1995) und ausgezogen dünn: Tagesmittel der Lufttemperatur von Warnemünde (1946–1994) im Jahresverlauf

die Amplitude beim FS Gedser Rev geringer. Der Jahresgang weist also „maritimere“ Züge auf.

Die Tageswerte der Wassertemperatur aller Stationen folgen einer zweigipfligen Häufigkeitsverteilung (Abb. 3). Offenbar gibt es im untersuchten Seegebiet zwei bevorzugte Temperaturniveaus um 3 °C bis 4 °C (kalte Jahreszeit) und um 15 °C bis 16 °C (warme Jahreszeit), zwischen denen der Übergang relativ schnell erfolgt. Das relative Minimum liegt einheitlich bei etwas unter 10 °C, was gleichzeitig dem Jahresmittel der Wassertemperatur entspricht. Diese Art der Häufigkeitsverteilung ist typisch für das gesamte deutsche Nord- und Ostseeküstengebiet, wie MÜLLER-NAVARRA und LADEWIG (1997, S. 18) entnommen werden kann. GERSTENGARBE (1983, S. 4) hat die gleiche Verteilung für die Tageswerte der Lufttemperatur der Wetterstation Potsdam nachgewiesen. Bei der Lufttemperatur von Warnemünde zeigt sich ein ähnliches Bild (Abb. 3).

Die zweigipflige Verteilung entsteht durch die Überlagerung von zwei Normalverteilungen. Dieser Sachverhalt kann physikalisch wie folgt erklärt werden: in erster Näherung folgt die Wassertemperatur der kurzwelligen Sonneneinstrahlung. Diese ist proportional der Sonnenhöhe, die im Jahresverlauf einer Sinusfunktion folgt. Deren mit einer Zufallszahlenreihe (Wetter) überlagerte Häufigkeitsverteilung entspricht einer zweigipfligen Verteilung.

Auffällig ist der Unterschied der Häufigkeitsverteilungen der räumlich eng benachbarten Zingster Stationen. Im Bodden (Zingst, Hafen) dominiert eindeutig die Klasse um 0 °C, was mit der relativ langen mittleren Eisbedeckung im Winter zusammenhängt. Nach SCHMELZER (1994, S. 51 ff.) werden in der Darß-Zingster Boddenkette pro Winter im Mittel etwa 60 Tage mit Meereis registriert, während es an der Außenküste (Darßer Ort) nur

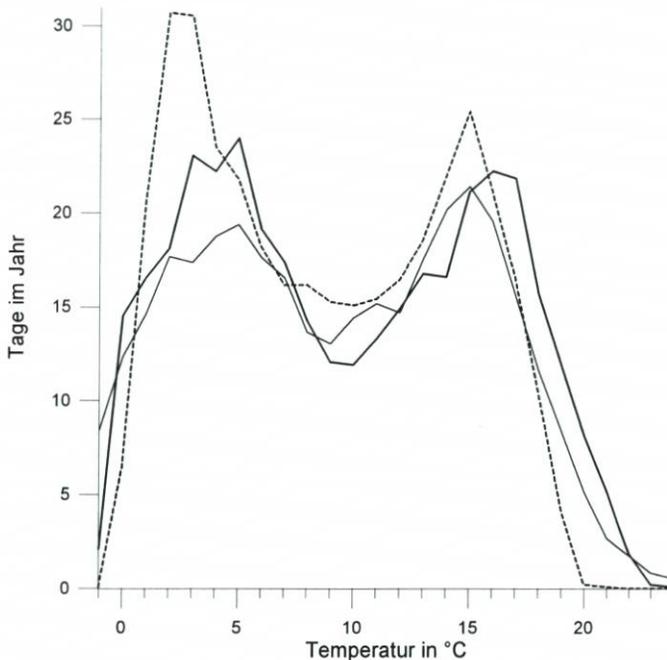


Abb. 3: Häufigkeitsverteilung der täglichen 08 UTC-Werte der Wassertemperatur. Durchbrochen: FS Gedser Rev, ausgezogen fett: Travemünde und ausgezogen dünn: Tagesmittel der Lufttemperatur von Warnemünde. Die Klassenbreite beträgt einheitlich 1 K. Die Werte wurden auf 1 Jahr normiert, so daß die mittlere Anzahl der Tage pro Klasse und Jahr dargestellt ist

14 Tage sind. Hier (Zingst, Brückenkopf) stellt sich die fast symmetrische zweigipflige Verteilung ein.

Die thermische Trägheit des Wassers bewirkt eine im Vergleich mit der Lufttemperatur starke Autokorrelation, die bei den Monatsmitteln der Wassertemperatur 1 bis 5 Monate statistisch nachweisbar ist (t-Test). Dabei ist die Autokorrelation auf der offenen See noch ausgeprägter als an den Küstenstationen. Mit der Wassertemperatur des Vormonats besteht ganzjährig eine hochsignifikante Korrelation (mit 99,9 % statistischer Sicherheit von 0 verschieden) mit Korrelationskoeffizienten um $r = 0,6$. Sie ist stets höher als die der Lufttemperatur von Rostock-Warnemünde und beim FS Gedser Rev im Laufe des Jahres überwiegend größer als bei Travemünde. Ein schwach ausgeprägter Jahresgang mit einem Maximum des Korrelationskoeffizienten im Frühjahr und einem Minimum im Juli ist erkennbar.

2.3 Dauer der Badesaison

Verschiedene Autoren, z. B. RODEWALD (1952, S. 112 ff.), haben den Begriff der Dauer der Badesaison zur Charakterisierung der küstennahen thermischen Verhältnisse im Sommerhalbjahr verwendet. Man versteht darunter die Anzahl der Tage mit Wassertemperaturen über einem bestimmten Schwellenwert, oft 15 °C. Dieser Temperaturschwellenwert hat sich auch in dieser Untersuchung als geeignet erwiesen, da diese Temperatur in jedem Sommer

überschritten wird. Bei höheren Schwellenwerten ist dies beim FS Gedser Rev nicht in jedem Jahr der Fall.

Die Bestimmung des Badetages beruht auf Terminwerten von 08 UTC. In der ufernahen Badezone gibt es einen Tagesgang der Wassertemperatur von einigen Kelvin mit einem Maximum am Nachmittag in Abhängigkeit von der Einstrahlung und Windrichtung (HUPFER, 1974, S. 65 ff.). Da die hier verwendete Definition sich aus Datengründen auf den 08 Uhr UTC-Termin bezieht, dürfte die tatsächliche Zahl von Badetagen höher sein.

Im Sommerhalbjahr treten im Mittel im Mai 2,1/0,0, im Juni 20,2/4,0, im Juli 28,9/22,8, im August 30,0/25,2, im September 19,2/12,0 und im Oktober 0,7/0,3 Badetage auf (Travemünde/Gedser Rev). Auf der offenen See ist mit einer geringeren Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Badetagen zu rechnen. Das Maximum fällt einheitlich in den August. Der September zeichnet sich durch mindestens ebenso viele Badetage wie der erste Sommermonat Juni aus.

