

# Die Küste

ARCHIV  
FÜR FORSCHUNG UND TECHNIK  
AN DER NORD- UND OSTSEE

ARCHIVE  
FOR RESEARCH AND TECHNOLOGY  
ON THE NORTH SEA AND BALTIC COAST



3950-A-2012-00000042

# Die Küste

**ARCHIV  
FÜR FORSCHUNG UND TECHNIK  
AN DER NORD- UND OSTSEE**

**ARCHIVE  
FOR RESEARCH AND TECHNOLOGY  
ON THE NORTH SEA AND BALTIC COAST**

**HERAUSGEBER:  
KURATORIUM FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN**

**Heft 41 – 1984**

**DRUCK UND KOMMISSIONSVERLAG:  
WESTHOLSTEINISCHE VERLAGSANSTALT BOYENS & CO. HEIDE I. HOLST.**

ISSN 0452-7739  
ISBN 3-8042-0335-3

Anschriften der Verfasser dieses Hefes:



---

Das vorliegende Heft enthält den Bericht eines Ausschusses der Hafenbautechnischen Gesellschaft; der Ausschußvorsitzende, Dr.-Ing. Günter LUCK, Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, An der Mühle 5, 2982 Norderney, zeichnet für den Inhalt verantwortlich.

Nachdruck aus dem Inhalt nur mit Genehmigung des Herausgebers gestattet:  
Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen.

Vorsitzender: Ministerialrat Gerhard KRAUSE,  
Geschäftsführer: Dr.-Ing. Heinz WISMER, Feldstraße 251/253, 2300 Kiel.  
Schriftleiter: Dr.-Ing. Harald GÖHREN, Dalmanstraße 1-3, 2000 Hamburg 11.

## Meßgeräte und Meßverfahren im Küsteningenieurwesen\*)

### Zusammenfassung

Der „Ausschuß für Verfahren und Meßtechnik im Küsteningenieurwesen“ der Hafentechnischen Gesellschaft gibt in dieser Arbeit einen Überblick der im Küstenbereich derzeit verwendeten Meßgeräte für Strömungs- und Seegangsmessungen sowie der Bodenkunde und des wasserbaulichen Versuchswesens. Weiterhin werden die für Meßgeräte gebräuchlichen Werkstoffe behandelt. Besonders herausgestellt sind die derzeit gebräuchlichen Meßprinzipien.

Empfehlungen für den Einsatz des einen oder anderen Gerätes werden nicht gegeben, weil dessen Auswahl nur in engem Zusammenhang mit der Meßaufgabe erfolgen kann. – Mit der Veröffentlichung dieser Arbeit ist beabsichtigt, den im Küstengebiet messenden Ingenieuren Entscheidungshilfen an die Hand zu geben. Es wird erwartet, daß die fachliche Diskussion Ergänzungs- und Änderungsvorschläge erbringt, die der weiteren Arbeit entsprechende Impulse geben werden.

### Summary

*The "Hafentechnische Gesellschaft" Committee for Procedures and Measurement Techniques in Coastal Engineering has surveyed the instrumentation presently used for current, wave and soil mechanics investigations in the coastal zone and in hydraulic models. The material used for constructing the instruments is also discussed. Special attention is given to accepted measurement techniques.*

*Recommendations for the implementation of specific instrumentation are not given, since this heavily depends on the objectives of the measurement program. The goal of this paper is to present guidelines for coastal engineers concerned with measurements. It is anticipated that subsequent discussions will yield additions and changes as well as motivation for further investigations.*

### Vorwort

Der hier vorliegende Bericht ist das Ergebnis mehrjähriger Arbeit, die von den Mitgliedern des „Ausschusses für Verfahren und Meßtechnik im Küsteningenieurwesen“ der Hafentechnischen Gesellschaft (HTG) neben den beruflichen Verpflichtungen geleistet wurde. In vielen Sitzungen des Ausschusses und aus ihm gebildeter kleinerer Arbeitskreise wurde das erforderliche Grundlagenmaterial gesammelt, gesichtet und zur berichtsmäßigen Darstellung aufgearbeitet. Der Ausschuß erhielt hierbei dankenswerte Unterstützung aus Hochschulen, Industrie und Verwaltungen des Bundes und der Länder, soweit sie mit Aufgaben des Küsteningenieurwesens befaßt sind.

Die Mitglieder des Ausschusses wurden – den Grundsätzen der HTG folgend – aus den Wasserbaubehörden, den Hochschulen und der Industrie berufen, um möglichst breite funktionelle wie konstruktive Erfahrungen zur Geltung bringen zu können. Diese Zusammensetzung hat sich bewährt.

---

\*) „Ausschuß für Verfahren und Meßtechnik im Küsteningenieurwesen“ der Hafentechnischen Gesellschaft; Vorsitzender Dr.-Ing. Günter LUCK, Norderney.

Der erste Obmann des Ausschusses, Erster Baudirektor Dr.-Ing. GÖHREN, trat bereits drei Jahre nach seiner Gründung wegen Übernahme einer anderen beruflichen Tätigkeit von diesem Amt zurück. Die von ihm gegebenen Impulse blieben wirksam und waren richtungweisend für die Weiterführung der Arbeiten. Der Ausschuß ist ihm zu Dank verpflichtet.

Herr Dr.-Ing. SCHWARZE, Universität Hannover, unterzog sich der Mühe, den Abschnitt 6.5.2 für den Ausschuß zu bearbeiten. Die Reinschriften und Korrekturen wurden durch Frau Sibylle LUCK, Norderney, besorgt. Auch ihnen sei herzlich gedankt.

Dem Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen und der Hafentechnischen Gesellschaft, welche die Veröffentlichung dieser Arbeit ermöglichten, gilt der besondere Dank des Ausschusses. Erst hierdurch ist gewährleistet, daß sie ihren Mitgliedern sowie den Fachleuten des In- und Auslandes bekannt wird.

Norderney, im September 1983

Dr. G. LUCK

## Inhalt

1. Einführung . . . . .	5
2. Zur Hydrologie des Küstenvorfeldes . . . . .	6
2.1 Allgemeines . . . . .	6
2.2 Gezeiten . . . . .	6
2.3 Strömungen . . . . .	7
2.4 Seegang . . . . .	8
2.5 Meeresboden, Sedimente . . . . .	9
3. Strömungsmessungen im Küstenvorfeld . . . . .	10
3.1 Einführung . . . . .	10
3.2 Ausführung von Messungen . . . . .	10
3.3 Parameter . . . . .	13
3.3.1 Meßgrößen . . . . .	13
3.3.2 Bezugsgrößen . . . . .	13
3.4 Grundsätzliche Verfahren, Registrierungen und Anwendungsweisen . . . . .	14
3.4.1 Einführung . . . . .	14
3.4.2 Treibkörpermessungen . . . . .	15
3.4.3 Mechanische Verfahren . . . . .	16
3.4.4 Akustische Verfahren . . . . .	18
3.4.5 Elektromagnetisches Verfahren . . . . .	19
3.4.6 Sonstige Verfahren . . . . .	22
3.4.7 Hilfsgrößen . . . . .	22
3.4.8 Meßwertregistrierung . . . . .	25
3.4.9 Meßdatenaufbereitung und -auswertung . . . . .	26
4. Seegangsmessungen . . . . .	30
4.1 Einführung . . . . .	30
4.2 Meßaufgabe . . . . .	30
4.2.1 Meßgrößen . . . . .	31
4.2.2 Problemstellung . . . . .	31
4.3 Erläuterung einiger Begriffe der Wellenhydraulik und der Spektralanalyse des Seegangs . . . . .	31
4.3.1 Deterministische Wellentheorien . . . . .	31
4.3.2 Wellenverformung im Küstenbereich . . . . .	33
4.3.3 Seegangsspektren . . . . .	34
4.3.4 Auswerteverfahren . . . . .	36
4.3.5 Zur Ermittlung der Bemessungswelle – Langzeitstatistik . . . . .	39

4.4	Wellenmeßgeräte, Übersicht über Meßprinzipien	40
4.4.1	Allgemeines	40
4.4.2	Meßgeräte mit feststehendem Geräteträger	40
4.4.2.1	Wellenpegel	40
4.4.2.2	Druckmeßgeräte	41
4.4.2.3	Anwendung der Echolotung, Ultraschallmethoden	43
4.4.2.4	Wellenradar	43
4.4.3	Meßgeräte mit beweglichem Geräteträger	44
4.4.3.1	Wellenbojen	44
4.4.3.2	Stereophotographie	44
4.4.4	Messung des Seegangs durch Mikrowellenrückstreuung	46
4.4.4.1	Seegangsmessung mit einem Puls-Radar-Höhenmesser	46
4.4.4.2	Messung der mittleren Wellenhöhe mit dem Zwei-Frequenz-Radarinterferometer	47
4.4.4.3	Messung von zweidimensionalen Seegangsspektren unter schrägem Einfallswinkel mit Zwei-Frequenz-Verfahren	48
4.4.4.4	Messung des zweidimensionalen Wellenbildes in Küstennähe mit abbildenden („imaging“) Radarwellen	48
4.4.4.5	Seegangsmessung mit CODAR	49
4.5	Datenregistrierung, -übertragung und -verarbeitung	49
4.5.1	Datenregistrierung	49
4.5.2	Datenübertragung	50
4.5.3	Datenverarbeitung (-auswertung)	51
4.6	Generelle Kriterien für die Auswahl eines Wellenmeßsystems	51
4.6.1	Einsatzort	51
4.6.2	Einsatzdauer	53
5.	Geräte für Sediment- und Suspensionsmessung	53
5.1	Meeresboden und Sediment	53
5.1.1	Alter, Herkunft und petrographische Zusammensetzung der Sedimente	54
5.1.2	Ablagerungsbedingungen und geographische Verteilung der Sedimente sowie Morphologie der Gewässersohle	55
5.1.3	Schichtaufbau	56
5.1.4	Biogene Einflüsse auf das Sediment	56
5.1.5	Erodierbarkeit, Setzungen und Veränderungen der Ablagerungen	56
5.2	Geräte zur Entnahme von Bodenproben	57
5.2.1	Greifer (ohne Kastengreifer)	57
5.2.2	Lotgeräte (Kerngeräte)	59
5.2.3	Dredgen	61
5.3	Geräte zur In-situ-Messung	62
5.3.1	Punktsonden	62
5.3.2	Bodenschleppsonden	63
5.4	Nicht bodenberührende Geräte	63
5.4.1	Akustische Geräte	64
5.4.2	Optische Geräte	66
5.5	Geräte zur Suspensionsmessung	66
5.6	Laboruntersuchungen	67
5.6.1	Verfahren zur granulometrischen Analyse	67
5.6.2	Auswertung und Darstellung von Korngrößenanalysen	68
5.6.3	Darstellung von Sedimenttypen	69
6.	Meßgeräte im wasserbaulichen Versuchswesen	70
6.1	Einleitung	70
6.2	Grundsätzliche Bemerkungen zu hydraulischen Modellen	71
6.2.1	Allgemeines	71
6.2.2	Modelle mit fester Sohle	71
6.2.3	Modelle mit beweglicher Sohle	73
6.3	Meßverfahren und Meßgeräte	74
6.3.1	Allgemeines	74
6.3.2	Wasserstand	75

6.3.3	Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen	77
6.3.4	Morphologie	80
6.3.5	Ausbreitungsvorgänge, Dichteströmungen	83
6.4	Meßwertaufnahme und -verarbeitung	84
6.5	Beispiele ausgeführter Modelle	85
6.5.1	Hydraulisches Modell der Bundesanstalt für Wasserbau zur Untersuchung von Strömungsvorgängen im Tidegebiet	85
6.5.2	Hydraulisches Modell des Franzius-Instituts für die Untersuchung von Kühlwasserausbreitungsvorgängen im Tidegebiet	91
6.5.3	Hydraulisches Modell des Franzius-Instituts für dreidimensionale Seegangsuntersuchungen	95
6.6	Schlußbemerkung	99
7.	Werkstoffe und Korrosionsschutz in der Meerestechnik	100
7.1	Einleitung	100
7.2	Eigenschaften der gebräuchlichsten Werkstoffe	100
7.2.1	Stähle und Gußeisen	100
7.2.2	Rost- und säurebeständige Stähle (nach DIN 17 440)	102
7.2.3	Kupfer und seine Legierungen (nach DIN 17 660)	102
7.2.4	Nickel-Knetlegierungen	105
7.2.5	Aluminiumlegierungen (nach DIN 1725)	105
7.2.6	Titanlegierungen	105
7.2.7	Nichtmetallische Werkstoffe	106
7.3	Korrosion	108
7.3.1	Korrosionsarten	108
7.3.2	Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit	113
7.4	Erfahrungen mit dem Verhalten einiger obengenannter Werkstoffe in der Meerestechnik	115
7.4.1	Unlegierte Stähle	115
7.4.2	Nichtrostende Stähle	116
7.4.3	Kupfer und seine Legierungen	117
7.4.4	Aluminium und seine Legierungen	117
7.4.5	Titan und seine Legierungen	117
7.4.6	Nichtmetallische Werkstoffe	118
7.4.7	Werkstoffe bei Mischbauweise	118
7.5	Schutz vor Korrosion und Bewuchs	120
7.5.1	Temporärer Schutz	120
7.5.2	Metallische Überzüge	121
7.5.2.1	Galvanische Verfahren	121
7.5.2.2	Chemische und elektrochemische Verfahren	122
7.5.2.3	Schmelzflüssige Verfahren, Plattierungen	122
7.5.3	Farbüberzüge	123
7.5.4	Schutz vor Bewuchs	123
8.	Schlußwort	124
9.	Schriftenverzeichnis	125

## A n h a n g

1.	Vorbemerkung	129
2.	Tabellarische Zusammenstellung ausgewählter Strömungsmessgeräte	129
3.	Strömungsmessungen an der deutschen Nordseeküste	129
3.1	Meßprogramm Dithmarscher Bucht	129
3.2	Auswertung von Strömungsdaten einer Wattwasserscheiden-Messung bei Neuwerk	149
3.3	Meßprogramm Weserästuar	156
3.4	Geräteinsatz und Erfahrungen	158
3.5	Ergebnisdarstellung	159
3.6	Meßergebnisse	161
4.	Tabellarische Zusammenstellung ausgewählter Seegangsmessgeräte	162

5. Seegangmeßprogramme im Bereich der deutschen Nord- und Ostseeküste . . . . .	162
5.1 Südstrand der Insel Borkum . . . . .	177
5.2 Ostfriesische Inseln und Küste . . . . .	178
5.3 Jade-Weser-Ästuar . . . . .	179
5.4 Elbmündungsgebiet . . . . .	181
5.5 Dithmarscher Küste . . . . .	182
5.6 Nordstrander Bucht und Sylt . . . . .	182
5.7 Küstenvorfeld der Insel Sylt . . . . .	183
5.8 Probstei/Ostsee . . . . .	184

## 1. Einführung

Auf ihrer Hauptversammlung am 28. 9. 1972 in Braunschweig hat die Hafengebäutechnische Gesellschaft (HTG) beschlossen, ihr Arbeitsgebiet auf Küstenforschung und Küsteningenieurwesen auszudehnen. Im Rahmen der hierdurch eingeleiteten Entwicklung wurde zu Beginn des Jahres 1975 ein Ausschuß ins Leben gerufen, der sich vornehmlich mit gerätetechnischen Fragen des Meßwesens in der Küstenforschung befassen sollte und der dann den Namen „Ausschuß für Verfahren und Meßtechnik im Küsteningenieurwesen“ (AVMK) erhielt.

Die Notwendigkeit, Verfahren und Geräte für die schwierigen und aufwendigen gewässerkundlichen Aufgaben des Küsteningenieurwesens zu prüfen, zu vereinheitlichen oder auch neu zu entwickeln, war schon früh erkannt worden. So entstand bereits im Jahre 1950 die Arbeitsgruppe „Wasserbauliche Hydrometrie – Untersuchungen an der Meeresküste“ des Küstenausschusses Nord- und Ostsee (LÜDERS et al., 1951), die jedoch schon wenig später in Untergruppe „Praktisches Meßwesen im Seegebiet“ umbenannt wurde. Die Gruppe befaßte sich zunächst überwiegend mit gerätetechnischen Fragen. Dieser Rahmen wurde im Laufe der Jahre zunehmend erweitert, weil eine Bearbeitung des Themas nicht möglich war, ohne gleichzeitig Verfahren der Aufbereitung und Auswertung von Meßwerten einzubeziehen und schließlich die mit ihnen erarbeiteten Untersuchungsergebnisse im großen Zusammenhang zu bewerten.

Im Rahmen des 1966 durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft eingeleiteten Schwerpunktprogrammes „Sandbewegung im deutschen Küstenraum“, an welchem der Küstenausschuß Nord- und Ostsee wesentlich beteiligt war, ist der Untergruppe „Praktisches Meßwesen im Seegebiet“ die Mitarbeit in diesem bedeutsamen Vorhaben zur Aufgabe gemacht worden. In diesem Zusammenhang erhielt sie die Bezeichnung „Arbeitskreis Küstenforschung“, wodurch auch zum Ausdruck gebracht wurde, daß ihr Aufgabenkreis wesentlich über den ursprünglich gezogenen Rahmen hinausgewachsen war.

Nach der Auflösung des Küstenausschusses Nord- und Ostsee sowie seiner Ausschüsse und Untergruppen und der Übernahme seiner Aufgaben durch das „Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen“ (KFKI) setzten dann Bemühungen ein, die Aufgaben der ehemaligen Untergruppe „Praktisches Meßwesen im Seegebiet“ fortzuführen. Diese Bemühungen führten zur Gründung des AVMK durch die HTG. Dem Ausschuß gehören an:

Vorsitzender Dr.-Ing. LUCK	Norderney
Dr.-Ing. BARTHEL	z. Zt. Kanada
Dr.-Ing. DETTE	Braunschweig
Dr. rer. nat. FAHRENTHOLZ	Kiel
Dr. rer. nat. FIGGE	Hamburg
Dr.-Ing. GÖHREN	Hamburg

Dipl.-Ing. GRASSHOFF	Kiel
Dr.-Ing. habil. KOHLHASE	Hannover
Dipl.-Ing. RICHTER	Tönning
Prof. Dr.-Ing. habil. SIEFERT	Cuxhaven
Dipl.-Ing. VEIT	Kiel
Prof. Dr.-Ing. VOLLMERS	München
Dr.-Ing. WIELAND	Büsum

Der äußere Rahmen der vom AVMK zu leistenden Arbeit ist im wesentlichen durch folgende Aufgabengruppen vorgegeben:

1. Verfolgung der für das Küsteningenieurwesen wichtigen methodischen und gerätetechnischen Entwicklungen im In- und Ausland unter Einbeziehung verwandter wissenschaftlicher Disziplinen wie z. B. Geologie, Meteorologie und Ozeanographie; kritische Prüfung der Eignung von Meßgeräten für das deutsche Küstengebiet und der Übertragbarkeit von Erfahrungen und Erkenntnissen, die andernorts gewonnen wurden, auf diesen Bereich; in diesem Rahmen Weitergabe von Informationen sowie Beratung und Erarbeitung von Empfehlungen.
2. Untersuchungen oder Anregungen zur Anpassung von Geräten und Verfahren an die besonderen Erfordernisse des deutschen Küstengebietes bzw. zu neuen Untersuchungsverfahren und Geräteentwicklungen.
3. Untersuchungen zur Rationalisierung von Meß- und Auswertungsverfahren; Erarbeitung dahin zielender Empfehlungen und Richtlinien.

Obwohl durch diese Zielsetzung zum Ausdruck gebracht wird, daß vorzugsweise Meßgeräte für Naturuntersuchungen zu bearbeiten sind, wurden doch verfahrensmäßige und gerätetechnische Fragen der experimentellen Forschung im Laboratorium in den Aufgabenkatalog mit einbezogen, da sich insbesondere beim Betrieb großer hydraulischer Flächenmodelle für das Küstengebiet und bei Versuchen mit Geschiebemodellen Probleme ergeben haben, die stark mit der Naturmessung verknüpft sind.

