

Die Vorhersage in der Meeresforschung

K. Hasselmann*)

Die verstärkte Förderung der Meeresforschung während der letzten Dekade war primär auf die Steigerung der Roh- und Nährstoffnutzung des Meeres gerichtet. In jüngster Zeit hat das vielschichtige Problem der Weltversorgung jedoch weitere komplexe Aspekte hinzugewonnen, die auch für die Meeresforschung neue Aufgaben in den Vordergrund stellen. So haben die Vorhersageaufgaben durch die zunehmende Nutzbarmachung des Meeres stark an Bedeutung gewonnen — etwa die Sturmflut- oder Seegangsvorhersage oder die Vorhersage von Fischwanderungen infolge natürlicher Variation der Umweltverhältnisse. Hierbei handelt es sich um die Reaktion eines komplexen Systems auf äußere Einwirkungen — ob diese nun natürlich oder menschenbedingt sind. Wegen der technischen Grenzen der Informationsverarbeitung ist es im allgemeinen jedoch nicht möglich, das wirkliche System in vollständigem Detail vorauszusagen. Die im folgenden erläuterte Aufgabe, geschlossene Gleichungen für stark reduzierte, dafür aber vorhersagbare Teilsysteme aufzufinden, ist somit grundlegend für das gesamte Problem der Vorhersage.

Das Problem der Ungeschlossenheit

Letztlich befaßt sich jedes Gebiet der Naturwissenschaft mit der Vorhersage. Eine neue wissenschaftliche Theorie wird zunächst die bisherige Naturerfahrung in ihrem definierten Anwendungsbereich richtig beschreiben müssen. Der entscheidende Test ihrer Richtigkeit besteht aber seit jeher in der Fähigkeit zur Voraussage, d.h. in der Durchführung eines neuen Experiments mit noch unbekanntem Ausgang. Diese Voraussagekraft kann nahezu als Definition der Wissenschaft angesehen werden und ist schließlich auch die Basis ihres technischen Nutzen. Zum eigentlichen Problem, im hier gemeinten Sinne, wird die Vorhersage jedoch erst bei Systemen, deren Verhaltensgesetze zwar grundsätzlich bekannt sind, die sich aber wegen ihrer Komplexität dennoch in der Praxis einer exakten Berechnung entziehen.

Zur Erfassung nur der mittleren physikalischen Eigenschaften — Dichte, Geschwindigkeit, Temperatur — eines jeden Kubikzentimeters des Systems Ozean — Atmosphäre würde man etwa 10^{25} Daten benötigen. (Da weder der Ozean noch die Atmosphäre ein-komponentige Medien darstellen, kämen in Wirklichkeit noch weitere Konzentrationsdaten hinzu.) Es ist daher naheliegend, durch Mittelung über größere Raumbereiche die Beschreibung des Systems weiter zu vereinfachen. Im Gegensatz zur statischen Mechanik ist es aber in diesem Falle dann nicht mehr möglich, allgemein gültige, geschlossene Gleichungen für das dadurch noch

Forecasting in marine research

The concentrated advances in marine research during the last decade have primarily been directed towards increasing the yield of raw materials and nutrients from the sea. More recently, however, the manifold problem of world supplies has taken on additional and complex aspects which have also brought new tasks for marine research into the foreground. The result is that, because of increasing utilisation of the sea, the tasks of forecasting have gained very much in importance — whether they have to do with forecasting tidal waves, sea swell or forecasting fish migrations as a result of natural variations in environmental conditions. This is concerned with the reaction of a complex system to external influences — whether these are natural or man-made. Because of the technical limits in information processing, it is in general, however, not possible to forecast the actual system in complete detail. The task stated in the following article of finding an integrated formula for very reduced, but therefore predictable, partial systems is thus fundamental to the total forecasting problem.

weiter reduzierte System aufzustellen. So wäre es z.B. für viele Anwendungen ausreichend, wenn man die Meeresströmungen, -temperaturen usw. in einigen wenigen Tiefenschichten, jeweils horizontal gemittelt über einige hundert Quadratkilometer, berechnen könnte. Die auf diese Weise geglätteten Felder enthalten aber nun nicht mehr sämtliche Information, die zur vollständigen Beschreibung ihrer Dynamik benötigt wird: es zeigt sich, daß die Fluktuation kleinerer Ausdehnung, die durch die Mittelbildung nicht mehr erfaßt werden, das Verhalten der mittleren Felder ganz entscheidend mitbestimmen.