Die mittlere tägliche Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Badetages (Abb. 4) schwankt im Sommerhalbjahr zwischen 0 und 100 % (Travemünde) bzw. 0 und 90 % (FS Gedser Rev). Der früheste Termin des Auftretens eines Badetages ist der 9.5./1.6. und der späteste Termin ist der 9.10./5.10. Das Maximum wird um den 27.7./12.8. und um den 14.8. erreicht. Die höchsten Wahrscheinlichkeiten des Auftretens von Badetagen liegen im Bereich von Ende Juli bis Mitte August. Interessant ist die Tatsache, dass der Herbstmonat September dem Sommermonat Juni im Hinblick auf die Wassertemperatur im Mittel gleichwertig ist.

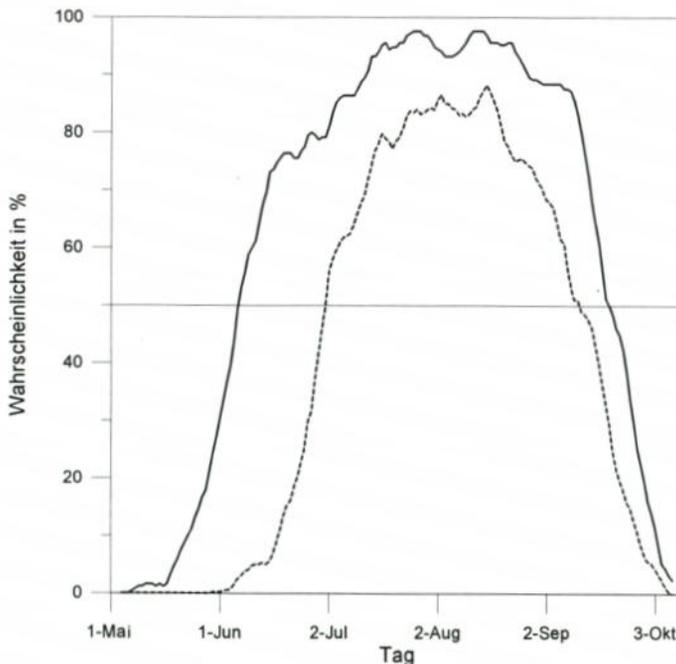


Abb. 4: Mittlere tägliche Wahrscheinlichkeit (5-tägig übergreifendes Mittel) des Auftretens eines Badetages in %. Fett: Travemünde (1947-1995), durchbrochen: Feuerschiff Gedser Rev (1897-1996)

Es deutet sich eine schwache Zweigipfligkeit der Kurve an, wie sie auch bei den mittleren täglichen Wärmesummen von Rostock-Warnemünde auftritt, die TIESEL (1995, S. 50) zur thermischen Charakterisierung des Sommers nutzt.

2.4 Langzeitänderungen

Die oberflächennahen Wassertemperaturen in der westlichen Ostsee zeigen seit den 20er-Jahren dieses Jahrhunderts bis in die 50er-Jahre einen allgemeinen Anstieg der vor allem das Sommerhalbjahr erfaßt (HUPFER, 1962a, S. 414 ff.). Dieses Verhalten korrespondiert mit einer deutlichen Zunahme der Zahl der Badetage in diesem Zeitraum. HUPFER (1962b, S. 119 ff.) kommt bei der Untersuchung des FS Gedser Rev für den Zeitraum 1931/60 auf eine Verlängerung der Badesaison auf 73 Tage gegenüber 54 Tage im Zeitraum 1901/30. Dabei hat sich die Badesaison vor allem in den September hin ausgeweitet. In den sich anschließenden Jahren kommt es zu einer leichten Abnahme der Temperaturen.

Ähnliche Entwicklungen wurden auch in den Gewässern vor der finnischen Küste (HAAPALA und ALENUS, 1994, S. 61 ff.) und an der deutschen Nordseeküste beobachtet (GOEDECKE, 1953, S. 1 ff.). Auch in den tieferen Schichten der Ostsee ist dieser Temperaturverlauf nachweisbar. MATTHÄUS (1996, S. 80) zeigt einen Anstieg der Wassertemperatur im 200-m-Horizont des Gotlandbeckens von 1870 bis etwa 1950, dem sich dann eine leichte Abnahme anschließt.

Die hier durchgeführten Untersuchungen bestätigen die früheren Ergebnisse, wobei insgesamt kein einheitlicher Trend nachweisbar ist. Betrachtet man die Anomalien des Jahresmittels der Wassertemperatur von Travemünde und vom FS Gedser Rev gegenüber dem Mittel 1947 bis 1976 (in diesem Zeitraum überlappen sich die Reihen), so erkennt man verschiedene Zeitperioden mit unterschiedlichen Trends (Abb. 5). Der Zeitraum von 1897 bis etwa 1930 zeichnet sich durch unterdurchschnittliche Temperaturen aus. Während die Temperaturen im Frühjahr in diesem Zeitraum leicht überdurchschnittlich sind, liegen besonders die Herbsttemperaturen auf einem tiefen Niveau. Das Minimum um 1920 wird vor allem durch ein kurzzeitiges Absinken der Sommertemperaturen verursacht. Danach steigen insbesondere die Sommer- und die Herbsttemperaturen an. Es folgt eine von etwa 1930 bis 1950 dauernde Phase mit überdurchschnittlichen Jahresmitteltemperaturen. Dabei werden die unternormalen Wintertemperaturen (3 der kältesten Winter dieses Jahrhunderts) durch die übernormalen Sommertemperaturen überkompensiert. Von 1950 bis 1965 sinken die Temperaturen wieder, wobei der Trend alle Jahreszeiten erfaßt. Danach folgen zwei Maxima der Temperatur um 1970 und Anfang der 90er-Jahre, die von einem Minimum um 1980 getrennt werden. Die Reihe ist insgesamt frei von einem signifikant von Null verschiedenen Trend. Es wechseln sich Phasen mit über- und unternormalen Wassertemperaturen ab. Dabei liegt in den einzelnen Jahreszeiten ebenfalls ein uneinheitliches Verhalten vor, wobei sich maritime und kontinentale Perioden separieren lassen.

Der Temperaturverlauf entspricht dem der Lufttemperatur in dieser Region. Im Gegensatz zur hemisphärischen Entwicklung fehlt die deutliche Erwärmung im letzten Dezennium. Weitere Informationen zu rezenten Klimaänderungen im weiteren Gebiet können HUPFER (1996, S. 180 ff.) oder SCHÖNWIESE und RAPP (1997, S. 50 ff.) entnommen werden.