Die Geräte und Verfahren zur Wasserstandsmessung werden im Küstenpegelausschuß der „Länderarbeitsgemeinschaft Wasser“ behandelt und wurden daher nicht in die Aufgabenstellung des AVMK einbezogen.

## 2. Zur Hydrologie des Küstenvorfeldes

### 2.1 Allgemeines

Auswahl und Einsatz geeigneter Meßgeräte sowie die Beurteilung der mit ihnen erzielten Ergebnisse sind weitgehend an den im Meßgebiet örtlich wirkenden aktiven und passiven Kräften zu orientieren. In diesem Sinne werden daher nachfolgend die für Meßaufgaben bedeutsamen Vorgänge skizzenhaft dargestellt.

### 2.2 Gezeiten

Die Gezeiten (Tiden) werden durch die Anziehungskräfte von Mond und Sonne sowie durch die infolge der Erdrotation entstehenden Kräfte erzeugt. Sie treten als ganztägige, halbtägige oder gemischte Gezeiten auf.

Im Nordseeküstenbereich und in den deutschen Ästuaren erscheinen nahezu reine

halb tägliche Gezeiten mit einer Periode von 12 Stunden, 25 Minuten. Täglich treten somit je zweimal Niedrigwasser (Tnw) und Hochwasser (Thw) ein.

Durch die Stellung des Mondes zur Erde und des Systems Erde – Mond zur Sonne werden die Amplituden der Gezeiten (Tidehub: Thb) beeinflusst. So stellt sich ein Unterschied der Tidehübe aufeinanderfolgender Tiden ein, der als halbtägliche Ungleichheit bezeichnet wird. Astronomisch ist zur Zeit von Voll- und Neumond der Tidehub am größten (Springtide) und zur Zeit des ersten und letzten Viertels am kleinsten (Nipp tide). Dieser Unterschied der Tidehübe wird als halbmonatliche Ungleichheit bezeichnet. Die örtliche Spring- und Nippzeit ist in den deutschen Tidegewässern gegenüber der astronomischen Spring- und Nippzeit um rund 72 Stunden verspätet.

Auf dem freien Ozean ist die Gezeitenwelle eine rein fortschreitende Welle mit jeweils gleich lang dauernden und gleich großen Strömungen in ihrer Fortschrittsrichtung (Flutstrom) und entgegen dieser (Ebbestrom). Beim Einlaufen der Tidewelle in die flacheren Küstenbereiche und die Ästuarie wird sie von teilreflektierten Wellen überlagert und dadurch in ihrer Form verändert.

Die im offenen Meer symmetrische Form der Tidekurven (Wasserstandsganglinien an einem Ort) wird im Küstenbereich und in den Tideflüssen zunehmend asymmetrisch. Der Tidesstieg wird überwiegend rascher, der Tidefall langsamer sowie die Flutdauer kürzer und die Ebbdauer entsprechend länger. Die Kenterpunkte der Flut- und Ebbeströmungen an einem Ort, die auf dem Meer in der rein fortschreitenden Tidewelle jeweils bei Tidemittelwasser eintreten, verschieben sich mit zunehmender Überlagerung der Ursprungstidewelle durch teilreflektierte Wellen zu den Scheitelwasserständen (Thw und Tnw) hin und fallen bei einer vollständig reflektierten Tidewelle (stehende Welle) in die Scheitelwerte der Tidekurve.

Während der Flutstromdauer  $T_f$  läuft durch einen bestimmten Durchflußquerschnitt eines Tideflusses die Flutwassermenge  $V_f$  ein. Während der Ebbestromdauer  $T_e$  läuft dann die Ebbwassermenge  $V_e$ , die sich aus der Flutwassermenge  $V_f$  und der während der gesamten Tidedauer  $T_T$  anfallenden Oberwassermenge  $T_T \cdot Q_o$  zusammensetzt, wieder ab ( $V_e = V_f + Q_o \cdot T_T$ ).

Die Verteilung des Durchflusses bei Flut- und Ebbestrom ( $Q_f$  und  $Q_e$ ) über die Tide in den dazugehörigen Durchflußquerschnitten entspricht grundsätzlich der Verteilung der Querschnittsgeschwindigkeiten ( $v_f$  und  $v_e$ ).

Die Durchflüsse in einem Querschnitt eines Tideflusses lassen sich nicht – wie in einem Binnenfluß – aufgrund von Strömungsmessungen als Funktion des Wasserstandes darstellen. Sie werden zwar durch Strömungsmessungen in verschiedenen Meßlotrechten des Querschnittes bestimmt, die so ermittelten Verteilungen gelten aber nur für den entsprechenden Querschnitt und für die Tide, bei der die Messungen vorgenommen worden sind. Im Tidegebiet werden deshalb die Verteilungen der Durchflüsse über die Tide in beliebigen Durchflußquerschnitten des Tideflusses im allgemeinen durch eine Kubizierung – Durchflußberechnung allein aus Wasserständen und Querschnitten – berechnet.

### 2.3 Strömungen

Die horizontal mit wechselnden Richtungen verlaufende Fließbewegung des Wassers im Tidegeschehen wird als Tideströmung bezeichnet. Im deutschen Küstengebiet erreichen diese Strömungen unter normalen Tideverhältnissen etwa folgende Höchstwerte:

Seegebiet der Deutschen Bucht:	0,6 m/s
Stromrinnen im Wattgebiet:	2,0 m/s
Strommündungen:	3,0 m/s

Die im offenen Meer ursprünglich gleichmäßige, sinusförmige Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten über die Tide mit Maximalwerten bei Thw und Tnw wird durch verschiedenartige Einflüsse im Küstenbereich und in den Tideströmen stark verändert. In den Wattgebieten werden Richtung und Geschwindigkeit der Strömung überwiegend durch die Morphologie geprägt. Das Wasser strömt bei Flut mit verhältnismäßig großer Geschwindigkeit in die Stromrinnen (Baljen, Priele) ein und verteilt sich bei starker Geschwindigkeitsabnahme von dort über die flachen Watten. Unter Normalverhältnissen streben die Geschwindigkeiten im Bereich der Wattwasserscheiden gegen Null. Bei ablaufendem Wasser kehren sich die Verhältnisse unter Ausbildung eines seewärts gerichteten Geschwindigkeitsgefälles um. Die Geschwindigkeitsmaxima treten sowohl bei Flut- als auch bei Ebbestrom etwa bei Tidehalbwasser ein. In den Stromrinnen des Wattes sind die Stromrichtungen durch deren Verlauf vorgegeben, und die Strömung alterniert klar. Auf den flachen Watten hingegen werden die Stromrichtungen mit wachsendem Abstand von den Stromrinnen zunehmend labiler und pendeln in weiten Bereichen der Stromrose bis hin zu Drehströmungen. Wind kann jedoch dieses Geschehen stark beeinflussen: Es werden andere Strömungserscheinungen überlagert, und zwar Trift- und Orbitalströmungen. Triftströmungen treten im Wattgebiet etwa ab Windstärke 4 Bft auf und können dort bei Starkwinden Geschwindigkeiten um 1,5 m/s erreichen. In Flachwassergebieten verlaufen diese Strömungen über die gesamte Tiefe etwa in Windrichtung; in Prielen und Wattströmen treten dagegen in den unteren Querschnittsteilen häufig Ausgleichsströmungen gegen die Windrichtung auf.

Die oszillierenden Orbitalströmungen werden bestimmt durch Höhe und Länge des Seegangs. Im Flachwasser verlaufen sie nahezu horizontal mit Perioden zwischen 3 und 8 s, in Bodennähe sind die Strombahnen ellipsenförmig.

In den Tideströmen ist das Strömungsgeschehen vor allem dadurch geprägt, daß mit zunehmender Entfernung von den Mündungen die Flutstromdauer kürzer und die Ebbestromdauer länger wird. An der Flutstromgrenze tritt dann nur noch eine tide- und oberwasserabhängige instationäre Ebbestromung auf. Im Durchmischungsgebiet von Süß- und Salzwasser wird die Tide durch ausgeprägte Dichteströmungen überlagert, die insbesondere in Ästuaren die Strömungsverhältnisse wesentlich beeinflussen.

## 2.4 Seegang

Dünung und Windsee, deren Größe von der Stärke des Windes, seiner Wirkdauer und Streichlänge (Wirkweg) sowie der Topographie des Meeresbodens bestimmt wird, bilden den für viele Fragen des Küsteningenieurwesens bedeutsamen Seegang. Im Vergleich zum langperiodischen Geschehen, wie etwa den Gezeiten, handelt es sich bei den Dünungs- und Windwellen um kurzperiodische Vorgänge. Die Dünung wird durch langanhaltenden Wind einfluß auf große Seegebiete erzeugt und pflanzt sich vornehmlich als freie Schwingung fort. Die Windsee ist eine durch Windeinwirkung sofort einsetzende Bewegung der Wasseroberfläche (erzwungene Schwingung). Sie hat im allgemeinen kürzere Perioden als die Dünung.

Durch den Seegang werden erhebliche Energien in den Küstennabereich transportiert und dort in den Brandungszonen der Inselstrände, des Wattes und vor den Deichen sowie auch an den Insel- und Küstenschutzwerken in nicht rückwandelbare Energieformen umgesetzt (Wärme, Strömungsenergie). Aus diesem Energieumsatz resultieren zum einen erhebliche Beanspruchungen der im Wirkungsbereich des Seeganges gelegenen Bauwerke, und zum anderen wird das morphologische Formeninventar des Küstenvorfeldes durch ihn mitgestaltet.

Von besonderer Bedeutung für den Küstennahbereich sind jene Küstenstreifen, in welchen der Seegang brandet (Brandungszonen). Sie sind vor flachen Küsten breit und vor steilen schmal. Durch die Baljen, Wattströme und Stromrinnen dringt der Seegang weit an die Küste bzw. in die Ästuarie vor und ist dabei vielfältigen Formänderungen ausgesetzt (Diffraktion, Refraktion, Reflexion, shoaling effect). Das mit den Wellen an die Küste herangeführte Wasser fließt bei schrägem Wellenaufbau küstenparallel ab und bildet dabei Brandungsrinnen. Bei nahezu strandparallelem Wellenaufbau strömt das herbeigeführte Wasser senkrecht zur Strandlinie zurück (Rippströmung).

Beim Branden der Wellen oder bei Auftreffen auf ein Hindernis entstehen Brecher. Bildet sich in einer Welle durch Bodenberührung oder Starkwindeinfluß ein Geschwindigkeitsgefälle, so beginnt sie aufzusteilen. Sobald die größte Aufsteilung erreicht ist, kippt sie vornüber, bricht und läuft als Brecher weiter. Beim Schaumbrecher hat die Welle nur schwache Bodenberührung mit kurzfristig wirksamem Geschwindigkeitsgefälle, das allerdings auch ausschließlich windbedingt sein kann. Sie schäumt kurz auf, das Geschwindigkeitsgefälle wird abgebaut, die Welle bildet sich zurück und läuft normal weiter. Schwallbrecher entstehen auf stetig ansteigendem, flachem Seegrund. Vom Brechpunkt läuft der Brecher auf langem Wege schäumend weiter, wobei er immer niedriger wird. Sturzbrecher werden dort erzeugt, wo Bauwerke oder steile Strände zu plötzlicher, starker Grundberührung führen, z. B. vor Deichen oder Deckwerken.

## 2.5 Meeresboden, Sedimente

Zum Verständnis der Eigenschaften des Meeresbodens und seiner Sedimente sowie auch für die Beurteilung von Sedimentumlagerungen ist es hilfreich, die geologische Geschichte des betreffenden Seegebietes zu kennen. Die der heutigen Nordsee beginnt mit dem Holozän, der jüngsten geologischen Epoche, die dem Eiszeitalter folgte. Damals lag der Meeresspiegel mehr als 80 m unter seinem heutigen Niveau. Das Gebiet der Deutschen Bucht war als nördlicher Teil des nordwestdeutschen Flachlandes wie dieses eine eiszeitlich geprägte Landschaft, vielfach bedeckt mit Moränen oder Sanden und durchzogen vom Elbe-Urstromtal mit einigen Nebenflüssen.

Der durch das Abtauen des Eises hervorgerufene Meeresspiegelanstieg erfolgte zunächst sehr schnell. Die NN-45 m-Linie wurde vor etwa 9000 Jahren überschritten, und vor ungefähr 6000 Jahren war das heutige Niveau bis auf wenige Meter erreicht. Danach stieg das Wasser nur noch allmählich an, so daß sich seither neben den eustatischen Meeresspiegeländerungen auch die langsamer verlaufenden isostatischen Bewegungen der Erdkruste und Setzungserscheinungen in den obersten Bodenschichten deutlich bemerkbar machen konnten.

Aus dieser Entwicklung wird die unterschiedliche Verteilung der Sedimente im Küstenbereich verständlich. Während des raschen Meeresspiegelanstieges konnten sich in den tiefer gelegenen Meeresteilen typische Küstensedimente wegen der kurzen Verweildauer der Küstenlinie nicht bilden. Die eiszeitliche Landschaft ertrank vielmehr, wobei sich einige geomorphologische Elemente, wie z. B. das relativ steile Ostufer des Elbe-Urstromtales nordwestlich von Hegoiland, bis heute erhalten haben. Mit der zunehmenden Verzögerung des Meeresspiegelanstiegs blieben dann die Küstenlinien länger ortsfest, und es bildeten sich Watten, Marschen, Torfmoore, strandgebundene Sandaufschüttungen usw. Da diese Sedimente die jeweiligen hydrographischen und morphologischen Verhältnisse widerspiegeln, ändern sie sich von Ort zu Ort. Oft liegen, entsprechend dem Vordringen der Küstenlinie, mehrere Sedimenttypen übereinander.

Im Küstennahbereich wird der Meeresboden überwiegend durch Wellen und Strömungen geprägt. Das Gestaltungsprinzip ist dabei die Schaffung eines Gleichgewichtes zwischen Energieeintrag, Morphologie und Sedimentverteilung durch Abrasion von Auftragungen am Meeresboden bzw. Küstenvorsprüngen, Verfüllung ehemaliger Senken, Aufwerfen von Sandkörpern wie Riffen oder Haken und Sortierung des vorhandenen und herantransportierten Lockermaterials. Im allgemeinen ist davon auszugehen, daß an der gesamten deutschen Nordseeküste der Meeresboden aus einer mehr oder weniger dicken Sandschicht aufgebaut ist. Im Watt, dem Übergangsbereich vom Meer zum festen Land, ist die Bodenbeschaffenheit stark wechselnd, vom weichen Schlick (Schlickwatt) in Gebieten mit schwacher Strömung und Wellenbewegung bis zum festgelagerten Sand in den Brandungszonen. Dazwischen befinden sich Mischformen des Wattes (Schlick-/Sandwatt), bei welchen Schlick und Sand so miteinander vermischt sind, daß die charakteristischen Merkmale des reinen Sand- oder Schlickwattes verloren gehen.

### 3. Strömungsmessungen im Küstenvorfeld

#### 3.1 Einführung

Strömungen sind neben Wasserständen und Seegang die wichtigsten charakteristischen Parameter hydrologischer Vorgänge. Zum Verständnis des Geschehens im Küstenvorfeld sind daher ausreichende Kenntnisse der Strömungsverhältnisse unerlässlich. Dies gilt sowohl für die forschende Tätigkeit (Biologie, Geologie u. ä.) als auch für die Planung regulierender, schützender oder erhaltender Bauvorhaben. Welche Schwierigkeiten bei der Erarbeitung eines umfassenden Kenntnisstandes – insbesondere im Tidegebiet – auftreten, hat GÖHREN (1969) dargestellt:

„Die Strömungen sind äußerst kompliziert, da sich zahlreiche Einflüsse überlagern. Die Gezeitschwingung der freien See geht über in ein Schwingungssystem, das z. B. von Form und Abflußmengen weit ins Binnenland reichender Tideflüsse abhängt. Beim Eintritt des Flußwassers in das salzhaltige Meerwasser entstehen sehr ausgeprägte Dichteströmungen, die sich den Tideströmungen überlagern. Der Wind wirkt sich unmittelbar (Erzeugung von Triftströmungen, Orbital- und Brandungsströmungen) und mittelbar (Gezeitenänderung durch Windstau) auf die Strömungsvorgänge aus. Zu allem kommt die charakteristische, stark geformte morphologische Struktur mit den verzweigten Rinnensystemen, Sandbänken und Barren.

Obwohl die physikalischen Zusammenhänge weitgehend geklärt sind, ist es kaum möglich, die Strömungen eines solchen Gebietes theoretisch (durch Lösung der hydrodynamischen Differentialgleichungen) oder durch Modellversuche hinreichend genau zu erfassen. Um zu quantitativen Ergebnissen zu gelangen, d. h. die Strömungen eines bestimmten Punktes im Gewässer nach Stärke, Richtung und zeitlichem Ablauf anzugeben, bleibt nur der Weg der unmittelbaren Beobachtung. Aber auch hierbei bestehen erhebliche Schwierigkeiten, wobei von den rein meßtechnischen Problemen zunächst einmal abgesehen werden soll. Jede Messung oder Beobachtung ist wegen der örtlich und zeitlich stark veränderlichen Bewegungsgrößen nur in begrenztem Umfang repräsentativ. Daraus folgt, daß man an möglichst vielen Meßstationen synoptische Messungen über einen möglichst langen Zeitraum durchführen müßte, um ein genaues und vollständiges Bild aller Vorgänge zu erhalten. Dem sind natürlich Grenzen gesetzt, und man kann lediglich versuchen, mit den vorhandenen Mitteln ein Optimum zu erreichen.“

#### 3.2 Ausführung von Messungen

Bei der Ausführung von Strommessungen ist zwischen ortsfesten und nicht ortsfesten Messungen zu unterscheiden. Durch ortsfeste Messungen wird die Strömung an einer festen Position in festgelegter Wassertiefe gemessen.

Die so gewonnenen Ergebnisse geben Aufschluß über die Strömungsverhältnisse am Meßort. Durch mehrere gleichzeitige Messungen an verschiedenen Orten, die als Einheit zu betrachten sind, kann die Strömung in Profilen (Längsprofil, Querprofil, Vertikalprofil) und Querschnitten erfaßt werden. Die jeweilige Anzahl der Meßpositionen hängt dabei von der Form des Gewässers, von dessen Wassertiefe und vom Strombild ab, das gleichförmig oder sehr unausgeglichen sein kann.

Zu diesen ortsfesten, synchronen Punktmessungen gehören auch integrierende Messungen, z. B. mit Meßflügeln, und Meßserien mit demselben Meßgerät kurz nacheinander in verschiedenen Meßpositionen, z. B. in einem Vertikal- oder auch Horizontalprofil.

Bei nicht ortsfesten Messungen werden Weg und Geschwindigkeit eines Wasserteilchens gemessen. Dabei wird die Position eines eindeutig definierten oder definierbaren Wasserkörpers in Abhängigkeit von der Zeit bestimmt. Die Genauigkeit der Messung ist wesentlich von einer zuverlässigen Ortsbestimmung für den zu beobachtenden Wasserkörper abhängig.

Die Wahl der Gerätetypen und Meßverfahren, die flächige und räumliche Verteilung der Meßgeräte sowie der Zeitpunkt und die Dauer der Messungen hängen von der Aufgabenstellung, von den örtlichen Gegebenheiten und dabei auch von der Vorkenntnis der Strömungsverhältnisse ab. Um den Einfluß verschiedener Parameter auf die Strömung zu erkennen, sind Dauermeßserien erforderlich. Gleichzeitig besteht auch nur dann die Möglichkeit, das gesamte Spektrum der möglichen Strömungsvarianten zu erkennen. Dazu gehört insbesondere die Unterscheidung astronomisch und meteorologisch beeinflusster Bewegungen.