Voraussetzungen der Vorhersage

Will man also das Verhalten der mittleren Felder allein durch die gemittelten Größen beschreiben, so ist man gezwungen, diese Informationslücke durch entsprechende Annahmen zu überbrücken. Aus verschiedenen qualitativen Beobachtungen weiß man, daß die Schwankungsfelder (Turbulenz) zu einer verstärkten Durchmischung der mittleren Felder beitragen, die sich angenähert in Form einer zusätzlichen Wärmeleitfähigkeit innerer Reibung und anderer Diffusionskoeffizienten darstellen läßt. Durch gezielte Einzelversuche lassen sich diese Austauschprozesse experimentell genauer erfassen und dann mit einem entsprechenden Näherungsansatz in den gemittelten Feldgleichungen berücksichtigen. Eine exakte Wiedergabe der Austauschvorgänge ist auf diese Weise allerdings nicht zu erzielen.

Etwas günstiger liegen die Verhältnisse, sofern die Schwankungsfelder in erster Näherung als Wellenfelder dargestellt werden können, wie z.B. beim Seegang oder bei den internen Wellen, die bei

*) Prof. Dr. K. Hasselmann ist Ordinarius für Theoretische Geophysik am Institut für Geophysik, Universität Hamburg.

ausgeprägter Dichteschichtung im Innern des Ozeans auftreten. In diesem Falle sind die Wechselwirkungen „schwach“ und theoretisch berechenbar. Das Vorhersageproblem läßt sich dann durch gleichzeitige Betrachtung der mittleren Felder und der Energieverteilung der Wellenfelder in geschlossene Form bringen. Allerdings wird die simultane Vorhersage sowohl der Wellenfelder als auch der mittleren Felder wesentlich aufwendiger als für die mittleren Felder allein.

Bestimmend für die erreichbare Genauigkeit eines Vorhersageverfahrens bleibt letztlich die technische Grenze der Informationsverarbeitung. Nach der Kapazität der verfügbaren Computer richten sich die Menge und Auswahl der Daten, die das mittlere System definieren, sowie die „Parametrisierung“ der verbleibenden Schwankungsfelder mit Hilfe von Näherungsansätzen.

Die angenäherte Abbildung des wirklichen Systems in Form eines numerischen Rechenverfahrens (Computermodell) erfordert die Lösung von drei eng aufeinander bezogener Forschungsaufgaben, die allerdings allein schon wegen der rapiden Weiterentwicklung der Computertechnologie nie abgeschlossen werden können, sondern immer wieder einer erneuten verfeinerten Untersuchung unterzogen werden müssen: Zunächst wird man versuchen, in groben Zügen die Struktur des vorauszusagenden Systems zu erkunden. Hierzu gehört z.B., je nach der Vorhersageaufgabe, die Bestimmung der Temperatur- und Salzverteilungen, der Konzentrationen gelöster Stoffe und Gase, der Strömungssysteme sowie der jahreszeitlichen, täglichen und nichtperiodischen Schwankungen dieser Felder. Ferner fallen unter diese Aufgabe die umfangreichen Ermittlungen der mit den physikalischen und chemischen Feldern gekoppelten Bioverteilungen. Als zweiten Schritt wird man dann versuchen, die beobachteten Verteilungen kausal zu erklären. Dies erfordert wesentlich genauere Untersuchungen der unzähligen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten des Systems. Schließlich bleibt dann die Aufgabe, das sich hierbei abzeichnende, im allgemeinen äußerst komplexe Bild auf ein idealisiertes Modell zu reduzieren, das sich noch in einem Computer berechnen läßt.