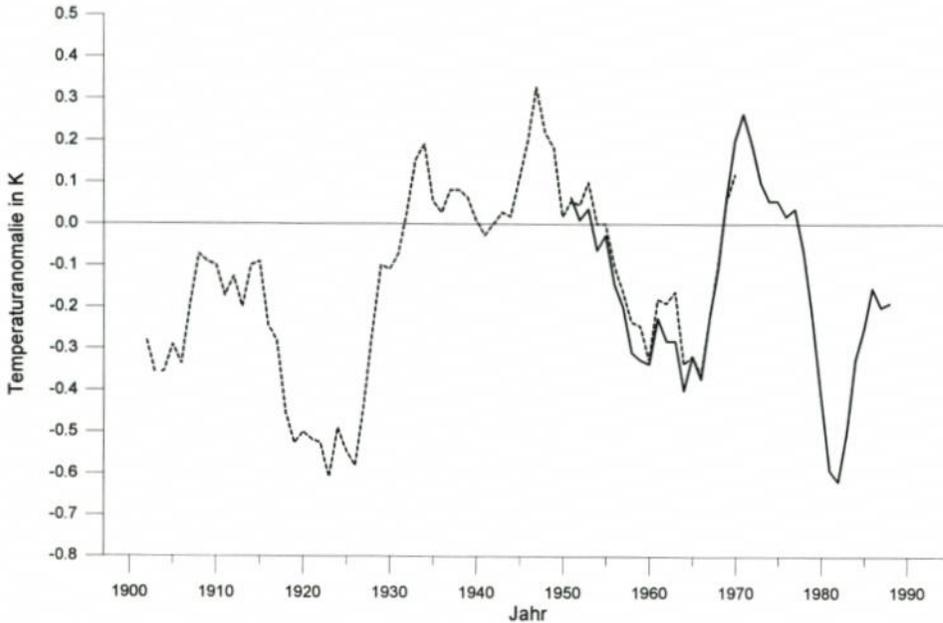


Abb. 5: Elfjährig übergreifend gemittelte Anomalien der Jahresmittel der Wassertemperatur gegenüber dem Zeitraum 1947–1976. Fett: FS Gedser Rev (1879–1976), Durchbrochen: Travemünde (1947–1995)

2.5 Feldkorrelationen

Bei der Untersuchung des Zusammenhanges zwischen den winterlichen Eisverhältnissen an der deutschen Ostseeküste an Hand der flächenbezogenen Eisvolumensumme (KOSLOWSKI, 1989, S. 61 ff.) und dem großräumigen bodennahen Luftdruck- sowie Lufttemperaturfeld hat sich die Methode der Feldkorrelation als geeignet erwiesen (TINZ, 1998). Das Verfahren wurde hier ebenfalls angewendet. Dabei wird die interessierende Reihe (z. B. Reihe der Januarmittel der Wassertemperatur vom FS Gedser Rev) jeweils mit Gitterpunktansätzen des Luftdrucks zunächst des gleichen Monats korreliert. Die sich ergebenden Korrelationskoeffizienten werden mit dem t-Test auf Signifikanz überprüft (SCHÖNWIESE, 1992, S. 159 f.). Auf diese Weise können Gebiete mit einer signifikanten Korrelation zwischen dem Feld und der lokalen bzw. regionalen Größe erkannt werden. Eine Korrelation mit den Feldern von Temperatur und Luftdruck der Vormonate gibt Auskunft über eine mögliche thermische bzw. dynamische Vorbereitung.

Verifiziert wurde die Methode durch die Berechnung von Anomalien der Felder des Bodenluftdrucks und der Lufttemperatur in Monaten mit über- bzw. unternormaler Wassertemperatur. Die Ergebnisse der beiden Methoden sind praktisch gleich.

2.5.1 Bodenluftdruckfeld

Die Korrelationsfelder zwischen den Monatsmitteln der Wassertemperatur vom FS Gedser Rev und dem 5°-Gitterpunktansatz des nordhemisphärischen bodennahen Luft-

drucks vom NCAR¹ (TRENBERTH u. PAOLINO, 1980) zeigen im Jahresverlauf zwei unterschiedliche Muster. Im Winter (Dezember bis März/April) zeigt sich im nordatlantisch-europäischen Sektor das typische zonale Zirkulationsmuster mit einem Gebiet mit negativen Korrelationskoeffizienten über dem Nordmeer und einem Gebiet mit positiver Korrelation über dem östlichen Teil des mittleren Nordatlantik (Abb. 6). Die (vom Betrag her) größten Korrelationskoeffizienten betragen $r = -0,55$ und $r = 0,46$. Anomalien des meridionalen Luftdruckgradienten über dem Nordatlantik bestimmen bekanntlich die Stärke der Westwinddrift und damit die Strenge des Winters in Mitteleuropa. Die Wassertemperaturen korrespondieren erwartungsgemäß mit dem thermischen Charakter des Winters.

Im Sommer (Juni bis August) gibt es im betrachteten Ausschnitt ein Gebiet mit signifikanten positiven Korrelationen über Skandinavien (Abb. 6). Die Korrelation ist mit maximalen Werten bis zu $r = 0,37$ wesentlich schwächer ausgeprägt als im Winter. Bei positiven Luftdruckanomalien über Skandinavien wird der mittleren Westwinddrift eine östliche Komponente überlagert. Im Sommer bringen die Ostwetterlagen übernormale Temperaturen. Im entgegengesetzten Fall, also bei negativen Luftdruckanomalien über Nordeuropa, wird die Westwinddrift verstärkt, wobei eine nordwestliche Komponente überwiegt, mit der die zu dieser Jahreszeit kältesten Luftmassen aus dem Nordmeer herangeführt werden.

In den Übergangsjahreszeiten findet eine Umstellung zwischen diesen beiden Mustern mit nur vereinzelt signifikanten Signalen statt.

2.5.2 Lufttemperaturfeld

Auf die gleiche Art wurden Korrelationsfelder mit dem globalen 5°-Gitterflächendatensatz der bodennahen Lufttemperatur (CHADWYCK-HEALEY Ltd., 1992) berechnet. In allen Monaten liegt ein nahezu ortsfestes Gebiet mit signifikanten positiven Korrelationskoeffizienten um das Gebiet von Norddeutschland. Die maximalen Beträge liegen zwischen $r = 0,55$ im Mai und $r = 0,82$ im August. Damit können bereits 30 % bis 67 % der Varianz der Monatsmittel der Wassertemperatur erklärt werden. Ein Teil der unerklärten Varianz wird von der schon erwähnten Autokorrelation der Monatswerte der Wassertemperatur verursacht. Diese Autokorrelation wird bei der Berechnung der Korrelationsfelder mit der Lufttemperatur der Vormonate deutlich. Eine signifikante Korrelation reicht in der Regel 1 bis 2 Monate zurück. In der Abb. 7 sind beispielhaft die Korrelationsfelder zwischen dem Monatsmittel der Wassertemperatur des Monats Juli und den Monatsmitteltemperaturen der Monate Juli, Juni und Mai dargestellt. Die maximalen Korrelationskoeffizienten liegen im Juli bei etwa $r = 0,7$; sie sinken in den beiden Vormonaten auf etwa $r = 0,4$ ab.