Im Bereich der Watten ist von besonderer Bedeutung, daß diese während des Ablaufs einer Tide nur eine begrenzte Zeit und Höhe – bei mittleren Tiden etwa drei bis sieben Stunden lang – überflutet sind. Überflutungsdauer und -höhe richten sich nach der Höhenlage des Wattniveaus, der astronomischen Eintrittshöhe des Thw und der Windrichtung und -stärke (meteorologisch beeinflusste Tiden, Windstau). In der übrigen Zeit liegen die Watten trocken, so daß dann zwangsläufig eine Meßpause entsteht. Über den Watten können Stromgeschwindigkeiten bis etwa 1,5 m/s auftreten. Die Strömungsrichtung ist zumeist labil. Bedingt durch die morphologischen Gegebenheiten – insbesondere im Bereich der Wattwasserscheiden, aber auch infolge Windeinfluß – kann sich die Strömungsrichtung kontinuierlich oder auch sprunghaft ändern. Stromrichtung und -geschwindigkeit sind ausgeprägter im Bereich von Rinnen, Senken und Prielufeln, wenn das Bild auch jeweils sehr verschieden sein kann.

Bei Wind- und Sturmweatherlagen sind die Meßgeräte starken dynamischen Belastungen ausgesetzt. Das ist beim Aufbau und bei der Verankerung zu beachten. Gleichzeitig sollte bedacht werden, daß eine weitgehende Sicherung gegen Menschenhand besonders in Nähe stark besuchter Seebadeorte erfolgen muß. Bedeutsam für die Gerätewahl ist, daß es durch den Wechsel von Überflutungs- und Trockenfallzeiten, aber auch infolge der relativ geringen Überflutungshöhe der Watten, bei Sonneneinstrahlung zu großen Temperaturschwankungen (bis etwa 50 °C) im Inneren der Geräte kommen kann. Für die Standortwahl der Meßgeräte kann auch die Art der Sedimente und die Intensität morphologischer Umformungen in der näheren Umgebung bedeutsam sein, und zwar sowohl in bezug auf die Verankerung als auch auf die angestrebten Aussagen über Wechselwirkungen zwischen Wasser und Meeresboden.

In Prieln ist die Überflutungsdauer der Meßgeräte abhängig von der jeweiligen Meßpunkthöhe und von den regionalen Tidewasserständen. Die Strömungsgeschwindigkeiten sind hier bei Normaltiden größer als über den Watten und von der Größe des maßgebenden Wateinzugsgebietes und seiner Überflutungshöhe (Wattniveau, normaler Tidehub, Prielquerschnitt) sowie vom Windeinfluß (Triftströmung, außergewöhnlicher Tidehub) abhängig. Sie können etwa bis zu 1,5 m/s erreichen. In Priellängsrichtung gibt es eine eindeutige, klar

alternierende Flut- und Ebbestromrichtung. Wie auf den Watten können die Meßgeräte großen dynamischen Belastungen ausgesetzt und häufig stärker als dort durch Pflanzen und Sinkstoffe gestört sein. Temperaturschwankungen sind hier kaum geringer als auf den Watten, jedoch ist das von der Überflutungshöhe der Meßgeräte abhängig.

In Flußmündungen und Wattströmen oder Baljen sind Flut- und Ebbestrom meistens während der ganzen Tidedauer eindeutig definierbar. Die Strömungsgeschwindigkeiten nehmen von der Kenterung an bis zu einem Spitzenwert etwa im Bereich der halben Tide zu und danach wieder ab, wobei Maxima bis etwa 3 m/s auftreten können. Die Geschwindigkeitsganglinien von Flut- und Ebbestrom weichen in den meisten Fällen in Abhängigkeit von der unterschiedlichen Tidesteig- und -falldauer infolge landwärts zunehmender Einingung voneinander ab. Beschleunigung und Verzögerung sind uneinheitlich. Sowohl in der Horizontalen als auch in der Vertikalen innerhalb der Meßprofile treten unterschiedliche Stromgeschwindigkeiten und häufig auch unterschiedliche Kenterzeiten auf.

Sind Flußmündungen und Wattströme im Querschnitt stark untergliedert, manchmal mit zwischenliegenden Untiefen, so ist das ein Hinweis darauf, daß im selben Querschnitt jeweils eine der beiden Strömungen, also Flut- oder Ebbestrom, in Richtung und Stärke dominiert.

Bei großen Wasserspiegelbreiten, etwa ab 1500 m, treten merkliche Quergefälle auf. Deshalb sind dort an beiden Ufern die Wasserstände zu messen. Unterschiedliche Wasserstände können sich auch in den durch Mittelrücken zergliederten Querschnitten einstellen.

Die dynamischen Wechselbeanspruchungen der Geräte durch Wind, Wellen und Turbulenzen im Wasser werden mit zunehmender Wasser- und Meßpunkttiefe geringer, die hydrostatische Belastung größer. Die Temperaturschwankungen in den Meßgeräten entsprechen den unterschiedlichen Wassertemperaturen. Traggestelle für Meßgeräte und die Verankerungen schwimmender Geräte können einsanden und beim Aufnehmen besonders starken Belastungen ausgesetzt sein. Daher sind entsprechend dimensionierte Konstruktionen zu wählen.

Im Vorstrandbereich setzt sich die Strömung aus küstenparallelen und küstennormalen Komponenten zusammen. Die Tideströmung wird häufig sehr stark von Trift-, Orbital- und Brandungsströmungen überlagert. Unmittelbar im Brandungsbereich sind Messungen wegen der dort herrschenden Turbulenzen mit Lufteinschlag und suspendiertem Strandmaterial problematisch. Bei Starkwind- und Sturmweatherlagen sind die Geräte sehr starken Belastungen ausgesetzt. Auf eine sichere Verankerung schwimmender Meßgeräte und auf die Standfestigkeit von Meßgerüsten ist deshalb in Vorstrandbereichen besonderer Wert zu legen.

Im Flachwasserbereich treten Tide-, Dichte-, Trift- und Orbitalströmungen auf, die sich überlagern. Sie wechseln in Richtung und Stärke auf kleinem Raum nicht so schnell wie z. B. auf Watten, in Flußmündungsgebieten oder im Vorstrandbereich. In verschiedenen Tiefenstufen dagegen muß mit deutlichen Unterschieden im Strombild gerechnet werden. Bei starkem Seegang dominiert meistens deutlich die Orbitalbewegung.

Die dynamische und hydrostatische Belastung der Geräte entspricht etwa der in Flußmündungsgebieten. Kurzfristige Sohlenveränderungen sind im allgemeinen nicht zu erwarten. Jedoch können Großriffel eine Einsandung der Geräte oder deren Verankerungen verursachen.

Zum tidefreien Gebiet gehört die Ostsee. Obwohl geringe tidebedingte Wasserstandsschwankungen von ca. 20 cm feststellbar sind, ist eine Tideströmung allgemein nicht meßbar, mit Ausnahme enger Ostseezugänge. Vorherrschend sind in diesem Gebiet die Trift- und Gefälleströmungen.

Infolge Fehlens des dominierenden Tidestromes sind die Strömungsverhältnisse im tidefreien Gebiet sehr komplex und die Einflußwirkung von Oberwasserzuflüssen, Wasser-

ständen sowie Wind- und Luftdruckverhältnissen nicht ohne weiteres erkennbar. Hinsichtlich der Beeinträchtigung der Meßgeräte und Meßergebnisse durch Sink- und Schwebstoffe, durch pflanzliche und tierische Einflüsse sowie der hydrostatischen und dynamischen Belastung der Geräte und Verankerungen besteht gegenüber dem Tidegebiet nur ein geringer Unterschied.

### 3.3 Parameter

#### 3.3.1 Meßgrößen

Meßgrößen sind die in einem Meßgang am jeweiligen Meßpunkt primär zu erfassenden Daten: Strömungsgeschwindigkeit, Strömungsrichtung, Strombahn, Uhrzeit, Position des Meßgerätes.

Die Strömungsgeschwindigkeit wird je nach Verfahren direkt oder indirekt gemessen (Abschnitt 3.4). Zur gleichen Zeit wird am selben Ort die Strömungsrichtung des gleichen räumlich begrenzten Wasserkörpers erfaßt. Dabei wird meistens die Richtung auf Kompaß-Nord bezogen.

Die Strombahn ist der von einem bestimmten Wasserkörper innerhalb eines Zeitabschnittes zurückgelegte Weg. Er ergibt sich aus der wiederholten Ortsbestimmung des Wasserkörpers, z. B. mittels eines Schwimmers, in Abhängigkeit von der Uhrzeit.

Mit Schwimmern ist aus der Zeitdifferenz und dem räumlichen Abstand zwischen zwei eingemessenen Positionen für die oberste Wasserschicht ebenfalls die mittlere Strömungsgeschwindigkeit sowie die Strömungsrichtung innerhalb dieser Strecke bestimmbar.

Bei ortsfesten Messungen kann eine Strombahn durch synchrone Registrierung von Strömungsgeschwindigkeit, Strömungsrichtung und Uhrzeit an verschiedenen Stationen konstruiert werden. Ist ein ausreichend dichtes Meßpunktnetz vorhanden, ergibt die Darstellung zeitgleicher Stromvektoren für die verschiedenen Meßstationen Strombahnen, die jedoch nicht mit der oben definierten Strombahn identisch sind.

#### 3.3.2 Bezugsgrößen

Als Bezugsgrößen sind die statisch und dynamisch wirkenden Kräfte anzusehen, die einen Einfluß auf Geschwindigkeit, Richtung und Weg der Strömung ausüben oder die entsprechende Strömung verursachen. Diese Bezugsgrößen sind daher bei den Strömungsmessungen jeweils gleichzeitig mit zu erfassen, damit die Meßergebnisse miteinander korreliert werden können.

Die Bezugsgrößen lassen sich nach Fachgebieten in drei Gruppen unterteilen:

- **Topographie/Morphologie**: Die nähere und auch weitere Umgebung des Meßpunktes muß bei der Analyse der Daten berücksichtigt werden (Ästuar – Stromrinne – Watt; Riffel – glatte Sohle u. a.).
- **Hydrologie**: Wassertiefe bzw. Wasserstand (Gefälle, Querschnittsfläche u. a.), Wasserdichte.
- **Meteorologie**: Luftdruck, Windrichtung, -geschwindigkeit (Seegang, Turbulenz, Sand-Wasser-Luftgemische u. a.).

Zur optimalen Analyse von Strömungsmessergebnissen ist diesen Bezugsgrößen besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Dies erfordert z. B. die Verwendung neuesten topographischen Kartenmaterials, ein ausreichend dichtes Pegelnetz, eine Windmeßstation im Untersuchungsgebiet und die Messung von Wassertemperatur, Salzgehalt und Seegang.

### 3.4 Grundsätzliche Verfahren, Registrierungen und Anwendungsweisen

#### 3.4.1 Einführung

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Wirkungsweise gebräuchlicher Meßsysteme:

Physikalischer Effekt	Benutzung der physikalischen Größe	Meßelement
Kinetische Energie	Drehbewegung	Rotor, Impeller
	Staudruck	Pitotrohr
	Strömungswiderstand	Pendelzylinder
Induktion	Magnetfeld der Erde	Induktionsschleife
	künstliches Magnetfeld	Elektroden
Mitführungseffekt	Ultraschall	Schallsonde und -empfänger
Doppler-Effekt	Licht	Lichtquelle und Photozelle
	Ultraschall	Schallsonde und -empfänger
Temperaturveränderung (Abkühlung)	Temperatur und Strom	Thermistor

Die meisten Messungen lassen sich am einfachsten und sichersten von festen Bezugspunkten aus vornehmen. Zwar ist in Flachwassergebieten die Errichtung von Grundgestellen oder Meßmasten noch realisierbar, doch sollen im Küstenvorfeld häufig nur zeitlich begrenzte Meßaufgaben gelöst werden, die den Aufwand zur Schaffung fester Bezugspunkte nicht rechtfertigen. Daher werden die Messungen oft nur von der Oberfläche (verankerte Boje oder Schiff) oder vom Meeresboden (verankerte Auftriebskörper) ausgeführt. Die dabei miterfaßten Eigenbewegungen des gesamten Meßsystems können bei ungenügender Entkoppelung als Meßfehler auftreten.

Zur exakten Bestimmung des Stromvektors wäre die Messung von sechs Komponenten erforderlich (Geschwindigkeit, zwei Richtungskomponenten relativ zu den Instrumentenachsen, drei Neigungswinkel der Instrumentenachsen zu den geographischen Koordinaten). Bisher kann keines der bekannten Geräte alle sechs Komponenten messen. Üblich sind Meßgeräte, die zwei bis vier der angegebenen Komponenten erfassen können:

- a) Das Meßgerät kann sich frei um seine stets vertikale Achse drehen. Es stellt sich durch seine Formgebung stets auf die Strömungsrichtung ein. Die Geschwindigkeit und die Kompaßstellung werden gemessen.
- b) Das Meßgerät ist nordorientiert fest montiert. Es werden nur Geschwindigkeit und zwei Richtungskomponenten gemessen.
- c) Die Achse des Meßgerätes kann sich aus der Vertikalen bewegen. Ein Zusammenhang zwischen Stromrichtung und Lage des Fühlers nach geographisch Nord besteht nicht. Es werden gemessen: Geschwindigkeit, relative Richtung, Kompaßstellung und Neigungswinkel.

Die Ausführungsformen der Meßgeräte und Meßwertaufnehmer müssen sich nach den gestellten Meßaufgaben und damit auch den Genauigkeitsanforderungen richten. Daher muß z. B. ein Brandungsstrommesser konstruktiv anders ausgelegt sein als ein Meßgerät zur Erfassung reiner Tideströmungen.

### 3.4.2 Treibkörpermessungen

Grundlage für diese Art der Strömungsmessung ist die laufende Beobachtung und Ortsbestimmung schwimmender Gegenstände (Treibgut, Schwimmer, kleine Bojen, Farbflecken, Schiff). Diese Methode gibt mit verhältnismäßig geringem Aufwand einen guten Überblick über Oberflächen- und – bei entsprechender Ausbildung der Schwimmkörper – auch Tiefenströmungsverhältnisse im Untersuchungsgebiet. Moderne Funknavigations- und -ortungsmethoden erleichtern die Ortsbestimmung.

Geignet sind alle Treibkörper, deren Unterwasserfläche erheblich größer ist als die Windangriffsfläche, so daß durch Windtrift keine erheblichen Meßfehler entstehen können.

Die Beobachtung eines oder mehrerer Schwimmkörper von einem festen Bezugspunkt aus kann durch Entfernungs- und Winkelbestimmung von mehr als einem Punkt durch Vorwärtseinschnitt erfolgen. Hierfür ist jedoch eine gute Sichtverbindung Voraussetzung. Bei einer Radarverfolgung kann die Erkennbarkeit der treibenden Objekte durch Radarreflektoren oder sogar Radartransponder erheblich gesteigert werden. Es lassen sich auch bei schlechtem Wetter Reichweiten von mehr als 50 km erzielen.

Bekannt sind auch kleine Bojen mit Funksendern bestimmter Kennung, die durch geeignete Funkortungsverfahren verfolgt werden können.

Die Verfolgung und Ortung der Treibkörper vom begleitenden Schiff aus ist nur bei ausreichend tiefen Gewässern und geringem Schiffsverkehr möglich. Grundsätzlich bietet sich jedoch auch hier die Radarverfolgung an. Vorteilhaft ist besonders die dauernde Beobachtung der Treibkörper aus geringer Distanz, da i. allg. die Verlustrate bei frei treibenden Objekten sehr hoch anzusetzen ist (Überlaufen durch Fahrzeuge, Empfangsstörungen oder Abtreiben bis in Entfernungen außerhalb der Identifizierungreichweite). Der Einsatz von Suchfahrzeugen ist nur bei hochwertigen Geräten zu vertreten.

Ein weiteres Verfahren zur Bestimmung der Oberflächenströmung ist die Farbfleckbeobachtung. Zur Verwendung kommt Uranin. Der grüne Farbfleck dient als Indikator für die Bestimmung der Geschwindigkeit und Richtung. Qualitative Farbstoffuntersuchungen werden mit einem Hubschrauber oder Flugzeug vorgenommen, wobei das Seegebiet in zeitlichen Abständen überflogen und in Farbbilddaufnahmen festgehalten wird, falls genügend Objekte zur Luftbildverzerrung vorhanden sind.

Die Verwendung von Rhodamin-B dient in erster Linie der Untersuchung von Vermischungsvorgängen, besonders in Flußmündungsgebieten und Ausflüssen. Bei Rhodamin oder ähnlichen Fluoreszenzfarbstoffen handelt es sich um künstlich erzeugte, unschädliche Fluoreszenz zur Markierung von Wasserkörpern ohne nachteilige Wirkung auf den Chemismus oder die Biologie. Konzentrationen des Farbstoffes von weniger als  $10^{-12}$  können von geschleppten Meßgeräten nachgewiesen werden. Meßfahrten werden, ausgehend vom Einbringungsort, in Mäanderform wie Lotvermessungsfahrten vorgenommen. Dabei sind Schiffs-kurs und Zeit ständig festzuhalten, um die gemessenen Konzentrationen örtlich und zeitlich zuordnen zu können.

Als ein anderes Hilfsmittel dienen kleine Kunststoffkugeln (Styroporgranulat), die in großer Zahl über Bord geschüttet werden. Mit dem Schiff wird die Strombahn des

Granulats verfolgt und mit Hilfe von Oberflächenschleppnetzen die Dichteverteilung bestimmt.

Alle Treibkörpermessungen können jedoch nur Strombahnen zu bestimmten Tidephasen wiedergeben. Zur Erfassung der sich mit der Tide ändernden Strömungsverhältnisse ist eine Vielzahl von Schwimmerbahnen zu unterschiedlichen Tidephasen erforderlich.

### 3.4.3 Mechanische Verfahren

Die Bestimmung der Stromrichtung geschieht durch Richtungsfahnen im Vergleich mit einer Nordreferenz (Magnetkompaß) oder durch hydrodynamische Formgebung des ganzen Meßgerätes.