Für den routinemäßigen Einsatz der Vorhersageverfahren wäre dann noch als vierte Voraussetzung die Schaffung geeigneter Beobachtungsstationen oder Meßnetze zu nennen, die die Eingangsdaten für die Vorhersage liefern. Auf diese wichtigen „Monitor“-Aufgaben soll aber im folgenden nicht näher eingegangen werden, da sie nicht unmittelbar zu den hier betrachteten Forschungsaufgaben gehören.

Der Übergang von der ersten Erkundungsaufgabe zu den folgenden Phasen der kausalen Erfassung und modelltheoretischen Vorhersage ist durch eine starke Erhöhung des Forschungsaufwandes gekennzeichnet. Die traditionelle Form ozeanographischer Erkundung, die Expedition mit einem einzigen Forschungsschiff, gibt im allgemeinen wenig Einblick in die Wechselwirkungsprozesse, die zur Ausbildung der beobachteten Feldstrukturen führen. Diese sind nämlich durch Stichprobenmessungen an einigen Orten und zu einzelnen Zeiten nicht hinreichend zu erfassen, sondern nur durch systematische Auflösung der raum-zeitlichen Strukturen der Schwankungs- und mittleren Felder. Hierzu müssen aber Messungen über längere Zeiträume an mehreren Orten zugleich durchgeführt werden – eine Aufgabe, die nur durch den gleichzeitigen Einsatz mehrerer Schiffe oder durch die Auslegung dichter Meßnetze automatisch registrierender Instrumente zu bewältigen ist. Wegen des hohen Aufwandes lassen sich solche Projekte durchweg nur in Zusammenarbeit mehrerer Institute realisieren. Neben dem größeren Meßaufwand müssen zur Verarbeitung der um viele Größenordnungen gesteigerten Datenmengen, die bei kontinuierlicher, gleichzeitiger Registrierung an mehreren Meßstellen anfallen, dann noch zusätzlich wesentlich erweiterte Datenverarbeitungskapazitäten geschaffen werden. Es versteht sich, daß große Computerkapazitäten ebenfalls für die Entwicklung numerischer Modelle in der dritten Forschungsstufe benötigt werden.

zitäten ebenfalls für die Entwicklung numerischer Modelle in der dritten Forschungsstufe benötigt werden.

Noch stehen wir sehr am Anfang unserer Bemühungen, über die Erkundung der Felder hinaus in die Struktur der Wechselwirkungsprozesse vorzudringen. Erst in den letzten Jahren konnten Meßgeräte entwickelt werden, die auch unter den enormen Druckbelastungen mehrerer Kilometer Wassersäule wichtige Größen wie die Strömungsgeschwindigkeit, die Temperatur oder den Druck über längere Zeiträume zuverlässig registrieren können. Unsere Kenntnisse der Schwankungsfelder und Austauschvorgänge im Innern des Ozeans sind noch dementsprechend rudimentär. Messungen in den obersten Schichten des Meeres oder an der Meeresoberfläche sind mit etwas geringeren technischen Schwierigkeiten verbunden. So lassen z.B. die jahrzehntelangen Wasserpegelregistrierungen an einzelnen Orten recht zuverlässige empirische Wasserstandsvorhersagen an diesen Meßorten zu. Mit numerischen Modellen hat man auch für kleinere Gebiete (im wesentlichen fast geschlossene Meeresbassins) brauchbare Wasserstandsvorhersagen erzielen können. Aber auch in diesem Falle ist es wegen der unbekanntenen Wechselwirkungen im Innern des Meeres und auf den flachen Randschelfen bisher nicht gelungen, die Tiden für das Meeressystem als Ganzes richtig vorherzusagen. Wir stehen hier noch an etwa der gleichen Stelle wie vor 200 Jahren *Laplace*, der als erster die Theorie der Tiden ohne Berücksichtigung der Austauschprozesse in ihre auch heute mathematisch gültige Form brachte.