2.6 Regression

Die Regressionsrechnungen wurden mit den Monatsmitteltemperaturen der 4 Gitterpunkte 50–60° N und 5–15° E als Prädiktoren durchgeführt. Die lineare multiple Regressionsgleichung mit der Wassertemperatur als Prädiktand hat die Form:

$$TW = a + b \cdot TT_0 + c \cdot TT_{-1} + d \cdot TT_{-2}$$

¹ National Center for Atmospheric Research Boulder (Colorado, USA)

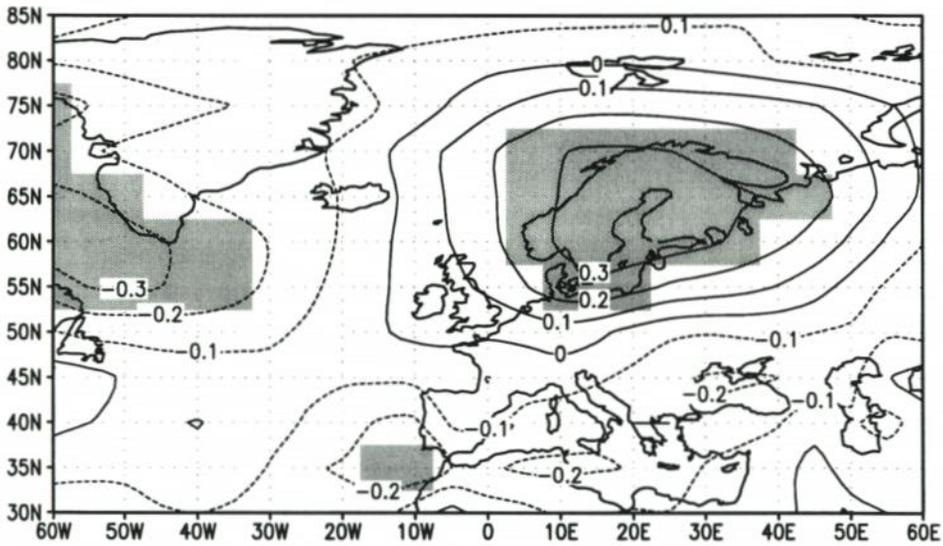
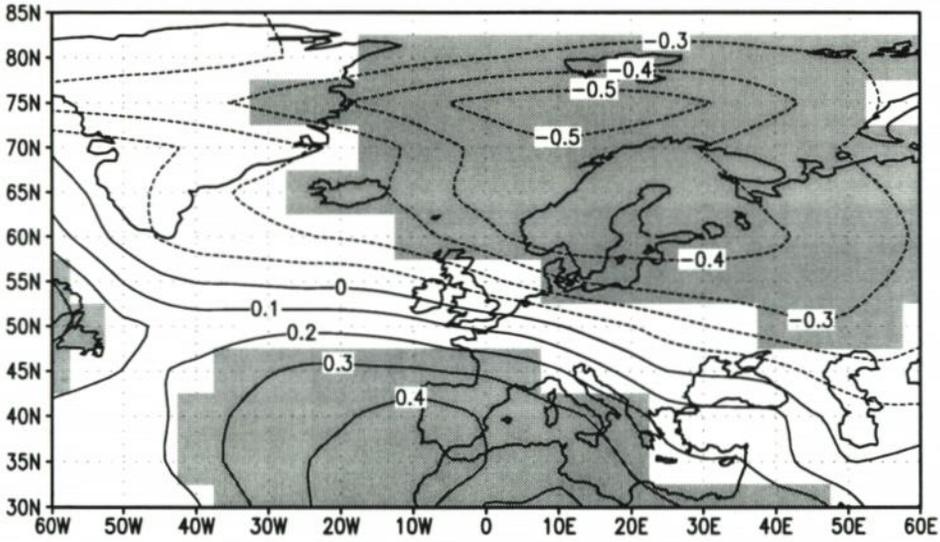


Abb. 6: Korrelationsfelder zwischen dem Monatsmittel der Wassertemperatur des FS Gedser Rev und dem Bodenluftdruck (1899-1976) im nordatlantisch-europäischen Gebiet. Oben: Januar, unten: Juli. Im grau unterlegten Gebiet sind die Korrelationskoeffizienten mit einer Wahrscheinlichkeit von $\geq 95\%$ signifikant von Null verschieden

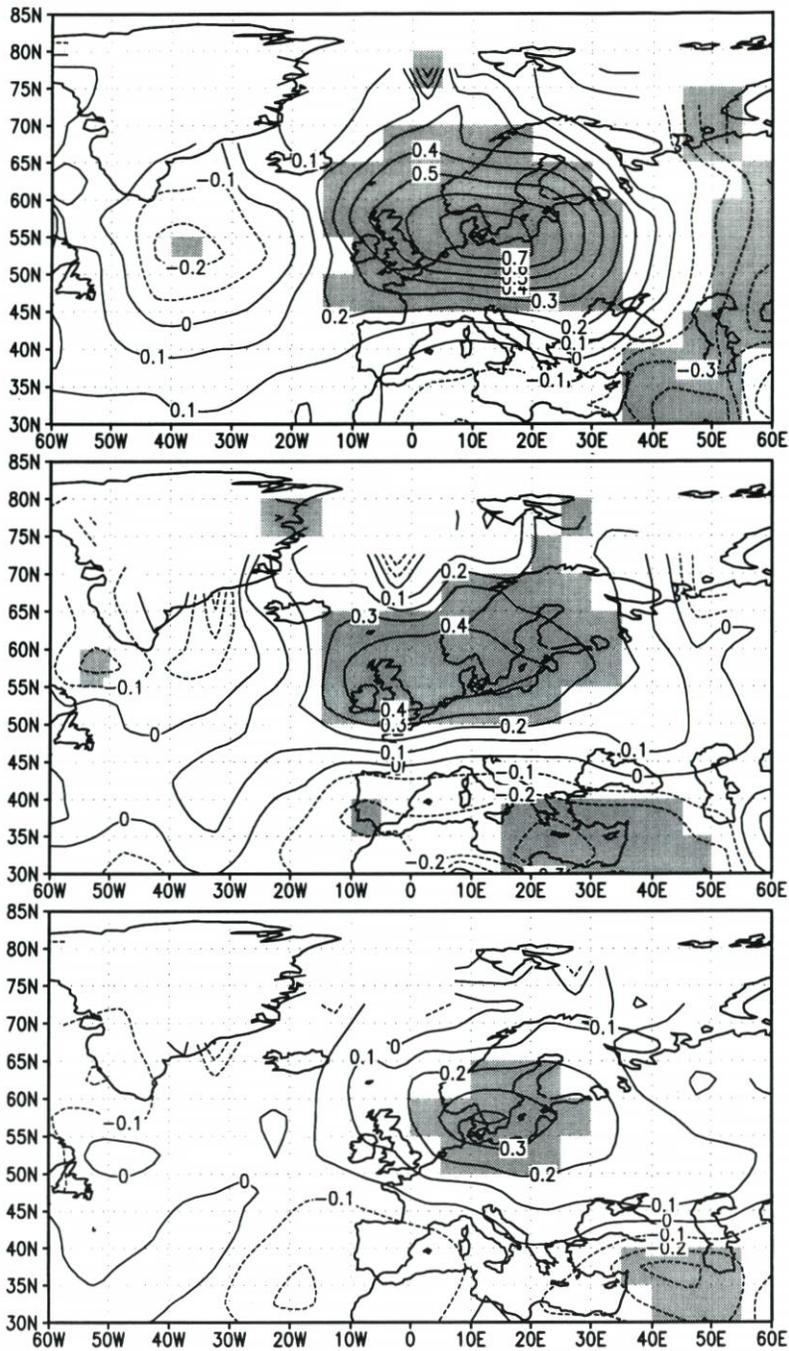


Abb. 7: Korrelationsfelder zwischen dem Monatsmittel der Wassertemperatur des Monats Juli des FS Gedser Rev und der bodennahen Lufttemperatur (1897–1976) im nordatlantisch-europäischen Gebiet. Oben: Juli, Mitte: Juni, unten: Mai. Im grau unterlegten Gebiet sind die Korrelationskoeffizienten mit einer Wahrscheinlichkeit von $\geq 95\%$ signifikant von Null verschieden. Korrelationskoeffizienten an Gitterpunkten mit weniger als 30 Werten sind nicht dargestellt