Für die Messung der Strömungsgeschwindigkeit werden als Meßwertaufnehmer bei den meisten käuflichen Geräten Savonius-Rotoren, verschiedene Arten von Impel-

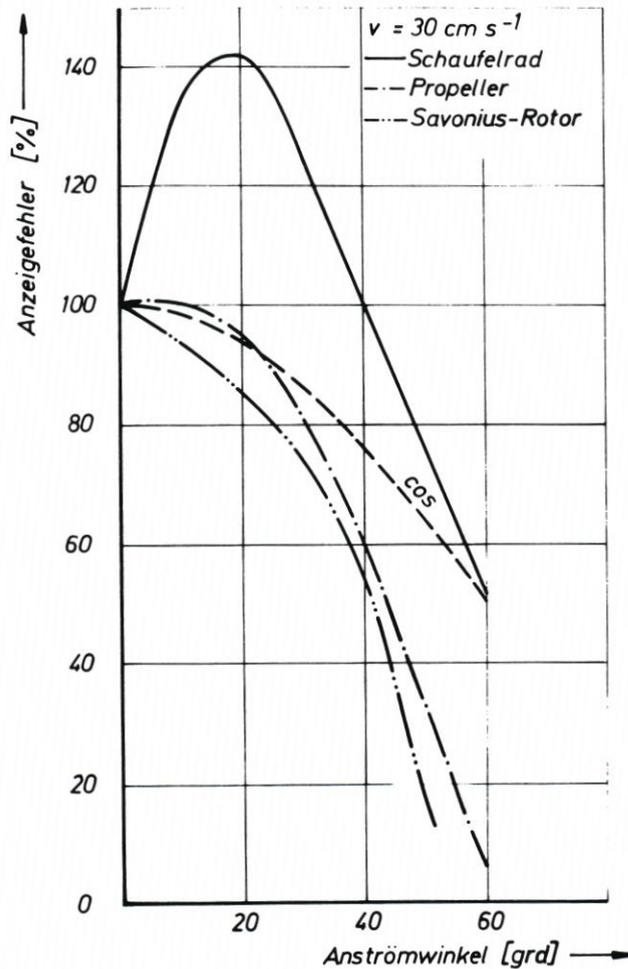


Abb. 3.1: Fehlerkurven für Neigungswinkel einiger mechanisch bewegter Sensoren

lern oder Schaufelräder verwendet. Die Übertragung der Drehbewegung auf die Registriereinheit im Geräteinneren geschieht durch Magnetkupplungen, Reedkontakte oder Lichtimpulse, so daß Dichtungsprobleme in diesem Bereich nicht auftreten. Die Charakteristik der Meßwertaufnehmer ist linear und proportional zur Strömungsgeschwindigkeit; deshalb ist es leicht einzusehen, daß die Anlaufgeschwindigkeit des Meßwertaufnehmers im wesentlichen bestimmt wird durch seine Eigenträgheit und die Leichtgängigkeit der Über- bzw. Untersetzungsgetriebe für die Registriereinheit. Die Anlaufgeschwindigkeiten liegen bei einwandfreien Geräten im Mittel zwischen 1,5 und 5 cm/s.

Die mechanisch wirkenden, beweglichen Meßwertaufnehmer sind störanfällig gegen Verunreinigungen der Lager und Bewuchs. Sie sind damit im Flachwasserbereich nur zeitlich begrenzt einsetzbar.

Ein Savonius-Rotor kann in seiner horizontalen Ebene von allen Seiten angeströmt werden und erfaßt dabei, im Gegensatz zu Impellern, die reine Relativbewegung des Meßgerätes gegen das Wasser. Wird die vertikale Achse des Rotors geneigt, dann müssen je nach Größe des Neigungswinkels die Anzeigefehler nach der Fehlerkurve in Abb. 3.1 korrigiert werden. Die Korrektur ist aber nur dann sinnvoll, wenn neben der Geschwindigkeitsmessung auch Werte für die Geräteneigung vorliegen. Es empfiehlt sich daher, die Meßgeräte mit Savonius-Rotoren entweder nur in Verbindung mit Grundgestellen oder festen Meßsorten einzusetzen.

Beim Einsatz von beweglichen Geräteträgern oder in Verbindung mit Verankerungssystemen sind die unerwünschten Bewegungseinflüsse kaum zu eliminieren. Der Normalströmung überlagerte Gerätebewegungen oder Orbitalströmungen werden nur additiv erfaßt, d. h., die angezeigten Strömungswerte sind in der Regel zu groß.

Impeller sind mehrflügelige und schraubenförmige Meßwertaufnehmer. Die Drehachse muß stets in Wirkungsrichtung der Strömung liegen. Die Relativbewegungen addieren oder subtrahieren sich richtungsabhängig, weil die Impeller sehr trägheitsarm im Vergleich zum gesamten Meßgerät sind, das auf kurzzeitige Änderungen (Turbulenzen) nicht anspricht.

Im Küstenbereich und in Ästuaren (auch Wassertiefen  $> 4$  m) ist die Verwendung von Turbinenrädern (Schaufelradstrommesser) relativ häufig. Diese Geräte sind für die Meßaufgabenstellung sehr robust aufgebaut und den Beanspruchungen in den og. Gewässerbereichen gewachsen (Treibgut etc.). Allerdings sind die Schaufelräder durch ihre Größe und Massenträgheit (das Registrierwerk einschließlich Kompaß befindet sich im Inneren des Schaufelrades) nicht in der Lage, kleine Stromgeschwindigkeiten zu messen, da die Anlaufgeschwindigkeit bei einwandfrei arbeitenden Geräten zwischen 10 und 15 cm/s liegt. Weiterhin ist bei ihrer jetzigen Konstruktion von Nachteil, daß sie bei Schräganströmung eine Drehgeschwindigkeitserhöhung dadurch erfahren, daß die das Drehmoment bestimmende wirksame Fläche der Schaufel vergrößert wird (GÖHREN, 1968). Dieser Nachteil könnte durch eine hydrodynamisch günstigere Form des Strommessers ausgeglichen werden.

Wie in Abb. 3.1 dargestellt, sind alle bekannten beweglichen Meßwertaufnehmer neigungsempfindlich und die erfaßten Meßwerte bei von der Hauptwirkungsrichtung abweichender Anströmung mit Fehlern behaftet. Ihre Anwendung ist daher nur unter den o. a. Gesichtspunkten zu empfehlen. Es sei außerdem auf die Empfindlichkeit aller beweglichen Teile gegen Treibsel, Kraut, Seetang und Bewuchs hingewiesen.

Weitere vergleichende Untersuchungen von mechanischen Meßverfahren sind in UNESCO TECHNICAL PAPERS (1969, 1974) zu finden.

## 3.4.4 Akustische Verfahren

Strommesser, die nach dem akustischen Prinzip arbeiten, sind bisher sehr selten. Deshalb werden sie nur der Vollständigkeit halber erwähnt. Der Nachteil liegt z. Z. noch in dem hohen elektronischen Aufwand, der zur Berechnung des Stromvektors erforderlich ist.

Mit Hilfe moderner elektronischer Bauteile werden akustische Strommesser in den kommenden Jahren sehr viel stärker auf dem Markt vertreten sein, da sie – wie auch die Anwendung des elektromagnetischen Prinzips – den entscheidenden Vorteil haben, als Meßwertaufnehmer keine anfälligen, mechanisch bewegten Teile zu besitzen und daher auch gegen Bewuchs und Verkräutung weitgehend unempfindlich zu sein.

Beim Dopplerverfahren wird eine Schallwelle an zufällig vorhandenen, suspendierten Partikeln reflektiert, wobei die Frequenz des zurückgestreuten Signals infolge des Dopplereffektes gegenüber der Frequenz des einfallenden Signals verschoben ist. Aus der Frequenzverschiebung wird die Geschwindigkeit ermittelt. Aus Abb. 3.2 geht das Prinzip der Messung hervor. Eine gebündelte Schallwelle wird von einem Schwinger S in das mit einer Geschwindigkeit  $\vec{v}$  strömende Medium abgestrahlt. Ein weiterer Schwinger E empfängt einen Teil der Streustrahlung, die im Volumen V entsteht. – Der Vorteil einer Strömungsmessung nach dem Dopplerverfahren besteht darin, daß die Strömungsgeschwindigkeit an einem Ort gemessen wird, wo sie durch die eingebrachte Meßapparatur ungestört ist.

Ein Strömungsmesser nach dem Laufzeitverfahren nutzt die Tatsache, daß eine Schallwelle mit der Strömung schneller läuft als gegen sie. Man mißt die Schallgeschwindigkeit

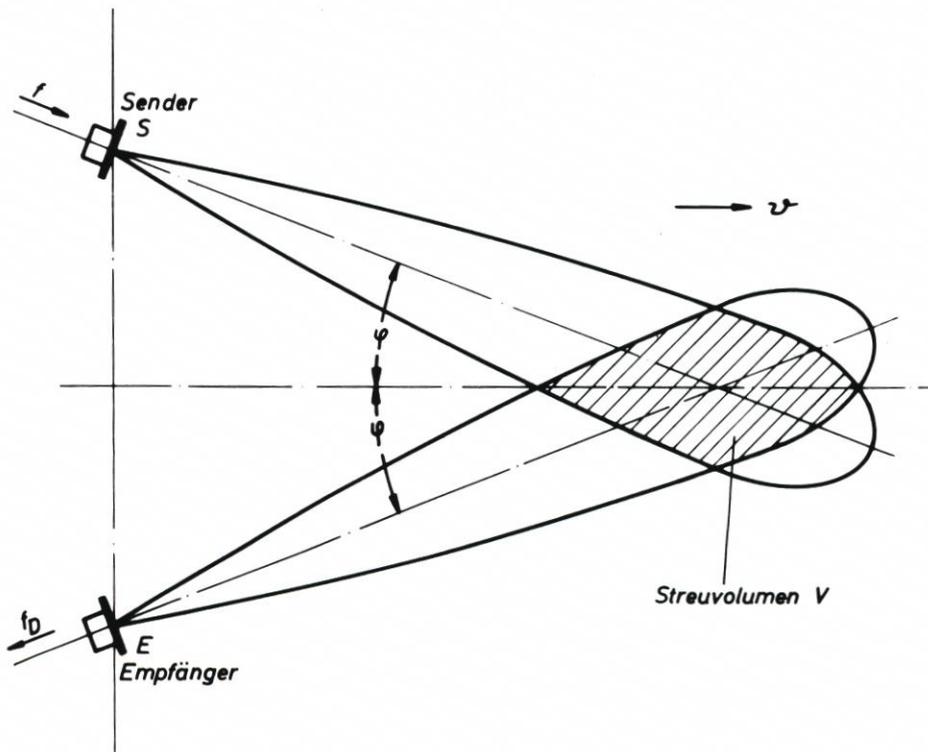


Abb. 3.2: Prinzip des akustischen Dopplerverfahrens

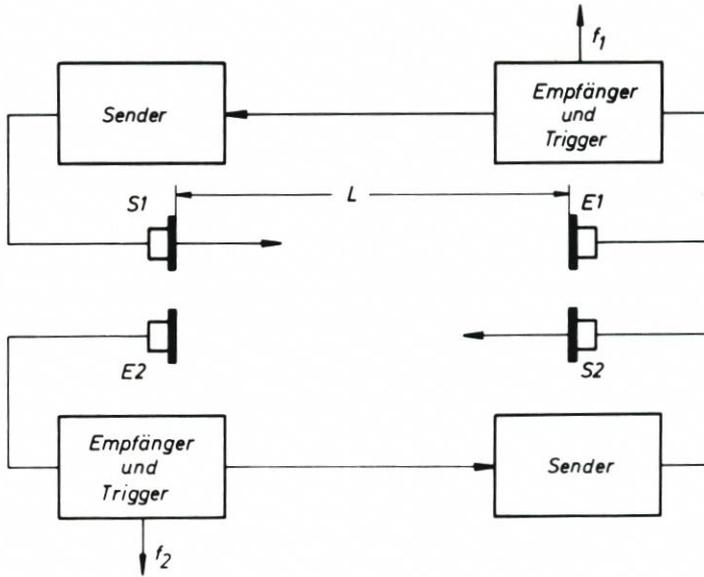


Abb. 3.3: Prinzip des akustischen Sing-Around-Verfahrens

in zwei zueinander entgegengesetzten Richtungen, und die Laufzeitdifferenz ist ein Maß für die Stromgeschwindigkeit.

Beim Sing-Around-Verfahren durchläuft ein Schallimpuls im Wasser die Strecke  $L$ , wird von einem Empfänger in einen elektrischen Impuls verwandelt und stößt einen Trigger an. Der Triggerimpuls löst beim Sender erneut einen Schallimpuls aus. Werden zwei Schwingerpaare in die Strömung eingebracht, bei denen die Impulsübertragung in entgegengesetzter Richtung stattfindet (Abb. 3.3), ergeben sich zwei Sing-Around-Frequenzen, aus denen sich durch Differenzbildung die Strömungsgeschwindigkeit ermitteln läßt.

Diese Bedingungen gelten nur in erster Näherung, wenn die Signallaufzeit in den Wandlern und in der Elektronik vernachlässigbar klein ist, was in der Praxis nicht zutrifft. Es ist also noch ein konstanter Term der Elektronik zu berücksichtigen.

Bei allen beschriebenen akustischen Verfahren handelt es sich jeweils nur um die Messung einer Komponente des Stromvektors. Es muß also entweder eine zweite Meßeinrichtung im Winkel von  $90^\circ$  angeordnet oder der Strommesser durch hydrodynamische Formgebung stromrichtungsorientiert werden.

### 3.4.5 Elektromagnetisches Verfahren

Das elektromagnetische Verfahren zur Durchflußmessung in Rohren ist in der Verfahrenstechnik und als Schiffslog für Schiffsgeschwindigkeitsmessungen seit Jahren eingeführt. Die prinzipielle Anordnung wird in Abb. 3.4 gezeigt. Mittels einer Spulenordnung wird ein Magnetfeld erzeugt, dessen Feldlinien senkrecht zur Strömungsrichtung verlaufen. Nach dem FARADAYSchen Induktionsgesetz wird in einer elektrisch leitenden Flüssigkeit eine Feldstärke induziert, die an einem Elektrodenpaar abgegriffen werden kann.

Die Spannungswerte liegen mit 50 bis 80  $\mu\text{V}$  pro m/s in einem Bereich, in dem elektrolyti-

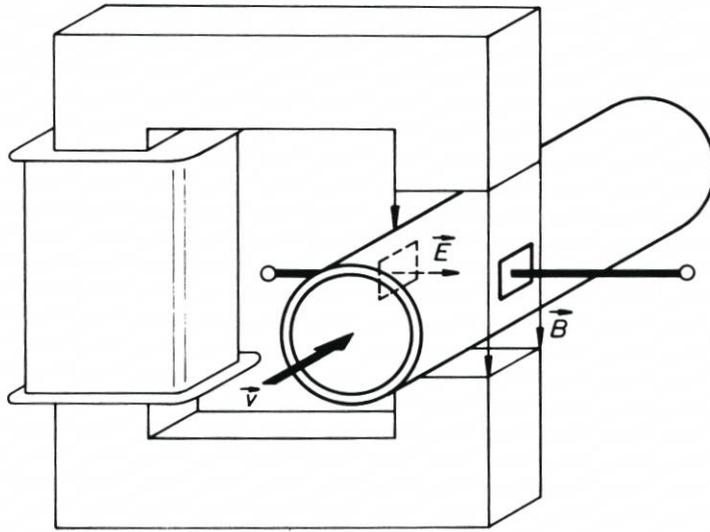


Abb. 3.4: Prinzipielle Anordnung des elektromagnetischen Verfahrens

sche Effekte an den Elektroden entstehen. Deshalb wird mit Wechselfeldern zwischen 40 und 60 Hz gearbeitet, um diesen Störeffekt zu vermeiden.

Zur Zeit werden etwa 10 EM-Strommesser verschiedener Hersteller angeboten. Grundsätzlich unterscheiden sie sich nur in der Größe der Meßwertaufnehmer und der Stärke des

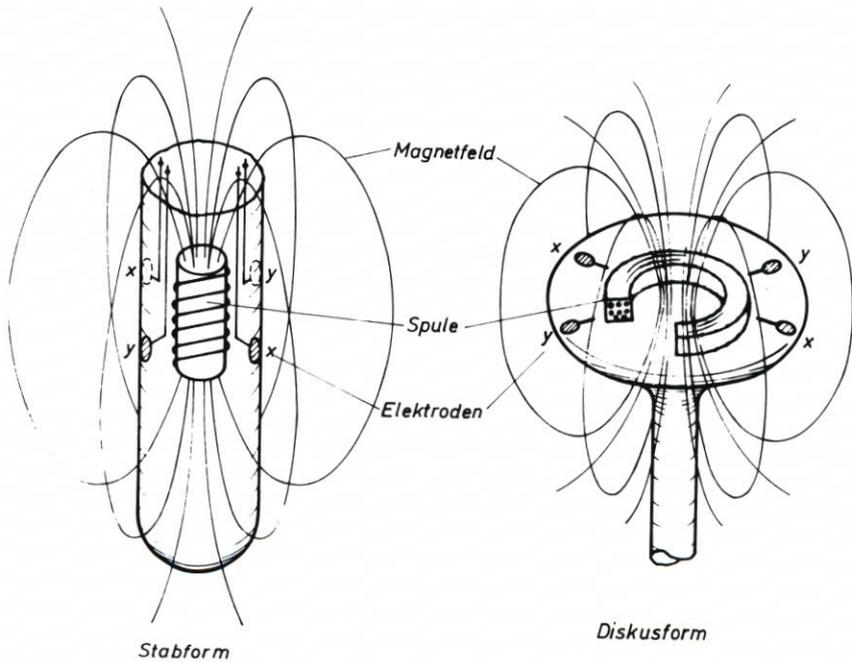


Abb. 3.5: Verschiedene Ausführungsformen des EM-Strommessers

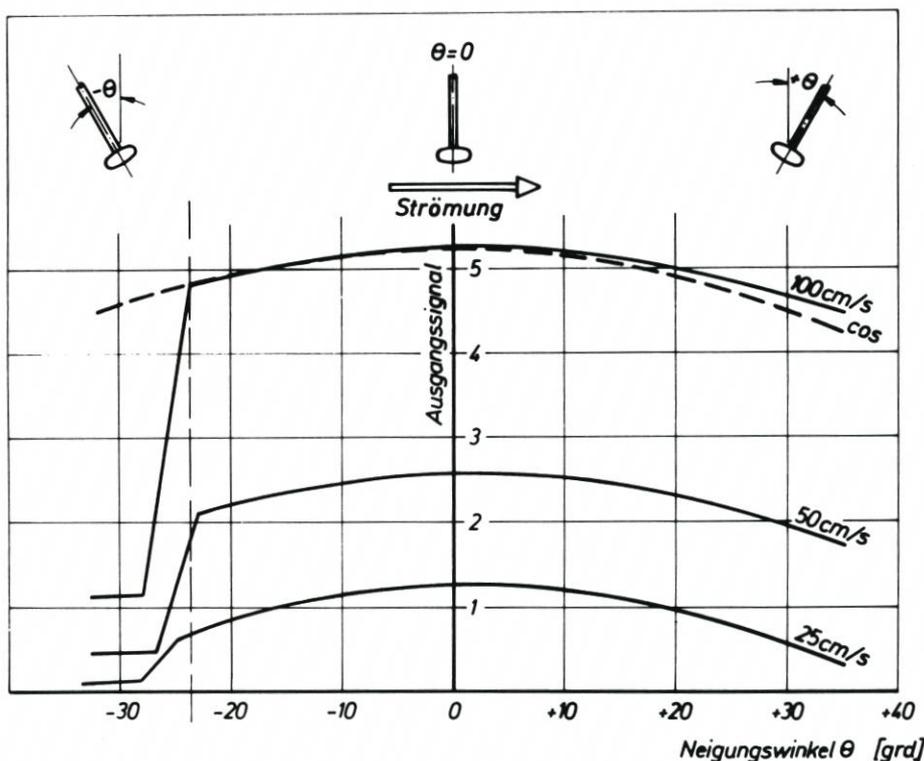


Abb. 3.6: Fehlerkurven für Neigungswinkel eines diskusförmigen EM-Strommessers

elektromagnetischen Feldes. Die meisten Hersteller verwenden die Diskusform als Sensor, wenige benutzen die Stab-Ausführung. Beide Ausführungen sind in Abb. 3.5 dargestellt. In einer vergleichenden Untersuchung stellt TUCKER (1965) fest, daß die Stabausführung bei größeren Stromgeschwindigkeiten mehr Probleme hinsichtlich der Abschattung der Elektroden und Turbulenzbildung aufweist.

In Tankversuchen (TUCKER, 1965) ist nachgewiesen worden, daß ein diskusförmiger Sensorkopf bei horizontaler Anströmung bis auf maximale Abweichungen von  $2^\circ$  dem Cosinusgesetz folgt. Neigt man die vertikale Diskusachse, so wird eine geringere Abweichung vom Cosinusgesetz festgestellt. In Abb. 3.6 sind die Fehlerkurven bei positiven und negativen Neigungswinkeln dargestellt. Überraschend ist, daß bei negativen Neigungswinkeln die Ausgangsspannung bei einem kritischen Wert von ca.  $25^\circ$  praktisch auf Null fällt. Zu ähnlichen Meßergebnissen kommt auch SOULSBY (1970). In diesem Fall wird sich ein Sensorkopf in Stabform besser dem Cosinusgesetz anpassen.