Erfahrungen in der Meteorologie und bei einigen älteren Vorhersageproblemen der Meeresforschung zeigen, daß frühzeitig entwickelte numerische Verfahren, obwohl zum Anfang noch unzuverlässig, recht befruchtend auf die Erforschung der Wechselwirkungsprozesse zurückwirken. Es entwickelt sich die Vorhersage hierdurch als iterativer Prozeß, bei dem die Verbesserung der numerischen Verfahren und die genauere Erfassung der Wechselwirkungen sich gegenseitig motivieren und steuern.

Seegangsvorhersage als Beispiel

Zur Verdeutlichung der Beziehungen zwischen den verschiedenen Forschungsaufgaben der Vorhersage betrachten wir ein einfaches Beispiel, das, (für die Meeresforschung) bereits relativ weit entwickelt, gleichwohl noch keineswegs bis zur routinemäßigen Anwendung durchgeführt werden konnte. Der Seegang vereinigt zugleich zwei Aspekte des Vorhersageproblems: Zunächst gilt er unmittelbar als Objekt der Vorhersage. Da die meisten Tätigkeiten am Meer mehr oder minder stark vom Seegang beeinträchtigt werden, bedeutet die rechtzeitige Warnung vor ungünstigen Seegangszuständen einen wichtigen Faktor in den Operationen vieler bedeutender Erwerbszweige. Nach vorsichtigen Schätzungen würde in den USA eine genauere Seegangsvorhersage für Fischerei, Schifffahrt, Küstenschutz, Rohstoffgewinnung auf den Meeresschelfen usw. eine jährliche Ersparnis von ca. 100 Mio. Dollar ermöglichen. Für Europa dürften sich vergleichbare Zahlen ergeben. Andererseits ist der Seegang ein wichtiger Teil der Bewegungsvorgänge an der Grenzfläche Ozean/Atmosphäre. Die Austauschprozesse an dieser Grenzfläche sind entscheidend für die Bewegungs- und Energiebilanz sowohl der Atmosphäre als auch des Ozeans. Die meisten dieser Prozesse werden mehr oder minder stark vom Seegang beeinflusst: Die Anfachung der Meeresströmung durch den Wind, die sich gleichzeitig als Bremsung des atmosphärischen Windsystems äußert, geschieht weitgehend über den Seegang als Zwischenglied. Die Durchmischung der oberen Schichten des Meeres, die die Stärke und Tiefe der windgetriebenen Meeresströmungen sowie die Temperaturverteilung nahe der Oberfläche bestimmen, ist ebenfalls zumindest teilweise auf den Seegang zurückzuführen. Über

die Oberflächentemperaturen übt der Seegang somit auch indirekt Einfluß auf den Wärmeaustausch mit der Atmosphäre aus, der für Wetter und Klima maßgebend ist. Eine ähnliche Kopplung des Seegangs besteht mit den Verteilungen anderer Größen, z.B. mit dem Austausch zwischen Ozean und Atmosphäre des – ebenfalls das Klima beeinflussenden – Kohlendioxids sowie mit den Konzentrationen von Sauerstoff, Salz, Nährstoffen und Mineralien in den oberen, von der Sonne durchlichteten Schichten des Meeres, die für die Lebenszusammensetzung maßgebend sind. Der Seegang ist somit eines der wichtigeren Schwankungsfelder, deren Wechselwirkungen verstanden werden müssen, um die mittleren Felder im Ozean sowie die langfristige Entwicklung des Systems Ozean – Atmosphäre vorhersagen zu können.