mit TW = Monatsmittel der Wassertemperatur in °C, a = Regressionskonstante, b, c, d = Regressionskoeffizienten, TT = Monatsmittel der Lufttemperatur des Gebietes 50–60° N, 5–15° E in °C. Die Indizes stehen für 0 = gleicher Monat, -1 = Vormonat, -2 = vor 2 Monaten. In die Regressionsgleichung geht zunächst der Prädiktor mit dem höchsten Korrelationskoeffizienten zum Prädiktanden ein. Das ist stets die Lufttemperatur des gleichen Monats. Danach geht der Prädiktor mit der höchsten Korrelation zu den Residuen usw. ein bis keine signifikante Korrelation zwischen den Residuen und dem potentiellen Prädiktor mehr vorliegt.

Die Tab. 2 gibt eine Übersicht über die verwendeten Variablen und die Güte der Regressionsgleichung. Das Einbeziehen der Lufttemperatur der beiden Vormonate bringt insbesondere im Winterhalbjahr eine deutliche Verbesserung der Güte des Regressionsmodells. Jetzt können zwischen 61 % und 84 % der Varianz des Prädiktanden erklärt werden.

Tab. 2: Multiple lineare Regressionsgleichung: Variablen in der Regressionsgleichung, Korrelationskoeffizient zwischen der Wassertemperatur und der Lufttemperatur des gleichen Monats r_0 und multipler Korrelationskoeffizient r_m sowie Angabe des rmse-Wertes und der erklärten Varianz

| Monat | Variable in der Regressionsgleichung | r_0 | r_m | rmse in K | erklärte Varianz in % |
|-----------|---|-------|-------|-----------|-----------------------|
| Januar | TT ₀ , TT ₋₁ | 0,58 | 0,86 | 0,41 | 73,9 |
| Februar | TT ₀ , TT ₋₁ , TT ₋₂ | 0,70 | 0,88 | 0,38 | 77,5 |
| März | TT ₀ , TT ₋₁ , TT ₋₂ | 0,78 | 0,91 | 0,40 | 83,1 |
| April | TT ₀ , TT ₋₁ , TT ₋₂ | 0,77 | 0,92 | 0,40 | 84,3 |
| Mai | TT ₀ , TT ₋₁ , TT ₋₂ | 0,74 | 0,85 | 0,50 | 72,3 |
| Juni | TT ₀ , TT ₋₁ , TT ₋₂ | 0,67 | 0,79 | 0,61 | 61,3 |
| Juli | TT ₀ , TT ₋₁ | 0,77 | 0,80 | 0,68 | 68,2 |
| August | TT ₀ , TT ₋₁ | 0,80 | 0,86 | 0,64 | 73,4 |
| September | TT ₀ , TT ₋₁ | 0,79 | 0,86 | 0,60 | 74,0 |
| Oktober | TT ₀ , TT ₋₁ , TT ₋₂ | 0,74 | 0,84 | 0,47 | 71,0 |
| November | TT ₀ , TT ₋₁ | 0,71 | 0,86 | 0,41 | 73,8 |
| Dezember | TT ₀ , TT ₋₁ , TT ₋₂ | 0,76 | 0,91 | 0,38 | 82,7 |

In den Monaten Januar bis März kommt es in sehr strengen Wintern gelegentlich zur Berechnung von Wassertemperaturen unterhalb der Schmelztemperatur des Eises. Eine Randbedingung setzt in diesem Fall die Wassertemperatur gleich der Schmelztemperatur des Eises.

Zwischen den beobachteten und den mit dem Regressionsmodell berechneten Wassertemperaturen bestehen keine signifikanten Unterschiede. Die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung zwischen den mit dem Regressionsmodell bestimmten Wassertemperaturen und den gemessenen Werten (rmse) liegt für das FS Gedser Rev zwischen 0,38 K im Februar und 0,68 K im Juli. Die Methode ist also geeignet, die Monatsmittel der oberflächennahen Wassertemperaturen zu simulieren. Es ist ebenfalls möglich, die vorhandenen Lücken zu schließen, was dazu führt, dass in den Wintermonaten auch die Jahre mit Eisbedeckung berücksichtigt werden, so dass diese in die Statistik eingehen.

2.7 Die Wassertemperatur im Klimamodell ECHAM4/OPYC3

2.7.1 Das Klimamodell

Das gekoppelte globale Klimamodell ECHAM4/OPYC3, bestehend aus dem Atmosphärenmodell ECHAM4 (ROECKNER et al., 1996, S. 1 ff.) und dem Ozeanmodell OPYC3 (OBERHUBER, 1993, S. 808 ff.), entstand in Zusammenarbeit zwischen dem Max-Planck-Institut für Meteorologie und dem Deutschen Klimarechenzentrum (beide in Hamburg). Das Atmosphärenmodell hat eine Auflösung von je 2,8° in zonaler und meridionaler Richtung.

Von diesem Modell werden hier zwei Experimente verwendet. Im Kontrolllauf, der das heutige Klima simuliert, bleibt die Konzentration der Treibhausgase auf dem Niveau von 1995 konstant, während diese im Treibhausgasexperiment von 1860 bis 1990 gemäß den Beobachtungen und danach bis zum Jahr 2100 gemäß dem Treibhausgasszenario IS92a (HOUGHTON et al., 1996, S. 23) ansteigt. Sulfat-Aerosole, die die Erwärmung abschwächen, sind in diesen Modellläufen noch nicht berücksichtigt.

2.7.2 Die Wassertemperaturen in zwei Szenarien

Den beiden Experimenten des Klimamodells wurden monatsweise die Lufttemperaturreihen in Bodennähe des Gebietes 50–60° N und 5–15° E entnommen. Wegen der höheren Auflösung im Klimamodell ist dieses Gebiet durch 9 Gitterpunkte repräsentiert. Die Monatsmittel der Wassertemperatur vom FS Gedser Rev werden gemäß den beiden Experimenten mit den multiplen linearen Regressionsgleichungen berechnet.

Im Kontrolllauf ändern sich die Verhältnisse während des gesamten Simulationszeitraumes nur wenig. Im Treibhausgasexperiment bleiben die Wassertemperaturen von 1860 bis etwa 1980 nahezu konstant. Danach setzt ein drastischer Temperaturanstieg ein, so dass am Ende des Simulationszeitraumes in allen Monaten eine deutliche Erwärmung um 3 bis 4 K gegenüber den heutigen Verhältnissen zu verzeichnen ist. Diese Temperaturänderung entspricht etwa der Änderung der Lufttemperatur im betrachteten Gebiet 50–60° N, 5–15° E.