In oberflächennahen Schichten, in denen der Normalströmung eine große Orbitalströmung überlagert sein kann, wird sich ein stabförmiger Sensorkopf besser eignen als eine Diskusform. In beiden Fällen wird die angezeigte Strömungsgeschwindigkeit jedoch größer sein als die tatsächliche.

### 3.4.6 Sonstige Verfahren

Thermisch arbeitende Meßeinrichtungen für Dauerstrommessungen sind bisher nicht bekannt geworden, wohl aber Meßgeräte für Tankmessungen, die besonders bei turbulenten Vorgängen verwendet werden. Die Verwendung von *Thermosonden* im Wasser erfordert besondere Vorsichtsmaßnahmen hinsichtlich der Gasblasenbildung an der Oberfläche der Sonde. Daraus ergibt sich eine Änderung des Wärmeüberganges zwischen Sonde und Wasser, die sich in unregelmäßigen Schwankungen der Geschwindigkeitsanzeige ausdrückt. Die absolute Größe dieses Effektes kann aufgrund der wenigen veröffentlichten Arbeiten über Messungen im Wasser nicht bestimmt werden. Einige Autoren beachten das Problem der Blasenbildung überhaupt nicht, während andere es als eine immer wieder auftretende Schwierigkeit beschreiben. Es wird außerdem keine scharfe Trennung zwischen der thermischen und elektrolytischen Entstehungsursache der Gasblasen gezogen. Die Elektrolyse wirkt sich bei Dauermessungen insofern nachteilig aus, als sie zu einer Erosion des Hitzdrahtes oder Heißfilmes führt. Abhilfe könnte hier allerdings eine Quarzbeschichtung oder die Verwendung einer hochfrequenten Wechselstromheizung schaffen.

Aus den aufgezeigten Problemen läßt sich entnehmen, daß auch in Zukunft auf See einsetzbare Geräte nicht verfügbar sein werden; deshalb soll hier nicht weiter darauf eingegangen werden.

Ebenfalls von untergeordneter Bedeutung sind Strömungsmessverfahren, die nach dem Prinzip der Messung des *Staudruckes* oder des *Strömungswiderstandes* eines Körpers arbeiten. Diese Verfahren werden nun in Tankversuchen oder bei Sielzugmessungen genutzt. Von brauchbaren Meßeinrichtungen für den See-Einsatz ist nichts bekannt. Aus diesem Grund werden sie nur der Vollständigkeit halber genannt.

### 3.4.7 Hilfsgrößen

Nachfolgend sollen die bekannten Methoden der Richtungsbestimmung dargestellt werden. Ausgehend von den verschiedenen Möglichkeiten der Geschwindigkeitsmessung sind drei Verfahren möglich (siehe Abb. 3.7):

- a) Meßgeräte, die – hydrodynamisch günstig gestaltet – sich in Stromrichtung einstellen. Durch die relativ große Massenträgheit des Gerätes werden kleine und schnelle Richtungsänderungen des Stromes wegen der großen Einstellzeitkonstanten entweder überhaupt nicht oder nur als Mittelwert erfaßt. In den meisten Anwendungsfällen genügen die erzielten Richtungswerte den Meßanforderungen. Die Richtungsbestimmung erfolgt durch einen Magnetkompaß.

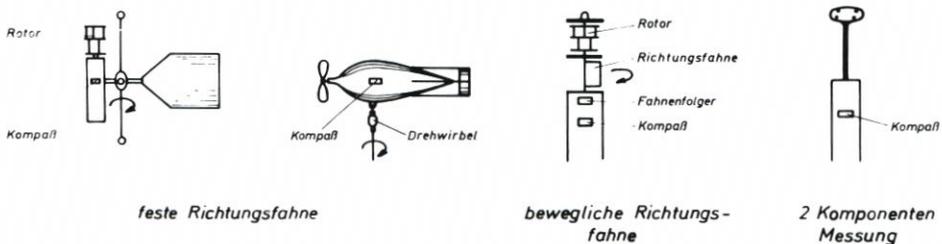


Abb. 3.7: Möglichkeiten der Richtungsbestimmung

- b) Meßgeräte mit kleiner Richtungsfahne, die sich axial frei bewegen kann. Die Richtungsfahne hat eine kleine Einstellzeitkonstante und ist damit in der Lage, kurzzeitig Richtungsschwankungen zu erfassen. Über induktive Kopplung in das Geräteinnere wird die Stellung der Fahne über ein Fahnenfolgesystem auf ein Potentiometer oder eine kodierte Scheibe übertragen. Zusätzlich muß mit einem Kompaß die relative Richtung des Gerätes gegenüber Nord bestimmt werden. Durch Addition der beiden Winkel ergibt sich die nordbezogene Stromrichtung.
- c) Wird die Strömungsgeschwindigkeit bereits in X-Y-Komponenten gemessen, so wird keine Richtungsfahne benötigt. Dabei muß die relative Richtung des Gerätes gegenüber Nord (fest eingebaut oder beweglich mit Kompaßanzeige) bekannt sein.

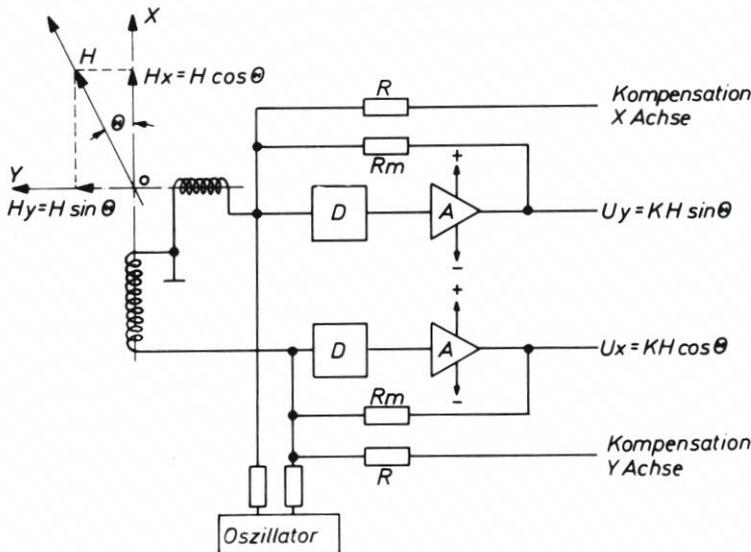
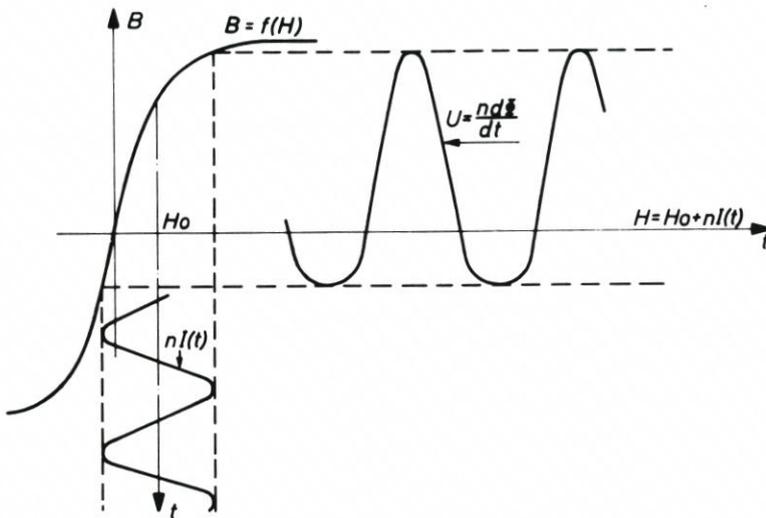


Abb. 3.8: Funktionsweise eines 2-Achsen-Luftspalt-Magnetometers

Magnetkompaßsysteme sind hochempfindlich und müssen daher mit Sorgfalt behandelt werden. Die Einstellzeitkonstante soll durch eine Dämpfung dem Meßgerät angepaßt sein. Vertikale Neigungen dürfen je nach Kompaßtyp 10 bis 20° nicht überschreiten. Erreichbare Genauigkeiten liegen zwischen  $\pm 3$  bis  $\pm 7,5^\circ$  und sollten bei jedem Gerät durch eine Kalibrierung überprüft werden. Zu beachten ist weiterhin, daß bei Einsatz der Geräte in unmittelbarer Nähe ferromagnetischer Teile (Schiffskörper, Stahlseile, Verankerungselemente aus Eisen) erhebliche *Deviation*sfehler auftreten können. Beim Einsatz vom Schiff ist daher stets eine Deviationstabelle für das Gerät aufzustellen.

Bei Geräten mit photographischer Registriereinrichtung wird die Kompaßstellung parallel zur Geschwindigkeitsmessung photographisch erfaßt. Ist die Kompaßrose als kodierte Scheibe (360° im Gray-Code mit 7-bit-Auflösung) ausgebildet, kann sie photoelektrisch abgetastet werden. Das entstehende elektrische Signal wird registriert.

Eine andere Kompaßausführung hat AANDERAA (1967) beschrieben. Die frei drehbare Kompaßnadel ist als Schleifer eines Potentiometers ausgebildet. Bei einer Messung wird die Kompaßnadel durch einen Elektromagneten auf der Wendel eines 358°-Potentiometers arretiert, so daß ein Widerstandswert oder bei angelegter Spannung ein Spannungswert gemessen werden kann.

In neuerer Zeit sind Nordreferenzen auf dem Markt, die – vom Verfahren schon lange bekannt – als 2-Achsen-Magnetometer arbeiten. Vom horizontalen Erdmagnetfeld werden die X- und Y-Komponenten gemessen. Die zwei Magnetometer sind in der horizontalen Ebene kardanisches aufgehängt, so daß Neigungswinkel von  $\pm 45^\circ$  zulässig sind. Die Funktionsweise ist in Abb. 3.8 dargestellt. Das beschriebene Kompaßsystem bietet weiterhin den Vorteil, daß geräte- bzw. systembedingte Deviationen durch zusätzlich von außen eingeprägte Gleichströme kompensiert werden können. Der Meßbereich der Magnetfeldkomponenten beträgt  $-40$  bis  $+40 \mu\text{T}$ , der Winkelmeßbereich  $0 - 360^\circ$  bei einer Genauigkeit von  $\pm 20$  Winkelminuten. Der Kompensationsbereich ist  $\pm 10 \mu\text{T}$ .

Gewährleistet das ausgelegte Meßsystem nicht, daß ein zulässiger Neigungswinkel nicht überschritten wird, so sollte die Neigung des Gerätes miterfaßt werden. Neigungsmesser können entweder

- a) nur den größten Neigungswinkel, der meistens in der Ebene der Strömungsrichtung liegt (Drehgelenk), erfassen oder
- b) die Neigung in zwei senkrecht zueinander liegenden Achsen registrieren und auf geographisch Nord beziehen.

Der letzte Fall ist häufiger vertreten. Gemessen wird die Auslenkung eines Pendels aus der Normallage (Schwerkraftprinzip).

Elektrolyt-Neigungsfühler arbeiten nach dem Prinzip der Libelle einer Wasserwaage. Je nach Neigungsänderung und Menge des eingefüllten Elektrolyts wird der Widerstand zwischen zwei parallelen Elektroden verändert und entsprechend registriert. Es können Genauigkeiten von  $\pm 5\%$  vom Winkelmeßbereich bei Zeitkonstanten von 10 s erreicht werden.

Genauer, dafür auch wesentlich teurer, sind einachsige Pendelpotentiometer. Der flüssigkeitsgedämpfte Schleifer eines Golddraht-Potentiometers ist als Pendel ausgebildet. Genauigkeiten liegen im Bereich  $\leq 1^\circ$ . Die Ausgangsfunktion ist linear.

Ebenfalls nach dem Pendelprinzip arbeitet ein anderer Neigungsmesser. In einem Differentialtransformator verändert die Stellung des Pendels das Ausgangssignal. Ein Servo-Motor, angesteuert durch einen Kompensationskreis, bringt das Pendel wieder in seine Normalposition und hält es dort für die Zeit der Messung. Der aufzubringende Motorstrom erzeugt über einen Widerstand einen Spannungsabfall, der proportional zu dem Auslenkwinkel ist.

### 3.4.8 Meßwertregistrierung

Neben der Meßwerterfassung nimmt die Aufbereitung der Meßwerte im Gerät und die Registrierung einen ebenso wichtigen wie umfangreichen Teil der Strömungsmesstechnik ein. Vor Beschaffung und Einsatz eines Meßsystems ist deshalb genau zu überlegen, in welcher Form die zu erfassenden Parameter registriert und ausgewertet werden sollen. Andernfalls muß mit einem Vielfachen der Auswertzeit gegenüber der reinen Meßzeit gerechnet werden.

Nicht jeder Sensor liefert an seinem Ausgang ein registrierfähiges Signal, bzw. nicht jedes Registriergerät ist für jede Form der Datenaufzeichnung geeignet. Es ist auch dargestellt worden, daß bei den Strömungsmessungen die Kenntnis über eine Reihe von Hilfsparametern erforderlich ist. Die Ausgänge aller Sensoren eines Meßgerätes sind über Meßwertwandler (Verstärker, Frequenzwandler, Analog/Digitalwandler, optische Wandler etc.) in ein einheitliches Format zu bringen, so daß der Eingang des Registriergerätes für alle Sensoren gleich sein kann. Das bedeutet auch, daß die vorkommenden, sehr unterschiedlichen Meßbereiche auf die entsprechende Aufzeichnungsbreite abgestimmt werden. Es ist auch bekannt, daß die einzelnen Sensoren mit verschiedenen Zeitkonstanten behaftet sind, die möglichst aufeinander abgestimmt sein sollten.

Von noch größerer Bedeutung ist die Frage: In welchen zeitlichen Abständen und wie lange sollen zeitlich veränderliche Vorgänge erfaßt werden? Diese Frage kann mit letzter Sicherheit erst nach Abschluß der Auswertung einer Meßreihe beantwortet werden. Es ist aber wichtig, daß vor jeder Messung erwogen wird, welcher zeitlichen Funktion die zu erfassende Meßgröße folgen könnte und wie groß mögliche Störgrößen sein könnten, um dann die Abtastrate (Samplingrate) und die Integrationszeit entsprechend zu wählen. Die Abtastrate ist kleiner als die halbe Periode der kleinsten interessierenden Veränderung zu wählen. Als Integrationszeit sollte je nach Meßaufgabenstellung ein Vielfaches der Abtastrate eingestellt werden.

Grundsätzlich werden zwei verschiedene Arten der Registrierung unterschieden:

Bei einer Analogwertregistrierung wird der in Form einer Spannung, Stromstärke oder eines Widerstandes vorliegende Meßwert innerhalb einer zugeordneten Skala entweder direkt auf verschiedene Arten von Schreibern oder indirekt auf einem Magnetband festgehalten. Die Lage und Bewegungstendenz eines direkt registrierten Meßwertes sowie fehlerhafte Aufzeichnungen sind sofort erkennbar. Die aufgenommene Meßreihe läßt sich gut überblicken; in erster Näherung ist eine Mittelwertablesung möglich. Für die elektronische Datenverarbeitung ist eine Analogregistrierung schlecht geeignet.

Bei der Digitalwertregistrierung wird der Meßwert in Zahlenform dargestellt. Das kann direkt auf Druckern oder indirekt auf Datenträgern (Magnetband, Lochstreifen, Film) geschehen, wobei der Zahlenwert auch in kodierter Form gespeichert erfaßt werden kann (z. B. Binär-, BCD- oder Hexadezimalcode). Die Aufnahmefähigkeit der Datenträger ist bei kodierten Digitalwerten erheblich größer als bei Analogwerten und ermöglicht damit eine wesentlich längere Einsatzdauer und Wartungsfreundlichkeit der Geräte. Ein unmittelbarer Vergleich parallel erfaßter Werte und eine Kontrolle ist bei ausgedruckten Meßwerten nur bedingt, bei kodierten kaum möglich. Die digitale Meßwertregistrierung ist jedoch Vorbedingung für eine automatische Datenverarbeitung (EDV) und deshalb als die wirtschaftlichste Form anzusehen.

Die Registriersysteme können in drei Gruppen eingeteilt werden:

- a) manuelle Eintragung der angezeigten Werte in Formblätter (z. B. Anzahl der Flügeldrehungen, Entfernung und Ortsbestimmung bei Triftmessungen etc.),

- b) direkt anzeigende bzw. registrierende Systeme (hierzu gehört auch die Fernübertragung über Kabel bzw. Funk),
- c) indirekt registrierende Systeme.

Meßgeräte, die nur Anzeigeeinstrumente und keinen Parallelausgang für Schreiber oder Druckeranschluß besitzen, sollten schon aus Gründen der Wertedokumentation nicht mehr zum Einsatz kommen. Die Auswertung der Datenlisten ist umständlich, zeitraubend und lohnintensiv.

Zu den Registriergeräten der Gruppe b) gehören Ein- und Mehrkanallinienschreiber, Punktdrucker, Drucker, Datensichtgeräte, Fernschreibmaschinen und Schnelldrucker. Sie können jederzeit vom Beobachter abgelesen und notfalls gewartet werden (Nachfüllen von Tinte, Auswechseln von Schreibfedern, Farbbändern, Registrierpapier usw.). In besonders interessanten Meßphasen lassen sich während der Messung Eingriffe in die Registrierung vornehmen, wie z. B. Vergrößerung der zeitlichen Auflösung und Wechseln der Meßbereiche.

Indirekt registrierende Systeme erlauben keinen direkten Zugriff zu den Meßdaten. Unregelmäßigkeiten und Meßfehler müssen erst in Auswerteverfahren aufgespürt werden, bevor sie eliminiert werden können. Die analogen oder digitalen Meßinformationen werden auf Datenträgern wie Magnetband, Lochstreifen oder Film aufgezeichnet und erfordern eine Datenumsetzung in eine lesbare Form. Die auch zukünftig modernste und gebräuchlichste Form der indirekten Meßdatenaufzeichnung ist die Magnetbandregistrierung auf Kassette.

Bei allen magnetischen Aufzeichnungsverfahren werden Binärzeichen (Bits) durch den Magnetisierungszustand „Nord“ oder „Süd“ oder durch den Flußwechsel von einem zum anderen Zustand dargestellt. Der von einem Bit belegte Bereich einer Spur wird mit Spurelement bezeichnet. Die Magnetisierung der Spurelemente wird grundsätzlich bis zur Sättigung durchgeführt, damit eventuell auf dem Band vorhandene Aufzeichnungen sicher überschrieben werden und beim Lesen keine Störsignale ergeben. Ein Binärzeichen wird durch zwei Merkmale gekennzeichnet:

- einen Zustand logisch 1 oder logisch 0, der der Sättigungsmagnetisierung „Nord“ oder „Süd“ entspricht oder dem Übergang von einer zur anderen,
- eine raumzeitliche Lage, die mit Hilfe eines Taktes einer Zeitbasis definiert wird.

Die Registriersysteme der Gruppen b) und c) können sowohl in manuell gesteuerte als auch in selbstregistrierende Geräte eingebaut sein. Sie müssen im letzteren Fall einen hohen Grad an Zuverlässigkeit und Robustheit aufweisen, da eine Kontrolle nur in größeren Zeitabständen möglich ist. Die erfaßten Vorgänge lassen sich erst nach Wiederaufnahme des Gerätes reproduzieren.