Trotz seiner komplexen Unregelmäßigkeit läßt sich der Seegang noch mit am einfachsten von allen Schwankungsfeldern des Ozeans beschreiben. Er kann nämlich als eine Überlagerung vieler einzelner (sinusförmiger) Wellen aufgefaßt werden, die sich jede mit ihrer eigenen, ihrer Wellenlänge (bzw. Frequenz) entsprechenden Geschwindigkeit fortpflanzt. Die Unregelmäßigkeit des Seegangs entsteht dabei durch die zufällige Überlagerung der Wellenberge und -täler dieser einander durchkreuzenden „Primärwellen“. Statistisch wird der Seegang dann vollständig dargestellt durch diese Aufteilung seiner Energie in Wellenanteile verschiedener Frequenz und Laufrichtung.

Meßtechnisch läßt sich diese Verteilung, das sog. Seegangsspektrum, aus der Frequenzanalyse der kontinuierlichen Seegangsregistrierung an einer einzelnen Meßstation ermitteln. In den letzten zwanzig Jahren sind unzählige solcher Messungen unter den verschiedensten Wind- und Strömungsbedingungen durchgeführt worden. Es kann heute gesagt werden, daß der erste Schritt zu einem Vorhersageverfahren, die Erkundung der allgemeinen Eigenschaften des vorherzusagenden Feldes, weitestgehend abgeschlossen ist.

Trotz der Fülle der Beobachtungen an einzelnen Stationen sind aber alle Versuche, hieraus ein zuverlässiges Vorhersageverfahren zu entwickeln, fehlgeschlagen: Die Messungen ergaben keinen Aufschluß über die Prozesse, die zur Entstehung des Seegangs führen. Verschiedene Ansätze, diese Unkenntnis auf empirischem Wege durch Korrelation des beobachteten Seegangsspektrums mit den ebenfalls an der Meßstation gemessenen Winden und Strömungen zu umgehen, scheiterten letztlich daran, daß der Seegang nur z.T. von den lokalen Wind- und Strömungsverhältnissen bestimmt wird. Lange atlantische Dünungen z.B. entstammen gewöhnlich Stürmen

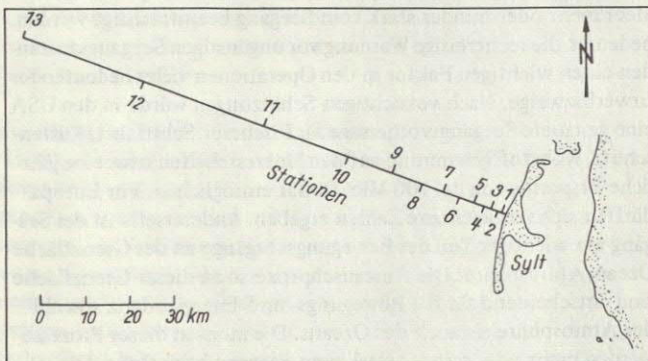


Bild 1: Meßprofil vor Sylt zur Registrierung des Seegangs sowie der Wind- und Strömungsfelder während des „Joint North Sea Wave Project“ (JONSWAP)

Fig. 1: Measuring profile off Sylt for recording sea swell together with winds and currents during the 'Joint North Sea Wave Project' (JONSWAP)