Die berechneten Änderungen der Wassertemperatur sind kritisch zu bewerten. Einerseits wird im Treibhausgasszenario von einer unveränderten exponentiellen Zunahme der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre bis zum Jahr 2100 ausgegangen. Andererseits sind die Schwefelaerosole, deren abkühlende Wirkung erst in letzter Zeit erkannt wurde, noch nicht enthalten. Die Änderungsraten im Treibhausgasexperiment dürften sich also im oberen Bereich des Möglichen bewegen. Außerdem befindet sich das Regressionsmodell bei Temperaturänderungen von 3–4 K schon im Grenzbereich des durch Beobachtungswerte belegten Wertebereiches.

3. Das thermische Behaglichkeitsgefühl im Strandbereich

3.1 Einführung

Neben den Verhältnissen im Wasser wurden auch die thermischen Bedingungen der Luft in 2 m Höhe im Strandbereich untersucht. Dabei konnte allerdings nur der Zeitraum von 1966–1990 berücksichtigt werden, so dass Trendaussagen nicht möglich sind.

3.2 Das Klima-Michel-Modell des Deutschen Wetterdienstes

Das Klima-Michel-Modell (KMM) des Deutschen Wetterdienstes (JENDRITZKY et al., 1990, S. 7 ff.) stellt ein thermophysologisch bewährtes Werkzeug zur Beschreibung der atmosphärischen Bedingungen der Wärmeabgabe des Menschen dar. Der Klima-Michel ist ein Standard-Mensch männlichen Geschlechts mit einer Größe von 1,75 m und einer Masse von 75 kg. Er hat einen definierten Arbeitsumsatz, der von der körperlichen Aktivität abhängt und eine Bekleidung mit einem bestimmten Isolationsfaktor (I in clo).

Die Diskomfortgleichung von FANGER (1972, S. 21) ist neben einem Strahlungsmodell Kern des KMM. Es wird die Wärmebilanz aufgrund des aktivitätsbezogenen Energieumsatzes unter Berücksichtigung der Bekleidung und der meteorologischen Bedingungen der Wärmeabgabe berechnet. Diese hängen von der Lufttemperatur und dem Dampfdruck in 2 m Höhe, der Windgeschwindigkeit in 1 m Höhe (von 10 m Meßhöhe reduziert) und der mittleren Strahlungstemperatur (beschreibt die Summe der einzelnen Strahlungsflüsse auf den Menschen) ab. Die 4 Größen werden aus Routinemessungen der Wetterstationen berechnet.

Um eine bessere Vergleichbarkeit mit bisherigen Untersuchungen herzustellen (JENDRITZKY und VOLLWEITER, 1993, S. 1 ff.), wurden die Berechnungen zunächst mit den Randbedingungen: Gehen mit 4 km/h, das entspricht einer inneren Wärmeproduktion von $140,0 \text{ W/m}^2$, und einer Bekleidung von 1,0 clo, das entspricht einem korrekten Straßenanzug, durchgeführt.

Ziel des Modells ist die Berechnung des *Predicted Mean Vote* (PMV). Er gibt Auskunft über das thermische Empfinden des Menschen unter den synoptischen und den oben beschriebenen Randbedingungen (Tab. 3). Bei der oben angegebenen Aktivität entspricht ein PMV von ± 1 etwa $\pm 30 \text{ W/m}^2$.

Tab. 3: Thermisches Empfinden und Belastungsstufe in Abhängigkeit vom PMV-Wert (jeweils $\pm 0,5$)

| PMV-Wert | Thermisches Empfinden | Belastungsstufe |
|----------|-----------------------|--------------------|
| <-3,5 | sehr kalt | extreme Belastung |
| -3 | kalt | starke Belastung |
| -2 | kühl | mäßige Belastung |
| -1 | leicht kühl | schwache Belastung |
| 0 | behaglich | keine Belastung |
| 1 | leicht warm | schwache Belastung |
| 2 | warm | mäßige Belastung |
| 3 | heiss | starke Belastung |
| >3,5 | sehr heiss | extreme Belastung |

3.3 PMV-Werte für Rostock-Warnemünde

Die direkt an der Ostseeküste in den Dünen gelegene Wetterstation Rostock-Warnemünde ist für die Untersuchungen des Behaglichkeitsgefühls des Menschen am Strand sehr gut geeignet. Vom Deutschen Wetterdienst wurden die routinemäßigen Wettermeldungen für den Zeitraum von 1966 bis 1990 zur Verfügung gestellt. Als Termin wurde einheitlich 12 UTC gewählt.

Von den vier oben genannten Größen zeigen die ersten drei einen ausgeprägten Jahresgang (Abb. 8). Die mittlere Windgeschwindigkeit beträgt ganzjährig etwa 4 m/s. Während die Lufttemperatur und der Dampfdruck ihre höchsten Werte im August erreichen, weist die mittlere Strahlungstemperatur ein breites, sich von Mai bis August erstreckendes Maximum auf. Offenbar verschieben sich die Anteile von direkter Sonnenstrahlung (Maximum im Juni) und Strahlung der Umgebungsflächen (Maximum im August) im Laufe des Sommers.

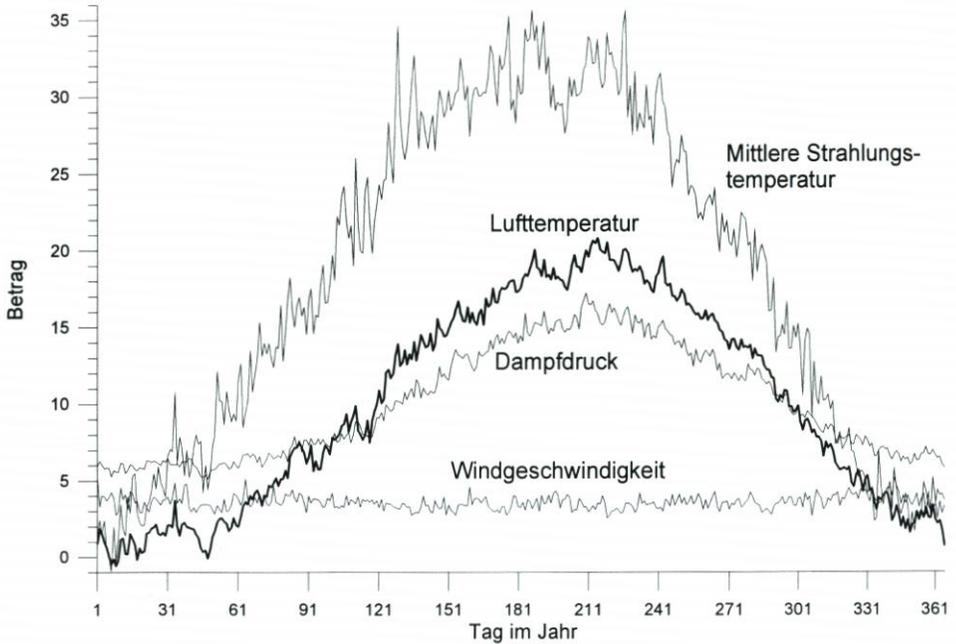


Abb. 8: Mittlere 12 UTC-Werte der mittleren Strahlungstemperatur in °C, der Lufttemperatur in 2 m in °C, des Dampfdruckes in hPa und der Windgeschwindigkeit in 1 m Höhe in m/s (Warnemünde: 1966–1990)

Der aus diesen 4 Größen berechnete PMV-Wert zeigt ebenfalls einen ausgeprägten Jahresgang (Abb. 9), welcher von einem langsamen Anstieg in der ersten Jahreshälfte bis zu maximalen Werten im August gekennzeichnet ist. Der Abfall im Herbst erfolgt relativ rasch. Die unregelmäßigen Abweichungen der mittleren Tageswerte von einer Sinusfunktion können teilweise mit den im Jahresverlauf auftretenden Singularitäten (Weihnachtstauwetter) erklärt werden.