### 3.4.9 Meßdatenaufbereitung und -auswertung

Vor der Auswertung müssen die registrierten Meßwerte entsprechend aufbereitet werden. Die gewonnenen Meßreihen sind hierzu in ein Format zu bringen, so daß eine Auswertung hinsichtlich der gestellten Meßaufgabe erfolgen kann. Dazu sind Lesegeräte erforderlich, die (von Hand, halb- oder ganzautomatisch betrieben) das registrierte Datenformat in eine lesbare Form oder in eine Sprache umsetzen, die von größeren Datenauswertungsanlagen (Rechnern) verwertet werden können. Diese Meßdatenaufbereitung ist der zeitlich aufwendigste und damit kostspieligste Teil einer Auswertung. Die hierfür anfallenden Kosten werden in der Regel unterschätzt. Deshalb sollte beim Ankauf von Strommessern ein besonderes Augenmerk darauf gerichtet werden, ob die Kombination mit einem wirtschaftli-

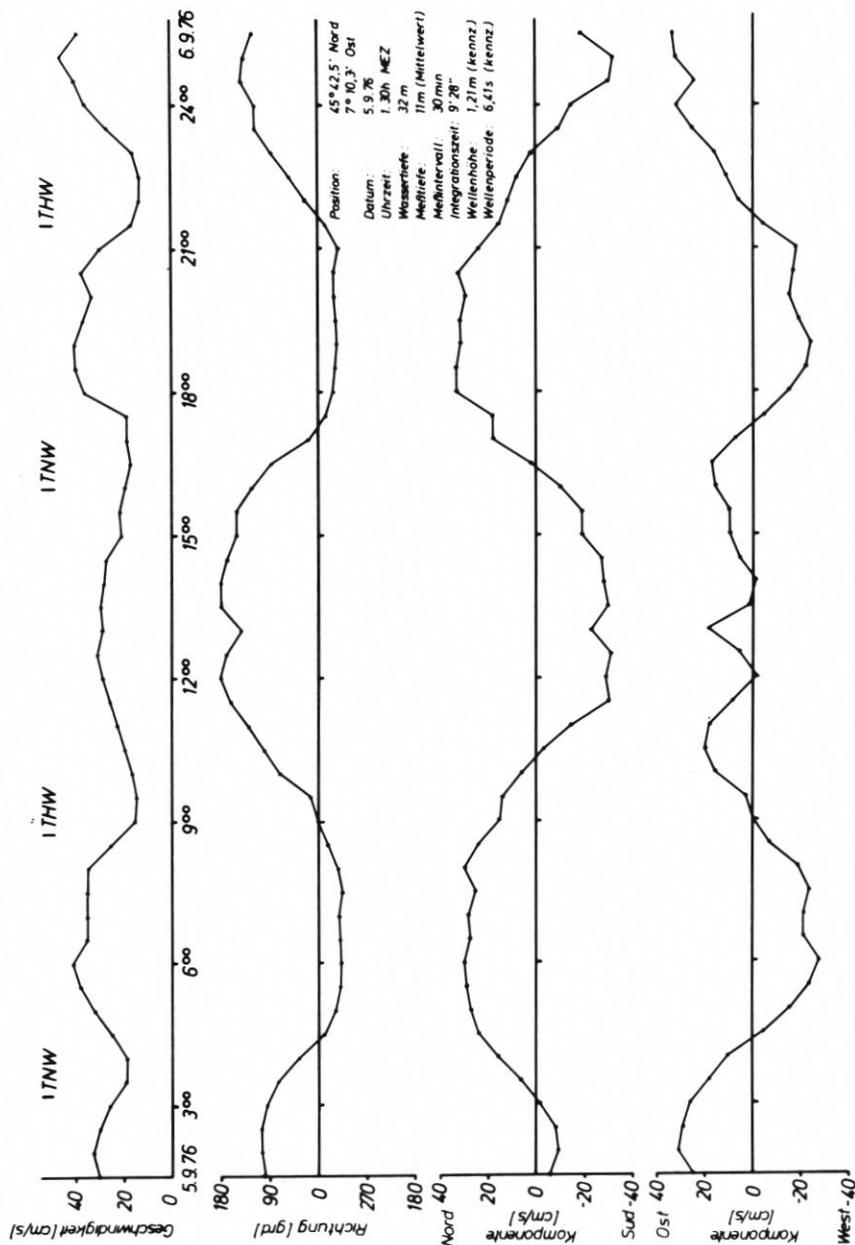


Abb. 3.9: Strömungsregistrierung an der FP „Nordsee“ mit OMDES-Meßsystem

chen Datenaufbereitungs- oder Auswertegerät möglich ist. Beim Preisvergleich von Strommessern sind deshalb alle für die Aufbereitung und Auswertung anfallenden Kosten einzubeziehen.

Die Meßdatenauswertung ist mit der endgültigen Darstellungsform und der gestellten Meßaufgabe eng verknüpft. Letztlich ist es das Ziel, die untersuchten Zusammenhänge anschaulich und übersichtlich darzustellen und zu interpretieren. Es gibt eine Reihe von Hilfsmitteln für die Auswertung, angefangen von Tabellenwerten, Maßstäben, Kurvenschei-

ben, Tischrechnern bis hin zu Klein- und Großrechenanlagen mit Schnelldruckern und Plottern.

Die Möglichkeiten der Auswertung der direkt registrierten oder tabellierten Daten sind vielfältig und können hier nicht im einzelnen erläutert werden.

Die für eine ADV-Auswertung erforderlichen Rechenprogramme müssen auf das jewei-

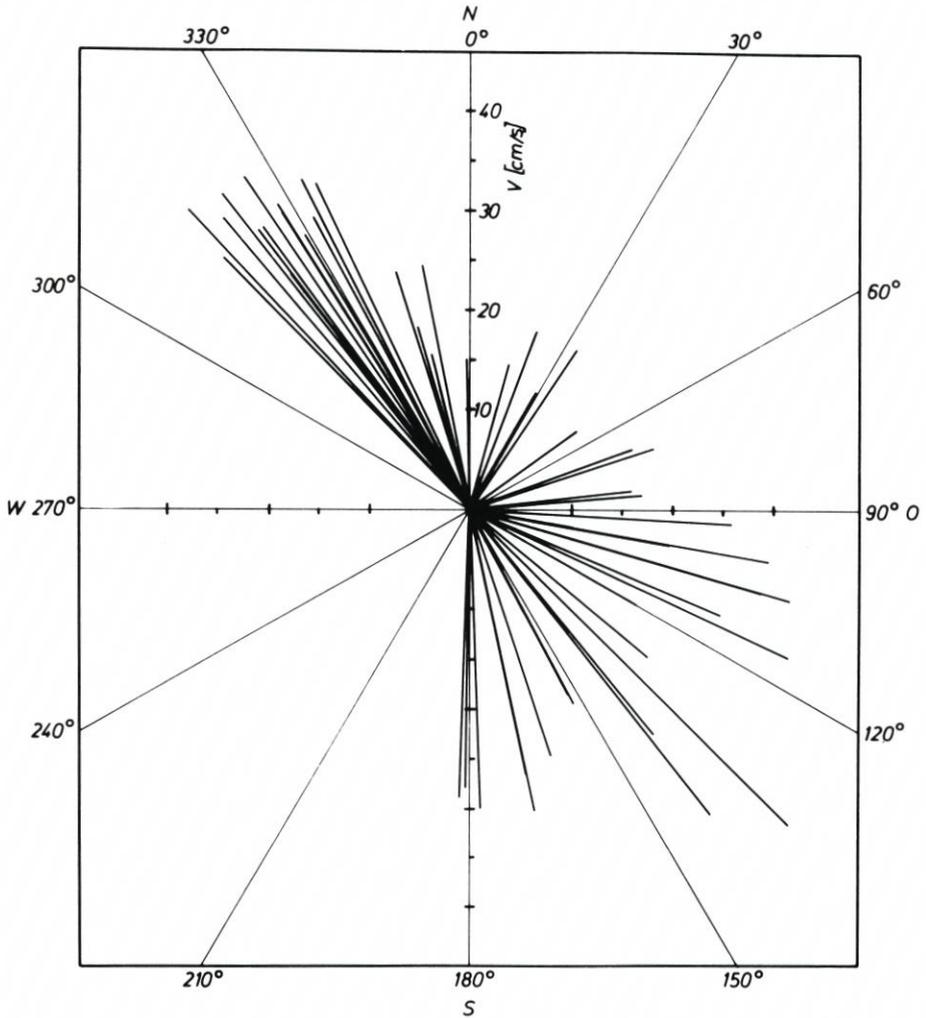


Abb. 3.10: Vektordiagramm

lige Meß- und Registersystem und die Datenaufbereitung sowie die technisch/wissenschaftlichen Anforderungen des Meßprogrammes abgestimmt sein. Dabei spielen Rechenzeiten und -kosten eine entscheidende Rolle.

An einem Beispiel sollen verschiedene Darstellungsformen von Strömungsmessungen gezeigt werden. Es handelt sich um einen 24stündigen Auszug einer mehrwöchigen Meßreihe, aufgenommen vom 5.-6. 9. 1976 an der Forschungsplattform „NORDSEE“. Die Meßdaten

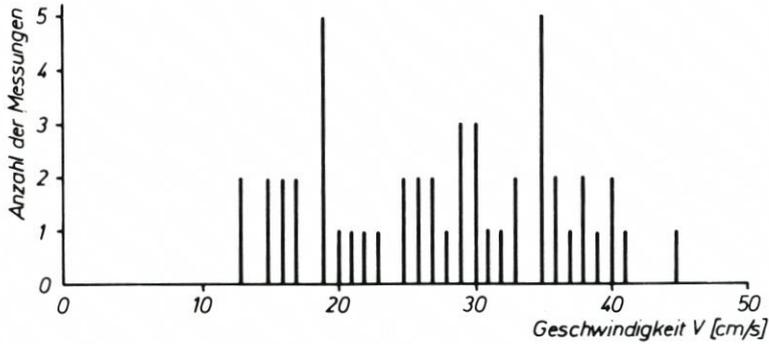


Abb. 3.11: Häufigkeitsverteilung der Geschwindigkeiten

wurden über Funk auf die Forschungsplattform übertragen und on-line in einem Kleinrechner aufbereitet und verarbeitet (GRASSHOFF, 1976).

In Abb. 3.9 sind im oberen Teil die Werte der Geschwindigkeit und Richtung als Funktion der Zeit in der üblichen Form dargestellt. Im unteren Teil sind die Nord-Süd- und Ost-West-Komponenten der Strömung ebenfalls als Funktionen der Zeit aufgetragen. In Abb. 3.10 sind die gleichen Werte in einem Vektordiagramm dargestellt. Es lassen sich neben den absoluten Größen die Häufigkeitsverteilungen der Richtung ablesen, die in Abb. 3.11 nochmals deutlicher dargestellt sind. Abb. 3.12 zeigt ein fortschreitendes Vektordiagramm, aus dem die Strombahn eines Wasserkörpers unter der Annahme gleicher Randbedingungen hervorgeht.

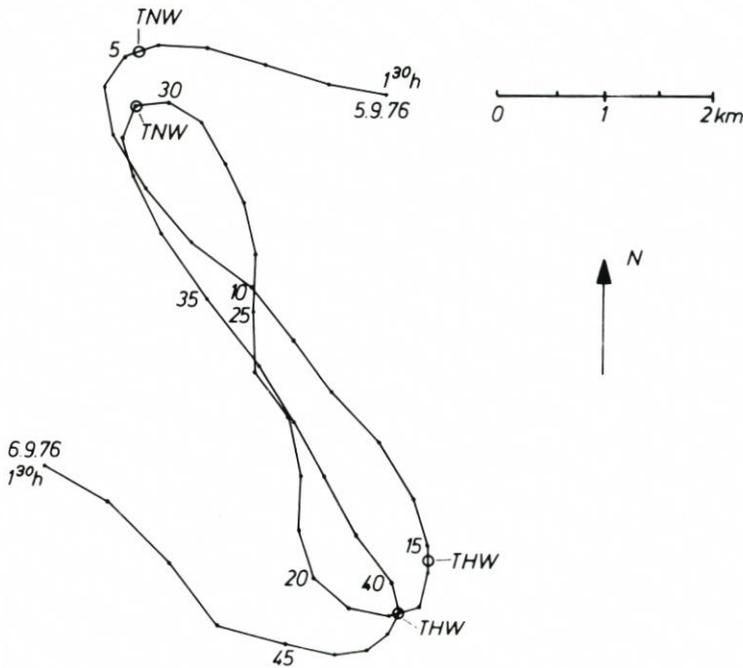


Abb. 3.12: Fortschreitendes Vektordiagramm

Diese Beispiele geben jedoch nur einen Teil der möglichen Darstellungsformen wieder. Jede Darstellung ist an der gestellten Untersuchungsaufgabe zu orientieren.

## 4. Seegangsmessungen

### 4.1 Einführung

Voraussetzung für Planung, Entwurf und Ausführung eines See- oder Küstenbauwerkes ist neben anderem auch die Kenntnis des örtlichen Seeganges. Wellenhöhen, -perioden und -richtungen müssen in Größe, Verteilung und Häufigkeit bekannt sein, um Wirtschaftlichkeit und Sicherheit eines Bauwerkes gewährleisten zu können.

Die Methoden zur Bestimmung der Bemessungsgrößen reichen von der Hochrechnung charakteristischer Seegangswerte aus den geschätzten Daten eines hypothetischen, extremen Bemessungssturmes über die Auswertung meteorologischer Meßdaten und ihrer Umrechnung auf entsprechende Wellenparameter bei Kenntnis des Seegangsklimas im Untersuchungsgebiet bis zur statistischen und spektralen Auswertung von eigens für das Bauvorhaben vorgenommenen Naturmessungen.

Für den küstennahen Bereich und bei stark wechselnden morphologischen Verhältnissen sind Naturmessungen auch heute noch theoretischen Verfahren vorzuziehen. Sie sind am genauesten, erfordern jedoch einen großen technischen, personellen und damit finanziellen Aufwand.

Die gerätetechnischen Möglichkeiten für Wellenmessungen sind in den letzten Jahren sprunghaft verbessert worden. Bei der Vielzahl der angebotenen Meßsysteme fällt es daher dem Anwender nicht immer leicht, das geeignete Gerät für die spezielle Meßaufgabe auszuwählen. Diese Aufgabenstellung ist entscheidendes Kriterium für die Brauchbarkeit eines Systems.

### 4.2 Meßaufgabe

Die mit dem Seegang verbundenen Fragestellungen sind vielfältig und berühren den gesamten Bereich des Küsteningenieurwesens. Deswegen sollte ein Seegangsmessprogramm problemabhängig und nicht isoliert geplant werden. Es ist vielmehr in umfassende Rahmenmeßprogramme einzubetten, die neben der Erfassung der Wellengrößen z. B. auch Peilungen, Wind-, Wasserstands- und Strömungsmessungen einbeziehen. Bezüglich der Genauigkeitsanforderung an die Wellenmessung ist das Verhältnis zwischen Bemessungswelle und Risiko für das Bauwerk festzulegen.

Eine Offshore-Plattform muß beispielsweise einem Jahrhundertorkan mit der höchsten zu erwartenden Wellenhöhe  $H_{max}$  widerstehen, um die Sicherheit der kostspieligen Anlage selbst und ihrer Besatzung zu gewährleisten. Die Bemessungswellenhöhe wird jedoch dann bewußt geringer gehalten als die denkbar höchste Welle, wenn Menschen oder kostspielige Anlagen nicht unmittelbar gefährdet sind (CERC, 1973). So können z. B. bei Wellenbrechern an Hafeneinfahrten niedrigere Bemessungswellen angesetzt werden, wenn eine Einschränkung der Benutzbarkeit der zu schützenden Anlagen bzw. eine Reparatur bei eventuellem Eintritt des Extremereignisses kostengünstiger ist als die Bemessung auf das Extremereignis selbst.

#### 4.2.1 Meßgrößen

Trotz der unterschiedlichen Anforderungen, die z. B. durch die Ozeanographie oder die Ingenieurwissenschaften an die Wellenmessung gestellt werden, sind die zu messenden Parameter grundsätzlich gleich:

Die wichtigste Aufgabe ist die Bestimmung der Wasserspiegelauslenkung  $\eta$  als Funktion der Zeit  $t$ . Aus der Zeitreihe  $\eta \cdot f(t)$  lassen sich sowohl das Seegangsspektrum  $S(f)$ , d. h. die Dichte der im Seegang enthaltenen Energie als Funktion der Wellenfrequenzen  $f$ , als auch sog. charakteristische Wellenhöhen  $H_i$  und zugehörige Perioden  $T_i$  bestimmen.

Neben Wellenhöhen und -perioden ist die Kenntnis der Fortschrittsrichtung von Bedeutung, die z. B. der Ermittlung des seegangserzeugten Feststofftransportes oder für Refraktions- und Diffraktionsuntersuchungen dient. Die Richtungsmessung bereitet jedoch vielfach noch gerätetechnische Schwierigkeiten. Orbitalbewegungen im Seegang werden im Abschnitt „Strömungsmessungen“ behandelt.

#### 4.2.2 Problemstellung

Allgemeingültige Regeln für die Planung und Durchführung eines Seegangsmessprogrammes lassen sich kaum aufstellen. Vielmehr hängen Konzeption, Umfang und Dauer von der Bedeutung der zu ermittelnden Seegangsdaten bzw. von der Wichtigkeit und den Kosten der zu planenden See- und Küstenschutzbauwerke ab.

Neben der Bedeutung der gemessenen Seengangsgrößen für Fragen des Seebaus (z. B. pfahlartige Konstruktionen), des Hafenausbaus (Wellenbrecher), des Küstenschutzes (Wellenbrecher, Deichsicherheit) und der Morphologie (seegangserzeugter Feststofftransport) dienen sie als Eingangsdaten für die Anwendung theoretischer Verfahren oder hydraulischer Modellversuche (KOHLHASE und DETTE, 1978).

Zusätzlich zu anwendungsorientierten Fragestellungen verfolgen Seegangsmessprogramme daher auch das Ziel, die theoretischen Grundlagen für ozeanographische und ingenieurwissenschaftliche Fragestellungen zu erweitern und zu verbessern.

Einige Beispiele für konkrete Fragestellungen, die durch Seegangsmessungen im deutschen Küstengebiet gelöst wurden bzw. gelöst werden sollen, sind im Anhang dargestellt.

### 4.3 Erläuterung einiger Begriffe der Wellenhydraulik und der Spektralanalyse des Seegangs

#### 4.3.1 Deterministische Wellentheorien

Mit Hilfe deterministischer Theorien soll die Form der freien Oberfläche und das Bewegungsverhalten einer Welle mathematisch formuliert werden. Je nach Grad der Vernachlässigung von Gliedern höherer Ordnung der hydrodynamischen Grundgleichung (konvektive Kräfte) wird zwischen linearen und nichtlinearen Wellentheorien, Theorien kleiner Amplituden und langer Wellen unterschieden.