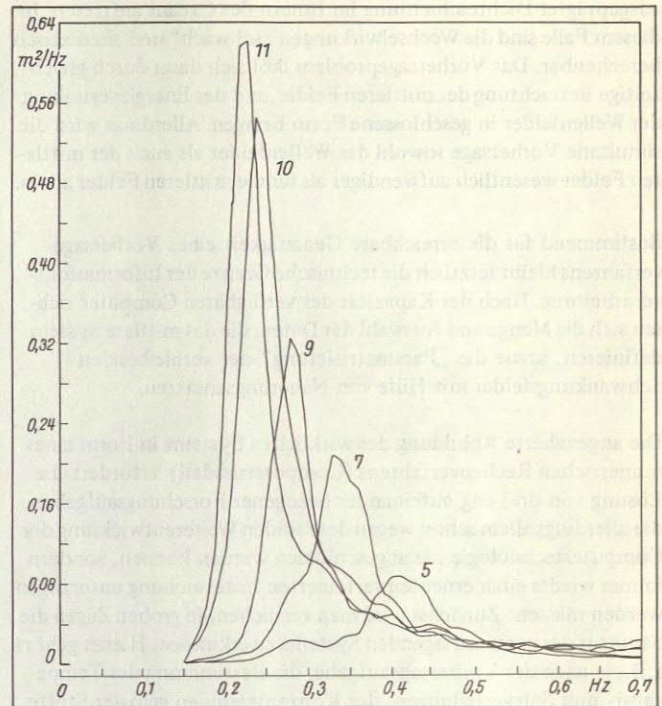


Bild 2: Entwicklung des Seegangsspektrums mit zunehmender Entfernung vom Land (Fetch) bei ablandigen (Ost-) Winden. Frequenzen sind angegeben in Hertz (Hz) = Schwingungen je Sekunde (0,2 Hz entspricht somit einer Periode von $1/0,2 = 5$ s, aus der sich eine Meeresswellenlänge von ca. 40 m berechnet).

Fig. 2: Development of the swell spectrum with increasing distance from the land (fetch) with offshore (east) winds. Frequencies are given in Hertz (Hz) = cycles per second (0.2 Hz therefore corresponds to a period of $1/0.2 = 5$ s, from which a sea wavelength of about 40 m can be calculated).

von einigen hundert bis mehreren tausend Kilometern Entfernung. In einem Extremfall hat man an der kalifornischen Küste Wellen nachweisen können, die zwei Wochen vorher in einem 20000 km entfernten Sturm in der Nähe von Ceylon erzeugt worden waren. Zur Vorhersage des vollständigen Seegangsspektrums muß man demnach die Entwicklungsgeschichte sämtlicher Wellenkomponenten unter den verschiedenen Windverhältnissen über weite Gebiete des Ozeans verfolgen – eine Aufgabe, die offensichtlich nur mit Groß-Computern gelöst werden kann. Hierzu muß vorher noch geklärt werden, wie schnell die einzelnen Wellenkomponenten durch den Wind angefacht werden, wie stark die Wellenenergie innerhalb des Spektrums durch Kopplung der Wellen untereinander übertragen wird und in welcher Form die Energie durch Schaumkronenbildung und andere Prozesse wieder vernichtet wird. Diese Vorgänge lassen sich experimentell nur durch umfangreiche simultane Messungen an mehreren Orten untersuchen.

Noch vor dem Durchführen größerer Feldexperimente zum Studium der Wechselwirkungen wurden bereits numerische Vorhersageverfahren entwickelt. Die Form der Wechselwirkung entnahm man damals (vor acht Jahren) weitgehend akzeptierten Theorien der Seegangsentstehung und der Kopplung der Wellen untereinander. Erste Versuche mit diesen Verfahren in den USA deuteten bereits an, daß die existierenden Theorien der Seegangsentstehung (die die turbulente Struktur des Windes nicht berücksichtigten) nicht zutreffen konnten und daß der Energieaustausch durch die Wellen-Wellen-Kopplung einen nicht vernachlässigbaren Term in der Gesamtenergiebilanz darstellt. Felduntersuchungen der Wechselwirkungen und der Wachstumsraten des Seegangs haben diese

Vermutungen später bestätigt – und gaben zugleich die Anregung zu neuen Theorien der Seegangsanfachung durch den turbulenten Wind und zu Verbesserungen der numerischen Vorhersage.