Im Jahresverlauf überwiegen bei dieser körperlichen Aktivität und der Standardbekleidung Kältereize (Abb. 9). In den Übergangsmonaten Mai und Juni sowie im September und Oktober stellt sich im Mittel eine thermische Behaglichkeit ein. Nur in den Sommermonaten Juli und August treten leichte Wärmebelastungen auf. Das Maximum mit einem PMV = 1 (leicht warm) wird erst im August erreicht.

Da die Standardbekleidung des Klima-Michels an der Küste im Winterhalbjahr und im Sommer ungeeignet ist, wurde deshalb im Modell die Bekleidung des Klima-Michels entsprechend den meteorologischen Bedingungen im Bereich von $I = 0,5$ clo (Sommerbekleidung) bis $I = 1,75$ clo (Winterbekleidung) mit dem Ziel des Erreichens von thermischem



Abb. 9: Jahresgang des PMV von Warnemünde (1966–1990). Fett: Standardbedingungen ($I = 1,0$ clo und Gehen mit 4 km/h), durchbrochen: Variation der Bekleidung im Bereich von $I = 0,5 \dots 1,75$ clo

Komfort angepasst. Dadurch verlängert sich der Zeitraum mit thermischer Behaglichkeit deutlich (Abb. 9). Leichte Kältereize liegen jetzt im Mittel nur noch in den drei Wintermonaten vor, während sich ebenfalls leichte Wärmebelastungen auf den Hochsommer beschränken. Es sei noch angemerkt, dass bei starker Sonneneinstrahlung eine weitere Reduktion der Bekleidung auf z. B. $I = 0,1$ clo (Badebekleidung) eine Erhöhung des PMV nach sich ziehen kann, da der verstärkte Strahlungsgewinn die erhöhte turbulente Wärmeabgabe überkompensiert. Im Mittel der Jahre 1966 bis 1990 gibt es pro Jahr 251 Tage mit thermischen Komfort, 23 Tage mit Wärme- und 91 Tage mit Kältereiz.

Bei der Untersuchung der Korrelation zwischen dem PMV und den 4 Größen zeigt sich, dass insbesondere mit der Lufttemperatur enge Beziehungen bestehen. Der Korrelationskoeffizient zwischen den jeweils um den mittleren Jahresgang bereinigten Reihen beträgt $r = 0,86$. Daraus kann die vorläufige Schlussfolgerung gezogen werden, dass sich im Fall einer Erwärmung die Häufigkeit des Auftretens thermischer Behaglichkeit im Strandbereich der deutschen Ostseeküste spürbar erhöhen wird. Das wird auch bei dem folgenden einfachen Sensitivitätsexperiment deutlich. Dazu wurde für den Beobachtungszeitraum 1966–1990 die mittlere Anzahl der Tage mit Wärmebelastung bzw. Kältereiz und thermischen Komfort bei Variation der Lufttemperatur im Bereich $\Delta T = -5 \dots +5$ K in 0,1 K-Schritten und ansonsten gleichen meteorologischen Bedingungen berechnet (Abb. 10). An der Stelle $\Delta T = 0,0$ K gelten die oben schon angegebenen Beobachtungswerte. Im Fall einer Abkühlung wie auch bei einer Erwärmung kommt es zu deutlichen Veränderungen. Insgesamt steigt der Anteil der Tage mit thermischem Komfort beim Durchlaufen des Intervalls von $\Delta T = -5 \dots +5$ K leicht an. Die Zahl der Tage mit Kältereiz nimmt stark ab, während Tage mit Wärmebelastung wesentlich häufiger zu erwarten sind. Man erkennt, dass es sich hierbei um einen nichtlinearen Prozess handelt.

Auf der Abszisse sind die Jahre aufgetragen, in denen die Jahresmitteltemperatur des Gebietes 50–60° N, 5–15° E im Treibhausgasexperiment die entsprechende Temperaturänderung zum Mittelwert 1901–1990 erreicht. Daraus geht hervor, dass sich im Fall einer anthropogenen Klimaänderung gemäß dem Treibhausgasexperiment des Klimamodells ECHAM4/OPYC die thermischen Komfortbedingungen an der deutschen Ostseeküste deutlich verbessern, die Kältereize stark abnehmen und die Wärmebelastungen, welche vom Strandbesucher eher toleriert werden, zunehmen. Da das Klimamodell neben anderen Unsicherheiten noch nicht die abkühlende Wirkung der Sulfat-Aerosole enthält, sind die in der Abb. 10 hervorgehenden Veränderungen als obere Grenze anzusehen.

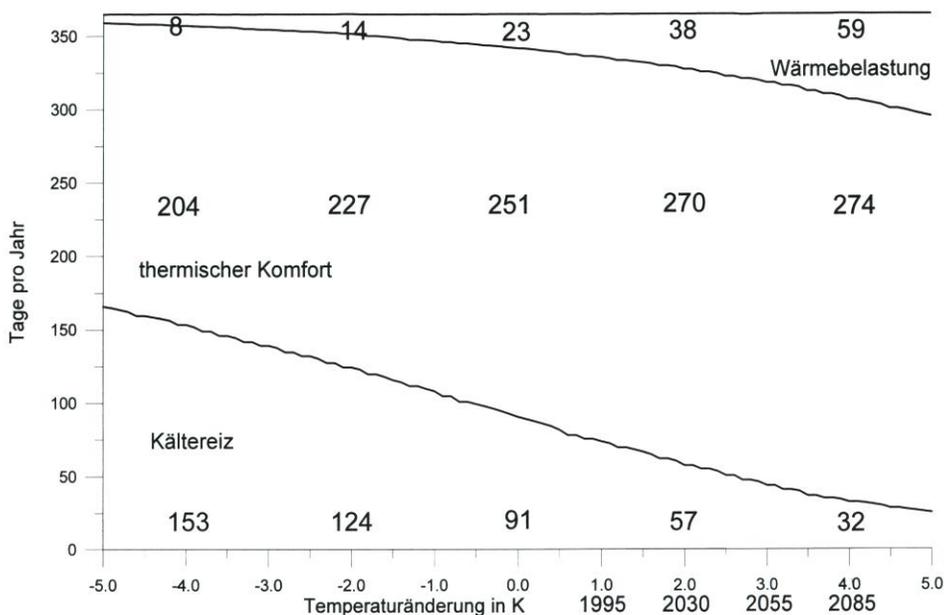


Abb. 10: Mittlere Anzahl der Tage mit verschiedenem thermischen Empfinden pro Jahr in Warnemünde (1966–1990) um 12 UTC bei alleiniger Änderung der Lufttemperatur im Bereich von $T = -5 \dots +5$ K