Viele Vorgänge lassen sich nach der linearen AIRY-LAPLACESchen Theorie behandeln. Obwohl die Bedeutung von Theorien höherer Ordnung durch die Möglichkeiten moderner Rechenanlagen zunimmt, ist sie trotz der stark vereinfachenden Annahmen bis heute noch die

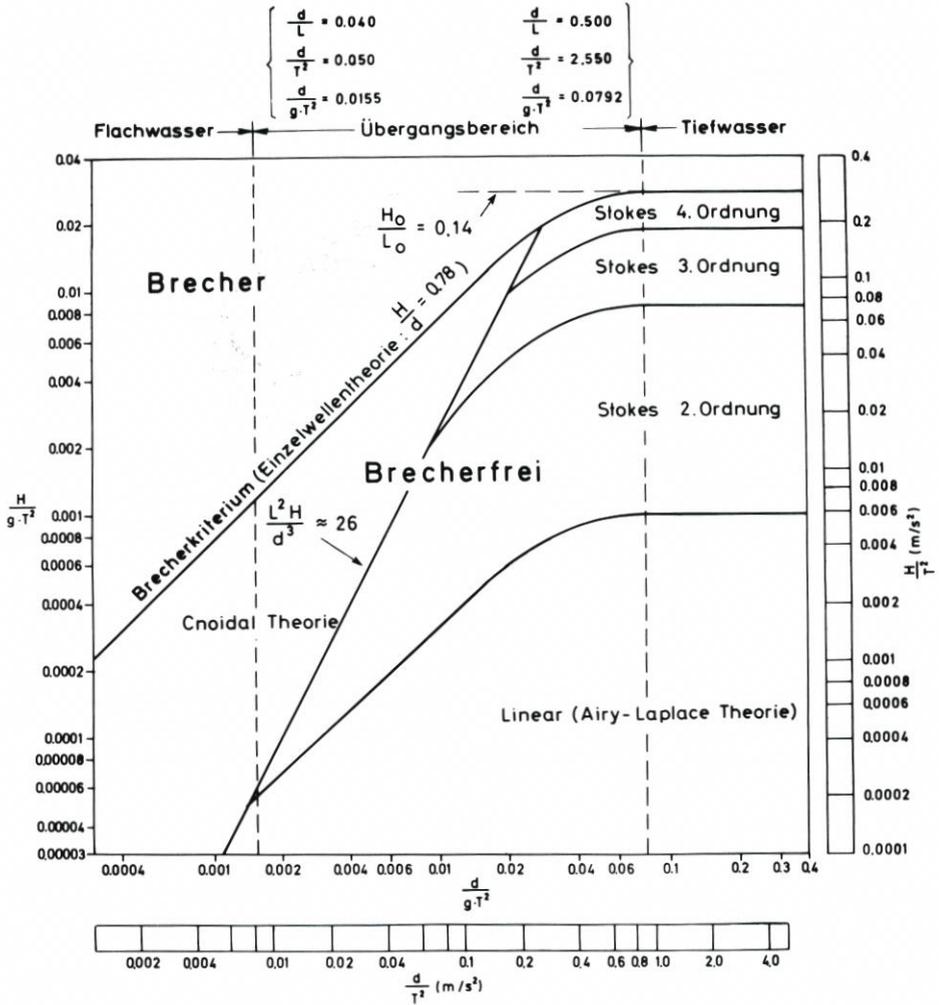


Abb. 4.1: Gültigkeit verschiedener Wellentheorien und Bezeichnungen

wichtigste Theorie, mit der z. B. Refraktion und Diffraktion mathematisch behandelt werden können.

Mit Theorien höherer Ordnung werden die Bewegungsvorgänge genauer dargestellt. In der STOKESSCHEN Theorie 2. und 3. Ordnung wird mit der Einführung von Termen  $H/L$  auch die Wellensteilheit erfaßt. Die Genauigkeit der Theorien nimmt mit Annäherung an den Flachwasserbereich ab.

Die cnoidale Wellentheorie höherer Ordnung benutzt im Gegensatz zur STOKESSCHEN Reihenentwicklung mit  $H/L$  eine solche mit Termen der relativen Wassertiefe  $H/d$ . Die Theorie wurde von KORTEWEG und DE VRIES entwickelt und von WIEGEL (1964) für den Ingenieurgebrauch aufgearbeitet. Die Theorie eignet sich besonders für den Übergangsbereich zum Flachwasser ( $d/L < 0,1$ ). Die gebräuchliche Einteilung (Tiefwasser, Übergangsbereich, Flachwasser) ist in Abb. 4.1 dargestellt.

Die lineare Theorie der Einzelwelle gibt die beste Näherung für lange Wellen im

Flachwasserbereich. Es sind auch Einzelwellentheorien höherer Ordnung bekannt (z. B. WIEGEL, 1964).

#### 4.3.2 Wellenverformung im Küstenbereich

Die Wasserteilchen in einer Welle bewegen sich bei ausreichender Wassertiefe auf Orbitalbahnen. Die Größe dieser Bewegung nimmt mit der Wassertiefe nach einer Exponentialfunktion ab. Entscheidend für die Geschwindigkeiten in der Welle ist daher die relative Wassertiefe  $d/L$ . Sobald die Welle Grundberührung erhält, nimmt die Vertikalkomponente der Orbitalbahnen zum Grund hin ab, bis unmittelbar über ihm nur noch die Horizontalkomponente der Geschwindigkeit vorhanden ist. Gleichzeitig nimmt auch die Geschwindigkeit der Welle ab.

Laufen Wellen bei abnehmender Wassertiefe schräg zur Unterwasserböschung, so haben sie die Tendenz, in Richtung auf die Uferlinie einzuschwenken. Dieses Einschwenken wird in Analogie zur Lichtbrechung nach dem SNELL'schen Brechungsgesetz als Refraktion nach der linearen Wellentheorie behandelt. Zur praktischen Anwendung sind ADV-Programme und graphische Verfahren in gleicher Weise geeignet.

Letztere sind als Wellenkamm- und Wellenorthogonalenverfahren bekannt geworden (WIEGEL, 1964). Der sog. Refraktionskoeffizient  $\kappa_r$  wird aus dem Abstand der Wellenorthogonalen bestimmt und kann Werte über 1 annehmen. Durch Refraktion können im Vergleich zur Tiefwasserwellenhöhe sowohl größere (Energiekonzentration) als auch kleinere Wellenhöhen hervorgerufen werden. Der Shoalingeffekt bewirkt eine Veränderung der Wellenparameter bei abnehmender Wassertiefe und wird durch den Shoalingfaktor  $\kappa_s$  beschrieben.  $\kappa_s$  wird aus der Wellengeschwindigkeit  $C = f(d, L)$  und der Gruppengeschwindigkeit  $C_g$  (= Energiegeschwindigkeit) bestimmt. Letztere gibt an, mit welcher Geschwindigkeit sich eine Gruppe bestimmter Wellen – z. B. eine Gruppe höherer Wellen in ansonsten niedrigen Wellen – fortbewegt. Unter dem Einfluß des Shoalingeffekts nehmen die Wellenhöhen beim Einlaufen in flaches Wasser zunächst ab, um dann nach Erreichen eines Minimums ständig anzuwachsen. Die Maximalhöhe wird durch Brecherkriterien und andere Einflüsse begrenzt.

Die Orbitalgeschwindigkeiten in einer Welle können an der Oberfläche nicht größer werden als die Fortschrittgeschwindigkeit der Welle selbst. Mit zunehmender Steilheit  $H/L$  wird eine Welle daher instabil und bricht. Diese Beziehung ist theoretisch dann erfüllt, wenn

$$\frac{H}{L} = \frac{1}{7}$$

wird. Für den Winkel des Wellenkammes hat STOKES nach der Theorie 3. Ordnung den Grenzwert  $\alpha = 120^\circ$  gefunden. Er gilt gleichermaßen für Tief- und Flachwasser.

Der Grenzwert  $H/L = 1/7$  wird jedoch in der Natur selten erreicht, da die Wellen dazu neigen, eher zu brechen. Von Bedeutung bei abnehmender Wassertiefe sind  $d_B$  (Wassertiefe im Brechpunkt, gemessen vom Ruhewasserspiegel aus), die Brecherhöhe  $H_B$  und die Höhe des Brecherkammes über der Sohle  $y_B$ . FÜHRBÖTER (1974) und SIEFERT (1974) fanden nach Messungen vor der deutschen Küste ein Verhältnis

$$d_B/H_B = 1,0$$

Wenn die kritische Wassertiefe bei steilen Wellen oder die Grenzsteilheit der Wellen bei geringer Wassertiefe fast erreicht werden, brechen die Wellen schon, bevor eine der beiden Grenzbedingungen des Brechpunktes erfüllt sind.

Die Gleichung

$$\frac{H}{L} = 0,142 \tanh \frac{2 \pi d}{L}$$

wird als allgemeiner Brecherindex bezeichnet. Sie geht im Tiefwasser über in  $H/L = 0,142$ .

Die physikalischen Phänomene des Brechens sind keineswegs abschließend erforscht. Schwierigkeiten sowohl in theoretischer als auch in experimenteller Hinsicht (Maßstabs-effekte) bereitet vor allem die Berücksichtigung des Lufteintrages beim Brechvorgang, worauf insbesondere FÜHRBÖTER (1974) hinweist. Das Brechverhalten der Wellen wird wesentlich auch von der Strandneigung und der Steilheit der Tiefwasserwelle  $H_0/L_0$  bestimmt.

Beide Einflüsse bestimmen auch die Form des Brechers als Sturzbrecher, Schaumbrecher oder Schwallbrecher. Neben diesen Brecherformen ist der „collapsing breaker“ als Übergangsform zwischen dem Schwall- und dem Sturzbrecher zu nennen (BATTJES, 1974).

Unter Diffraktion wird die Ausbreitung von Wellen hinter einem Hindernis verstanden. Wie bei der Refraktion besteht auch hier eine Analogie zur geometrischen Optik (HUYGENS-sches Prinzip).

Für Diffraktionsuntersuchungen wird auf die Diagramme, z. B. in WIEGEL (1964) und bei CERC (1973), hingewiesen. Die durch Diffraktion veränderte Wellenhöhe wird üblicherweise als  $K'$ -Wert dargestellt, der das Verhältnis der örtlichen, beeinflussten Wellenhöhe und der ungestörten Wellenhöhe angibt. Weitere Verfahren, insbesondere zur Ermittlung der Wellenausbreitung hinter Öffnungen mit übergreifenden oder versetzten Wellenbrechern (sekundäre Diffraktion), werden von DAEMRICH (1977) behandelt.

Eine fortschreitende Schwerewelle der Höhe  $H_0$  wird an Hindernissen ganz oder teilweise reflektiert. Bei durchlässigen Bauwerken wird ein Teil der Wellenenergie transmittiert. Die Koeffizienten der Reflexion  $\kappa_R$  und der Transmission  $\kappa_T$ , die die Wellenhöhenveränderung gegenüber der ungestörten Welle beschreiben, werden durch Steilheit und Angriffswinkel der anlaufenden Wellen sowie durch Form und Abmessungen des Bauwerkes, insbesondere durch die Art der Kontaktfläche (glatt, rau, porös) und durch den Durchlässigkeitsgrad beeinflusst.

Vor undurchlässigen Bauwerken ( $\kappa_T = 0$ ) kann sich die resultierende Wellenhöhe gegenüber der anlaufenden verdoppeln. Diese stehende Welle wird auch Clapotis genannt. An geneigten Bauwerken, z. B. einem geschütteten Wellenbrecher, tritt Teilreflexion auf. Der Reflexionskoeffizient  $\kappa_R$  schwankt abhängig von der Wellensteilheit in weiten Grenzen, und auch vor flachen Böschungen ist der Reflexionsgrad flacher Wellen noch erheblich (WIEGEL, 1964; SILVESTER, 1974).

Hinsichtlich des Transmissionskoeffizienten  $\kappa_T$  an teildurchlässigen Bauwerken, z. B. Unterwasser-Wellenbrechern oder schwimmenden Bauwerken, werden zusätzlich zu diesen Arbeiten die Veröffentlichungen von GLAZIK (1975) und JONES (1971) empfohlen.

Einfluß auf die Wellenhöhen haben auch Energieverluste durch Bodenreibung und Perkolation. In der Praxis werden diese Faktoren im allgemeinen vernachlässigt. Eine Bedeutung für eine Wellenvorhersage scheint jedoch gegeben zu sein. Einige Autoren, die sich hiermit beschäftigt haben, sind bei SCHÜTTRUMPF (1973) genannt.

#### 4.3.3 Seegangsspektren

In der Wellenhydraulik wird der Seegang als regelmäßig aufgefaßt, um die Wellen und die im vorigen Abschnitt erläuterten physikalischen Vorgänge mathematisch formulieren zu können. Tatsächlich besteht der Seegang, wie er in der Natur gemessen wird, jedoch aus

unterschiedlichen Wellenhöhen, -perioden und -richtungen, deren Verteilung nur nach statistischen Verfahren dargestellt werden kann. Dabei ist zu bedenken, daß eine Wellenregistrierung nur die Auslenkung  $\eta$  des Wasserspiegels als Funktion der Zeit  $t$  liefert, wobei grundsätzlich die unterschiedlichen Richtungen der einzelnen Wellenkomponenten in die Messung eingehen, ohne daß sie im Sinne einer Richtungsinformation herausgezogen werden können. Eine solche Aufzeichnung kann als Überlagerung einer unendlichen Anzahl von Sinus- oder Cosinus-Schwingungen mit unterschiedlicher Amplitude und Frequenz  $f$  aufgefaßt werden. Jeder Schwingungskomponente kann ein Energieanteil, der dem Quadrat der Wellenhöhe proportional ist, zugeordnet werden. Die Gesamtheit aller Schwingungskomponenten wird als Spektrum bezeichnet.

Das die Frequenz- und Richtungsverteilung einer unregelmäßigen See umfassende Energiespektrum wird auch als Richtungsspektrum bezeichnet. Es ist zweidimensional und kann wie folgt zerlegt werden:

$$\begin{aligned} D(f, \Theta) &= F(f, \Theta) \cdot S(f) \\ \text{mit } F(f, \Theta) &= \text{Richtungsfunktion} \\ S(f) &= \text{Frequenzspektrum oder eindimensionales Spektrum} \end{aligned}$$

Die Richtungsfunktion gibt die Verteilung der Wellenenergie als Funktion der Richtung an. Vielfach wird (vereinfachend) definiert

$$\int_{-\pi/2}^{+\pi/2} F(f, \Theta) = 1$$

wobei eine Verteilung der Wellenenergie in einen Sektor von  $\pm 90^\circ$  gegen eine Hauptwellenrichtung angenommen wird. Die Richtungsfunktion kann z.B. nach dem Ansatz  $\cos^n \Theta$  dargestellt werden.

Das eindimensionale Spektrum drückt dagegen die Energieverteilung oder spektrale Dichte je Frequenzeinheit aus. Die spektrale Dichte wird auch Energiedichte genannt. Die Gesamtfläche unter der Dichtefunktion ist ein Maß für die im Spektrum enthaltene Energie.

Über den Verlauf der Dichtefunktion  $S(f)$  gibt es eine Vielzahl von Untersuchungen.  $S(f)$  wird z.B. (direkt oder indirekt) als Funktion der Windgeschwindigkeit  $U$  aufgefaßt. Einen Vergleich einiger mathematischer Ansätze des Seegangsspektrums (Windsee) geben z.B. PARTENSKY (1970) und HORIKAWA (1978).

Eines der am meisten verwendeten, mathematisch formulierten Spektren ist das PIERSON-MOSKOWITZ-Spektrum (PM-Spektrum). Es lautet in dimensionsloser Form:

$$S(f) = \frac{\alpha \cdot g^2}{(2\pi)^4 \cdot f^5} \cdot \exp \left[ -\frac{5}{4} \left( \frac{f}{f_p} \right)^{-4} \right]$$

Hierin sind  $\alpha = 8,1 \cdot 10^{-2}$  (Phillips-Konstante) und  $g$  die Erdbeschleunigung.  $f_p$  ist die Peak-Frequenz, an der die Energiedichtefunktion ihr Maximum hat. Es gilt für voll ausgereiften Seegang und wird auch als Periodenspektrum  $S = f(T)$  dargestellt. Im Gegensatz zum PM-Spektrum liefert das sog. JONSWAP-Spektrum (JONSWAP = JOINT NORTH SEA WAVE PROJEKT) im Mittel eine rund 30% höhere Energie im Maximum der Energiedichte-Funktion (HASSELMANN et al., 1973).

Die Momente eines Seegangsspektrums (Energiedichtespektrum) sind wie folgt definiert:

$$m_n = \int_0^{\infty} S(f) \cdot f^n df \quad \text{mit } n = 0, 1, 2 \dots$$

Entsprechend werden  $m_0$  als Moment Null-ter Ordnung,  $m_1$  als Moment 1. Ordnung,  $m_n$  als Moment  $n$ -ter Ordnung bezeichnet. – Zur Charakterisierung der Form des Spektrums werden verschiedene Formparameter definiert, die aus den Momenten des Spektrums berechnet werden.

Der von CARTWRIGHT und LONGUET-HIGGINS (1956) eingeführte Spektralbreitenparameter (spectral width parameter)  $\varepsilon$  ist definiert als

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 \cdot m_4}}$$

und gibt an, ob die Wellenenergie in einem engen Frequenzband konzentriert ist ( $\varepsilon \rightarrow 0$ ) oder nicht ( $\varepsilon \rightarrow 1$ ).

Weitere Parameter, die die Form des Spektrums beschreiben, sind

$$v = \sqrt{\frac{m_2 \cdot m_0}{m_1^2} - 1}$$

$$v_1 = \sqrt{1 - \frac{m_1^2}{m_2 \cdot m_0}}$$

$v$  und  $v_1$  sind direkt miteinander verknüpft.

Häufig wird jedoch auch der Formparameter  $Q_p$  benutzt, der die „peakedness“ eines Spektrums beschreibt und am besten unterscheidet zwischen einem „Spitzen“-JONSWAP-Spektrum und einem PM-Spektrum.

$$Q_p < \frac{2}{m_0^2} \int_0^{\infty} f [S(f)]^2 df$$

#### 4.3.4 Auswerteverfahren

Die Auswertung von Wellenaufzeichnungen kann sowohl hinsichtlich charakteristischer Wellenhöhen und -perioden, die vom ingenieurmäßigen Standpunkt als Eingangsgrößen für Bemessungsaufgaben benötigt werden, als auch im Hinblick auf die spektralen Eigenschaften des Seegangs erfolgen. Nachfolgend werden diese Verfahren kurz erläutert (Abb. 4.2).

Beim Wellenkammverfahren wird jede Wasserspiegelbewegung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Wellenbergen als Welle definiert. Im Nulldurchgangsverfahren entspricht die Welle der Wasserspiegelbewegung zwischen den Schnittpunkten mit dem Ruhewasserspiegel. Jede dieser willkürlichen Definitionen ist mit Mängeln behaftet, die dann besonders auffallen, wenn eine Reihe großer Wellen mit verhältnismäßig kleinen durchmischt ist. Solche Wellen können zwar durch Festlegung einer Mindestwellenhöhe ausgeschaltet werden; die Kernfrage, was als Welle anzusehen ist, wird hierdurch jedoch nicht beantwortet. Derzeit bevorzugt ist das Nulldurchgangsverfahren.