Die bisher umfangreichsten Felduntersuchungen der Energiebilanz des Seegangs wurden in den Sommern 1968 und 1969 vor Sylt durchgeführt. Für eine Periode von jeweils vier bis sechs Wochen wurde an dreizehn Stationen entlang eines 160 km langen ost-westlichen Profils der Seegang sowie die Wind- und Strömungsfelder gemessen (Bild 1). Bei ablandigen (Ost-) Winden konnten aus der Entwicklung des Energiespektrums mit zunehmender Entfernung vom Land (Fetch) die Wellenanfachung durch den Wind sowie der Energieaustausch innerhalb des Spektrums studiert werden (Bild 2). Die markantesten Merkmale des Spektrums – die ausgeprägte Spitze sowie die Verlagerung der Energie nach niedrigen Frequenzen (längeren Wellen) mit zunehmendem Fetch – hat sich hierbei sehr schön durch exakte Berechnungen des Energieaustausches infolge der Wellen-Wellen-Kopplung erklären lassen.

Mit der gleichen Meßanordnung ließ sich zugleich ein weiterer Prozeß untersuchen, der besonders für die Seegangsvorhersage in der Nordsee eine wichtige Rolle spielt: die Dämpfung von langen Dünungswellen im flachen Wasser. Die Bewegungen der Wasserteilchen einer Meereswelle sind nicht allein auf die Oberfläche beschränkt, sondern greifen noch etwa eine Viertelwellenlänge ins Meeresinnere hinein – im flachen Wasser somit auch bis zum Meeresboden, wobei die erhöhte Reibung der Wasserteilchen unmittelbar am Boden dann zu einer Dämpfung der Welle führt. Bild 3 zeigt ein Beispiel, in dem die Energie einer Dünung mit einer Frequenz von 0,1 Hz (d.h. mit einer Periode von $\frac{1}{0,1} = 10$ s, ent-

sprechend einer Wellenlänge von etwa 150 m) bereits auf der 50 km langen Strecke von Station 10 bis zur innersten Station 1 auf 1/3 reduziert worden ist. Die nähere Auswertung ergab hierbei, daß die

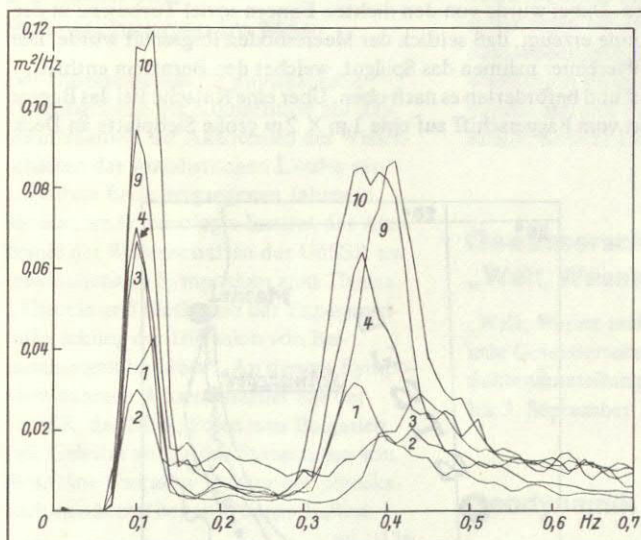


Bild 3: Dämpfung einer von Westen nach Osten laufenden Dünung mit einer Frequenz von 0,1 Hz (oder einer Periode von 10 s, entsprechend einer Wellenlänge von ca. 150 m). Die langwellige Dünung ist einer kurzwelligen, lokal generierten Windsee überlagert, deren Energie im Frequenzbereich 0,3 bis 0,5 Hz zu sehen ist.

Fig. 3: Attenuation of swell running from west to east at a frequency of 0.1 Hz (or a period of 10 s, corresponding to a wavelength of about 150 m). The long-wave swell component is superimposed by a short-wave locally-generated wind sea, whose energy can be seen to be in the range from 0.3 to 0.5 Hz.

Bild (3): Verfasser

bisher verwendeten Dämpfungsformeln in wesentlichen Punkten korrigiert werden müssen.