4. Schlussbemerkung

Aus den durchgeführten Untersuchungen kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass über die Veränderungen des thermischen Regimes in der ufernahen Zone und im Seegebiet vor der deutschen Ostseeküste ein bedeutender Impact des zu erwartenden Klimawandels ausgeübt wird. Auf der Grundlage der gegenwärtigen Klimamodellrechnungen kann angenommen werden, dass in allen Monaten eine spürbare Erhöhung der Wassertemperatur eintreten wird. Dieser Temperaturanstieg korrespondiert mit der Zunahme der Lufttemperatur, so dass das gesamte Milieu im Küstenbereich im Mittel durch eine Erwärmung gekennzeichnet sein wird. Die Analyse der beobachteten Zeitreihen der Wassertemperatur gestattet Rückschlüsse auf die erhebliche Variabilität der Oberflächenwassertemperatur, die auch unter veränderten Klimabedingungen voraussichtlich erhalten bleibt. Die Auswirkungen der erwarteten allgemeinen Temperaturerhöhung betreffen im Winter den starken Rück-

gang des Auftretens von Eis, die allgemeinen ökologischen Verhältnisse in allen Küstengewässern sowie den wichtigen Wirtschaftszweig Erholung und Tourismus. Während eine spürbare Erwärmung für die Bodden und Haffe eine unerwünschte Eutrophierung begünstigen dürfte und damit ein nachteiliger Effekt eintreten kann, so wird der Klimawandel voraussichtlich für Erholung und Tourismus Vorteile im Hinblick auf die Häufigkeit des Auftretens optimaler Erholungsbedingungen mit sich bringen.

5. Danksagung

Die Untersuchung wurde zwischen 1995 und 1998 dankenswerterweise durch das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie unter der Vorhabensnummer 01LK9394/3 gefördert. Wir danken den in der Legende der Abb. 1 aufgeführten Institutionen für die Bereitstellung der Wassertemperaturreihen, Herrn Dr. E. ROECKNER vom Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, für die Überlassung der Klimamodelldaten und die Beratung, Herrn Dr. G. JENDRITZKY vom Deutschen Wetterdienst, Freiburg, für die Überlassung des Klima-Michel-Modells und der Synop-Daten von Warnemünde sowie die fachliche Unterstützung und dem National Center for Atmospheric Research in Boulder, USA, für die Bereitstellung des Bodenluftdruckdatensatzes.

6. Schriftenverzeichnis

- CHADWYCK-HEALEY Ltd.: World Climate Disc – Global Climatic Change Data on CD-ROM. From the Climatic Research Unit at the University of East Anglia, UK. Cambridge, 1992.
- FANGER, P. O.: Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Analysis. McGraw-Hill, New York, 1972.
- GERSTENGARBE, F. W.: Studie zur Anpassung theoretischer Verteilungsfunktionen an empirische Verteilungen meteorologischer Größen (unveröff.). Meteorologischer Dienst der DDR, Potsdam, 1983.
- GOEDECKE, E.: Zur „klimatischen“ Verlängerung der Badesaison an der deutschen Nordseeküste. Med.-Meteorol. Hefte Jg. 9, 1953.
- HAAPALA, J. u. ALENIUS, P.: Temperature and Salinity Statistics for the Northern Baltic Sea. Finnish Marine Research No. 262, 1994.
- HOUGHTON, J. T.; MEIRA FILHO, L. G.; CALLANDER, B. A.; HARRIS, N.; KATTENBERG, A. and MASKELL, K. (eds.): Climate Change. The science of climate change. Cambridge University Press, 1996.
- HUPFER, P.: Meeresklimatische Veränderungen im Gebiet der Beltsee seit 1900. Veröff. Geophys. Inst. Karl-Marx-Univ. Leipzig, 2. Ser., 17, 1962a.
- HUPFER, P.: Die säkulare Erwärmung von Luft und Wasser im Gebiet der Beltsee im Sommer und die Auswirkung auf die Dauer der Badesaison. Angewandte Meteorologie Bd. 4, H. 4, 1962b.
- HUPFER, P.: Über die Eigenschaften des Wassertemperaturfeldes in der ufernahen Zone der westlichen Ostsee. Geophys. Veröff. d. Karl-Marx-Univ. Leipzig Jg. 1, 1974.
- HUPFER, P.: Unsere Umwelt: das Klima: globale und lokale Aspekte. B.G. Teubner Verlagsgesellschaft Stuttgart und Leipzig, 1996.
- JENDRITZKY, G.; MENZ, G.; SCHMIDT-KESSEN, W. u. SCHIRMER, H.: Methodik der räumlichen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). ARL-Verlag Hannover, Akademie f. Raumforschung und Landesplanung, Beiträge 114, 1990.
- JENDRITZKY, G. u. VOLLWEITER, A.: Bioklimakarte Europa. Abschlußbericht K17 (unveröff.). DWD-ZMMF, 1993.

- KOSLOWSKI, G.: Die flächenbezogene Eisvolumensumme, eine neue Maßzahl für die Bewertung des Eiswinters an der Ostseeküste Schleswig-Holsteins und ihr Zusammenhang mit dem Charakter des meteorologischen Winters. Dt. hydrogr. Z. 42, 1989.
- MATTHÄUS, W.: Temperatur, Salzgehalt und Dichte. In: Rheinheimer, G. (Hrsg.): Meereskunde der Ostsee. Springer Verlag, 1996.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H. u. LADEWIG, N.: Über Wassertemperaturen an deutschen Küsten. Die Küste, H. 59, 1997.
- OBERHUBER, J. M.: Simulation of the Atlantic circulation with a coupled sea ice – mixed layer – isopycnal general circulation model. J. Phys. Oceanogr. 22, 1993.
- RODEWALD, M.: Auswirkung der Klimaschwankung auf die Badesaison an der See. Heilbad und Kurort 4, 1952.
- ROECKNER, E.; ARPE, K.; BENGTTSSON, L.; CHRISTOPH, M.; CLAUSSEN, M.; DÜMENIL, L.; ESCH, M.; GIORGETTA, M.; SCHLESE, U. u. SCHULZWEIDA, U.: The atmospheric general circulation model ECHAM4: Model description and simulation of present-day climate, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report 218, 1996.
- SCHMELZER, N.: Die Eisverhältnisse in den Küstengebieten von Mecklenburg-Vorpommern. Die Küste, H. 56, 1994.
- SCHÖNWIESE, C.-D.: Praktische Statistik. 2. verb. Aufl. Gebrüder Bornträger Berlin, Stuttgart, 1992.
- SCHÖNWIESE, C.-D. u. RAPP, J.: Climate Trend Atlas of Europe. Kluwer Academic Publishers Dordrecht, Boston, London, 1997.
- TIESEL, R.: Das Wetter. In: Rheinheimer, G. (Hrsg.): Meereskunde der Ostsee. Springer Verlag, 1995.
- TINZ, B.: Sea ice winter severity in the German Baltic in a greenhouse gas scenario. Deutsche Hydrographische Zeitschrift 50, 1998.
- TRENBERTH, K. E. u. PAOLINO, D. A. JR.: The Northern Hemisphere sea-level pressure data set: trends, errors and discontinuities. Part I: General description. Mon. Wea. Rev. 106, 1980.