Erst durch diese und ähnliche Felduntersuchungen kann das theoretisch entworfene Bild der verschiedenen Wechselwirkungsprozesse erhärtet oder revidiert und somit eine quantitative Grundlage für ein numerisches Verfahren der Vorhersage gewonnen werden. Der Aufwand im Vergleich zu herkömmlichen Messungen an einzelnen Orten war in diesem Fall allerdings beträchtlich. Am „JONSWAP“ (Joint North Sea Wave Project) waren neun Institute aus vier Ländern beteiligt; es wurden sechs Schiffe sowie eine große Anzahl von Meßpfählen und -bojen, automatische Datenerfassungs- und Telemetriesysteme und eine Vielzahl weiterer Hilfsmittel eingesetzt.

Folgerungen für die Weiterentwicklung

Das hier betrachtete Beispiel ist keine Ausnahme: ähnliche und noch größere Aufwendungen ergeben sich bei Untersuchungen der ozean-atmosphärischen Wechselwirkungen größerer räumlicher Ausdehnung, bei Messungen der Austausch- und Wellenvorgänge im Innern des Meeres und bei anderen bereits durchgeführten oder geplanten Wechselwirkungsuntersuchungen. In allen Disziplinen der Meeresforschung zeigt sich, daß der Übergang von der traditionellen Aufgabe der Erkundung zu den wesentlich komplexeren Aufgaben der quantitativen Vorhersage eine größenordnungsmäßige Steigerung des Forschungsaufwandes erfordert.

In der Bundesrepublik Deutschland wurde die Entwicklung der Meeresforschung zur Großforschung frühzeitig erkannt und durch die Bemühungen der Deutschen Kommission für Ozeanographie des Bundesministeriums für Bildung und Wissenschaft, der Senatskommission für Ozeanographie der Deutschen Forschungsgemeinschaft, sowie verschiedener anderer Förderungsstellen – nicht zuletzt auch durch die dankenswerte Förderung des Stifterverbandes für die Deutsche Wissenschaft – großzügig unterstützt. Dennoch besteht gerade in der BRD die Gefahr, daß dieser Ausbau nicht rechtzeitig der steigenden Bedeutung und den speziellen Erfordernissen der Vorhersageaufgaben angepaßt wird. Zur Zeit wird die Effektivität der Forschung auf diesem Gebiet noch stark behindert durch eine wachsende Diskrepanz zwischen den ständig zunehmenden meßtechnischen Möglichkeiten zur Datengewinnung und der stagnierenden Kapazität für Datenverarbeitung. Unzureichende Computerkapazitäten behindern ebenfalls die Entwicklung numerischer Vorhersagemodelle. (In diesem Zusammenhang ist es vielleicht nicht ganz ohne Relevanz, daß der größeren Effektivität halber die Datenauswertung für JONSWAP schließlich in die USA verlegt wurde – oder daß numerische Verfahren der Seegangsvorhersage bisher nur im Ausland entwickelt worden sind.) Durch die Schaffung eines zentralen Datenverarbeitungs- und Rechenzentrums für Vorhersage- und Umweltaufgaben ließen sich diese Schwierigkeiten beheben, etwa nach dem Vorbild des in den USA von der National Science Foundation getragenen Computer-Centers in Boulder, Colorado.

Obwohl die Überwindung dieser nationalen Engpässe die Voraussetzung für den internationalen Anschluß bilden, darf doch nicht verkannt werden, daß viele der wichtigsten Vorhersageaufgaben nur in internationalem Rahmen erfolgreich gelöst werden können. Allein die Aufgabe des Monitoring, die weltweite kontinuierliche Erfassung wichtiger Parameter des Ozeans, macht dieses schon deutlich. Vom internationalen Scientific Committee of Oceanic Research (SCOR) wird daher bereits die Errichtung eines „International Advanced Institute for Physical Oceanography“ diskutiert, das vorwiegend der Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Vorhersage dienen soll.

✱

mt 024

Der vorliegende Aufsatz basiert auf einem Vortrag, gehalten vor der Jahresversammlung des Stifterverbandes für die Deutsche Wissenschaft.