Bei der FOURIER-Analyse ist die Definition einer Welle nicht erforderlich. Vielmehr wird der Seegang in seine Frequenzkomponenten zerlegt. Im Gegensatz zur Auswertung von Wellenregistrierungen nach konventionellen Verfahren kann eine FOURIER-Analyse manuell nicht mehr mit erträglichem Aufwand vorgenommen werden und setzt daher eine Wellenregistrierung auf ADV-gerechten Datenträgern voraus. Die Grundlagen der FOURIER-Analyse, für die in allen größeren Rechenzentren ADV-Programme vorhanden und

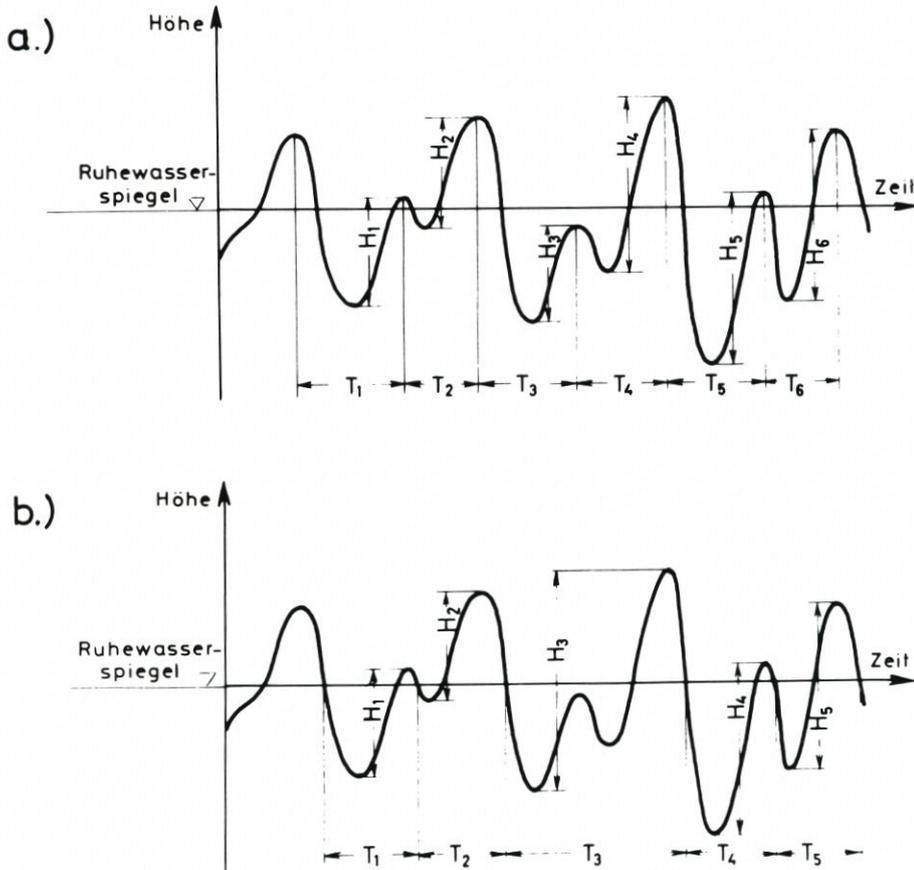


Abb. 4.2: Auswertung einer Seegangsaufzeichnung

für deren praktische Anwendung spezielle Geräte auf dem Markt sind, sowie Probleme der Anwendung sind z. B. bei BENDAT und PIERSOL (1971) ausführlich behandelt.

Definitionsgemäß ergibt sich für das eindimensionale Spektrum die Form der freien Oberfläche zu

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cdot \cos(2\pi \cdot f_n \cdot t + \epsilon_n)]$$

wobei  $a_n$  die Amplitude,  $2\pi \cdot f_n$  die Winkelfrequenz und  $\epsilon$  die Phasendifferenz der jeweiligen Schwingungskomponente bedeuten.

Bei numerischer Auswertung von Seegangsaufzeichnungen müssen die hochfrequenten und niederfrequenten Komponenten vernachlässigt werden. Hinsichtlich des Einflusses dieser sog. Cut-off-frequency auf die Stabilität der spektralen Momente und Formparameter wird auf RYE (1977) hingewiesen.

Das Spektrum oder die Dichtefunktion liefert die im Seegang enthaltene Gesamtenergie. Für ingenieurwissenschaftliche Fragestellungen, insbesondere als Eingangsgrößen für die Bemessung von Bauwerken und für die Anwendung der Wellentheorien zur Untersuchung

von Diffraktions- und Refraktionsvorgängen, ist zu versuchen, Beziehungen zwischen dem Spektrum und den in einer Zeitreihe enthaltenen Wellenhöhen und -perioden herzustellen. Hierzu werden charakteristische Werte  $H_i$  und  $T_i$  definiert, die in Beziehung zur Wellenenergie bzw. den Momenten des Spektrums gesetzt werden.

Werden die Wellenhöhen  $H$  in einer Seegangsregistrierung nach ihren Häufigkeiten  $n$  ausgewertet, ergibt sich – unabhängig vom Auswerteverfahren – eine Darstellung  $n(H)$ , die als Histogramm bezeichnet wird, bzw. eine Darstellung  $\Sigma n(H)$ , die die Summenhäufigkeit bestimmter Wellenhöhen einer Aufzeichnung angibt. Das Histogramm, dessen Form (im Gegensatz zur Darstellung als Summenhäufigkeit) von der gewählten Klassenbreite  $\Delta H$  abhängt, gleicht in seinem Verlauf dem Spektrum und wird vielfach (fälschlicherweise) auch als Spektrum bezeichnet.

Aus dieser Klassifizierung werden die charakteristischen Wellenhöhen wie folgt gewonnen:

$H_{1/3}$  = arithmetischer Mittelwert der 33 % höchsten Wellen einer Aufzeichnung

$H_{1/10}$  = arithmetischer Mittelwert der 10 % höchsten Wellen einer Aufzeichnung

$H_{1/100}$  = arithmetischer Mittelwert der 1 % höchsten Wellen einer Aufzeichnung

$H_{\max}$  = höchste Welle einer Aufzeichnung

Weiterhin sind:

$H_m$  = mittlere Wellenhöhe

$H_d$  = dominierende (häufigste) Wellenhöhe

Der  $H_{1/3}$ -Wert wird auch als *signifikante Wellenhöhe* bezeichnet, da er mit guter Genauigkeit derjenigen Wellenhöhe entspricht, die ein geübter Beobachter im Seegang schätzt. In analoger Weise wie die Wellenhöhe  $H_i$  können charakteristische Wellenperioden  $T_i$  definiert werden.

Es sei darauf hingewiesen, daß die Perioden  $T_i$  als rechnerische Größen den Wellenhöhen  $H_i$  nicht ohne weiteres zugeordnet werden können. Zur Kennzeichnung der  $H_i$  zugehörigen Wellenperioden wird die Schreibweise  $T_{Hi}$  verwendet, z. B. für die der signifikanten Wellenhöhe  $H_{1/3}$  entsprechende Wellenperiode die Schreibweise  $T_{H1/3}$  ( $\neq T_{1/3}$ ).

Zwischen der Energie  $E$  eines Seegangsspektrums und den aus einer Häufigkeitsdarstellung (Histogramm) zu ermittelnden charakteristischen Wellenhöhen  $H_i$  bestehen enge Beziehungen, die erstmals von LONGUET-HIGGINS (1953) untersucht worden sind. Dort ist auch nachgewiesen, daß unter bestimmten Bedingungen die Wellenhöhen der RAYLEIGH'schen Verteilungsfunktion gehorchen. Die Wahrscheinlichkeitsdichte  $p$  der RAYLEIGH-Verteilung ist

$$p = \frac{dP}{dH} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{H}{H_m^2} \cdot e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{H_m}\right)^2}$$

und die Wahrscheinlichkeit  $P$  des Auftretens einer Welle bestimmter Höhe  $H$  ist

$$P = 1 - e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{H_m}\right)^2}$$

Dabei ist  $H_{\max}$  abhängig von der Anzahl  $N$  der Wellen im Sturm:

$$H_{\max} = 1,13 \sqrt{\ln N} \cdot H_m$$

Die Beziehungen stimmen nur unter den Annahmen, die LONGUET-HIGGINS macht. Das sind insbesondere:

- engbandiges Spektrum, RAYLEIGH-verteilt,
- Tiefwasserbedingungen,
- symmetrische Wellen (Sinuswellen).

Diese Bedingungen sind in der Natur nur in Näherung erfüllt, so daß Schwankungen auftreten. Diese Schwankungen können dargestellt werden als Funktion des Spektralweite-Parameters  $\epsilon$ , der die „Fülligkeit“ des Seegangsspektrums beschreibt (z. B. SILVESTER, 1974). Hinsichtlich der statistischen Verhältnisse in einem Flachwasserseegang sei auf SIEFERT (1974) verwiesen.

Der vom Standpunkt des Ingenieurs wichtigste Wellenhöhenparameter ist die signifikante Wellenhöhe  $H_{1/3}$  als arithmetischer Mittelwert der 33 % höchsten Wellen einer Wellenaufzeichnung. Um  $H_{1/3}$  mit dem Spektrum in Beziehung zu bringen, wird

$$H_s = 4 \sqrt{m_0}$$

verwendet, wobei  $m_0$  das statische Moment der Dichtefunktion  $S(f)$  ist.  $H_s$  wird ebenfalls als signifikante Wellenhöhe bezeichnet, stimmt aber nur in Näherung mit der aus einer Häufigkeitsauswertung gewonnenen  $H_{1/3}$ -Welle überein.

Zur Bestimmung charakteristischer Wellenperioden eines Spektrums wird im Schrifttum eine Reihe von Parametern vorgeschlagen. Auf der Grundlage der Momente des Spektrums wurden z. B. definiert:

$$T_{m_{01}} = \frac{m_0}{m_1} \quad \text{als mittlere Wellenperiode}$$

$$T_{m_{02}} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad \text{als mittlere scheinbare Wellenperiode}$$

Die sog. Peak-Periode  $T_p$  (Kehrwert der Peak-Frequenz  $f_p$  im Maximum der Energiedichtefunktion) wird gewonnen aus

$$\frac{d}{df} [S(f)] = 0$$

Wie RYE (1977) nachweist, sind  $T_{m_{01}}$  und  $T_{m_{02}}$  nicht stabil und abhängig vom Frequenzverhältnis  $f_{HP}/f_p$ , d. h. von der Grenzfrequenz  $f_{HP}$  (cut-off frequency), die bei der numerischen Berechnung eines Spektrums vorgegeben werden muß.

#### 4.3.5 Zur Ermittlung der Bemessungswelle – Langzeitstatistik

Sinn der Seegangsmessungen im Küsteningenieurwesen ist es vor allem, Grundlagen für die Planung und Bemessung von Bauwerken, die durch Seegang beansprucht werden, zu gewinnen. Ein Meßprogramm muß daher so angelegt sein, daß es die örtlichen Seegangsverhältnisse repräsentativ erfaßt. Wenn es nicht möglich ist, über ausreichend lange Zeiträume zu messen (etwa 3 Jahre), müssen die Messungen in statistischem Sinne abgesichert werden. Insbesondere wenn ein Bauwerk gegen extreme Seegangsbedingungen zu bemessen ist, ist eine Langzeitstatistik zu erstellen, in der aus zeitlich begrenzten Messungen auf seltene Ereignisse geschlossen werden kann. Dazu müssen die aus Einzelmessungen gewonnenen Seegangsparameter, z. B.  $H_{1/3}$  oder  $H_{max}$ , nach Häufigkeiten und gegebenenfalls jahreszeitlichen Schwankungen so ausgewertet werden, daß eine Extrapolation auf den Bemessungszeitraum möglich ist.

Gebräuchliche Verfahren zur Ermittlung von Überschreitungshäufigkeiten bestimmter Wellenhöhen oder -perioden beruhen auf der GAUSSschen bzw. der logarithmischen Normalverteilung, der RAYLEIGH- und der WEIBULL-Verteilung. Letztere kann als verallgemeinerte

Exponentialverteilung aufgefaßt werden. Sie enthält die Normalverteilung als Sonderfall und ist, da sie vielfältige unsymmetrische Kurvenformen annehmen kann (SACHS, 1973), besonders gut für eine Langzeitstatistik des Seegangs anwendbar.

Wenn irgend möglich, sind zur Festlegung der Bemessungswelle Fremdmessungen und statistische Unterlagen über das großräumige Seegangsklima heranzuziehen und aus einer Analyse der Windverhältnisse im Planungsgebiet die gemessenen Daten über eine Wellenvorhersage abzusichern.

#### 4.4 Wellenmeßgeräte, Übersicht über Meßprinzipien

##### 4.4.1 Allgemeines

Durch neuere Entwicklungen in der Gerätetechnik und die Möglichkeiten der Datenverarbeitung in elektronischen Rechenanlagen sind heute Wellenmeßsysteme auf dem Markt, die an jede Meßaufgabe anzupassen sind. Die Entwicklung hat ganz erheblich dazu beigetragen, daß Seegangprobleme überhaupt wissenschaftlich in Angriff genommen werden konnten. Umgekehrt hat die zunehmende Bedeutung des Küstenraumes, die sich in der Entwicklung des „Coastal Engineering“ zu einer eigenständigen wissenschaftlich-technischen Disziplin widerspiegelt, auch der Meßtechnik entscheidende Impulse gegeben.

Es werden hier lediglich diejenigen Meßprinzipien behandelt, die eine kontinuierliche Messung der Wasserspiegelveränderungen erlauben und damit grundsätzlich auch für automatische Auswertungen geeignet sind. Auf eine Darstellung der geschichtlichen Entwicklung und Beschreibung spezieller Gerätetypen wird verzichtet. Die wichtigsten Daten einiger Geräte sind im Anhang zusammengestellt.

Eine Klassifizierung nach Art der Geräteträger läßt auf Einsatzmöglichkeiten der Geräte schließen und erscheint daher sinnvoll.

##### 4.4.2 Meßgeräte mit feststehendem Geräteträger

Feststehende Geräteträger sind Küstenbauwerke (Molen, Brückenpfeiler, Dämme), fest verankerte Montagegerüste, Meßpfähle oder Meßstationen (Meßinseln) oder auch der Meeresgrund. Der Einsatz fest angebrachter Meßgeräte beschränkt sich daher häufig auf Bereiche geringer Wassertiefe, wo er mit vertretbarem Aufwand möglich ist.

###### 4.4.2.1 Wellenpegel

Wellenpegel werden in der Regel senkrecht zur Wasseroberfläche an einen Geräteträger fest montiert.

Beim *Schwimmer-Wellenpegel* wird ein Schwimmer in einem perforierten Rohr geführt. Er ist an einem Meßseil befestigt, das über eine Meßrolle läuft und durch ein Gegengewicht straff gehalten wird. Dadurch wird die Wellenbewegung über Schwimmer und Meßseil auf das Meßrad übertragen, das je nach Konstruktion einen Schreiber oder einen Drehwinkelgeber zur ADV-Ansteuerung bewegt. Gewisse Verfälschungen durch Strömungsdruck sind nicht auszuschließen.

Mit dem *Widerstandsmessprinzip* wird die Wellenhöhe entweder in einzelnen

Stufen oder aber kontinuierlich gemessen. Im ersten Fall befinden sich längs des Pegels in regelmäßigen kleinen Abständen OHMSche Kontakte (Stufenwiderstand). Gemessen wird der Gesamtwiderstand des Stabes. Im zweiten Fall besteht der Fühler aus einem isolierten Zylinder mit einer Wicklung unisolierten Widerstandsdrahtes. Proportional zum Wasserstand verändert sich der Gesamtwiderstand des Pegels.

Beim kapazitiven Prinzip ist ein Zentralleiter (Metallstab) von einer Isolierung dicht umschlossen. Metallstab, Isolierung und Wasser bilden einen Hubkondensator: Der Metallstab und das Wasser bilden die beiden Leiter, die Isolierung das Dielektrikum. Gemessen wird die Kapazität des Systems, die sich proportional dem Wasserstand ändert.

Ein Pegel nach elektromagnetischem Prinzip besteht aus zwei koaxialen Aluminiumröhren mit oben aufgesetztem Oszillator. Für den Wassereintritt ist die äußere Röhre mit einer Schlitzlochung versehen. Die Röhren dienen als Abstimmelement für einen Hohlraumresonator. Die Länge bzw. die Periode der elektromagnetischen Schwingungen ist der Länge des nicht eingetauchten Teiles des Pegels proportional.

#### 4.4.2.2 Druckmeßgeräte

Die nach dem Druckmeßprinzip arbeitenden Wellenmeßgeräte messen nicht die Bewegung der Wasseroberfläche selbst, sondern die hierdurch hervorgerufenen Änderungen des hydrostatischen Druckes. Die Druckmeßgeräte werden in der Regel auf dem Meeresboden eingebaut.

Die Druckänderungen sind eine Funktion der Wassertiefe (= Einbautiefe des Gerätes) und der Wellenlänge, was insbesondere bei wechselnden Wasserständen (z. B. Tideinfluß) beachtet werden muß. Wegen der mit zunehmender Einbautiefe zunehmenden Dämpfung der durch die Oberflächenwellen verursachten Druckschwankungen im Wasser ist der Einsatz dieser Geräte nur in geringen Wassertiefen möglich (bis etwa 4 m unter der Oberfläche).

Grundsätzlich sind zwei Druckmeßprinzipien zu unterscheiden: Das absolute Druckmeßprinzip basiert auf der Messung aller auf das System einwirkenden Drücke, was bedeutet, daß auch langperiodische Wellen (Dünung, Tide, Luftdruck) aufgezeichnet werden. Das Differenzdruckprinzip ist für die Messung nur kurzfristiger Druckschwankungen (Wellen) konzipiert. Langperiodische Wellen werden weggefiltert.

Der Druckaufnehmer bei absoluter Druckmessung befindet sich in einem Medium (Öl), das durch eine Membrane (Gummi) abgeschlossen ist. Der absolute Druck (Wasser + Atmosphäre) wird auf die Membrane, von dieser auf das Medium und von diesem auf den Druckaufnehmer übertragen. Dieser liefert ein dem Druck analoges Meßsignal, z. B. eine Spannung.

Beim Schwingsaitenprinzip ist eine sehr empfindliche, in einen Meßwertaufnehmer eingespannte Meßsaite mit bekannter Eigenfrequenz im Magnetfeld eines Elektromagnetsystems angeordnet. Dieses besteht aus zwei an einen Oszillator gekoppelte Elektromagneten, von denen der eine die Saite ständig erregt (Erreger), der andere die induzierten Schwingungen fortlaufend aufnimmt (Generator). Eine Membrane überträgt den auf ihr lastenden hydrostatischen Druck auf das System, wodurch sich die Einspannung und damit die Eigenfrequenz der Saite ändert. Die sich analog der Wellenhöhe ändernde Frequenz der Meßsaite wird gemessen und aufgezeichnet (Abb. 4.3).

Der Einsatz von Absolutdruckaufnehmern über längere Meßzeiten und bei großen Temperaturschwankungen ist meistens mit relativ großer Nullpunktdrift verbunden. Die Ermittlung von Wasserständen ist deshalb mit Vorsicht zu betreiben.

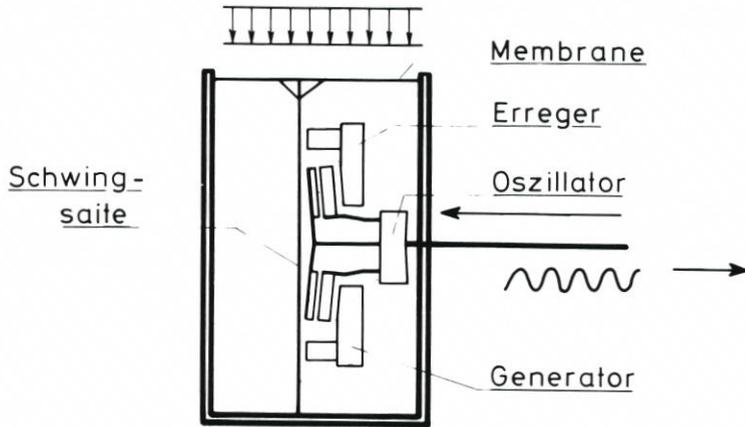


Abb. 4.3: Schwingsaitenprinzip

Beim Zweikammersystem sind zwei Druckkammern durch eine Kapillare, welche wie ein hydraulischer Filter wirkt, miteinander gekoppelt. Die eine Kammer ist mit Öl gefüllt (inkompressibles Medium) und zur Wasserseite durch eine Gummimembrane abgeschlossen. Die zweite Kammer enthält Luft (kompressibles Medium) und ist ebenfalls durch eine Membrane verschlossen. Ein Druckdifferenznehmer überbrückt beide Kammern. Die kurzfristigen Druckschwankungen (durch Wellen) werden über die Ölkammer dem Druckaufnehmer direkt übermittelt, die langfristigen Druckänderungen (z. B. Tide) passieren über die Ölkammer die Kapillare und werden an die Luftkammer weitergegeben. Da lediglich die Druckdifferenzen beider Kammern gemessen werden, sind so langfristige Druckänderungen

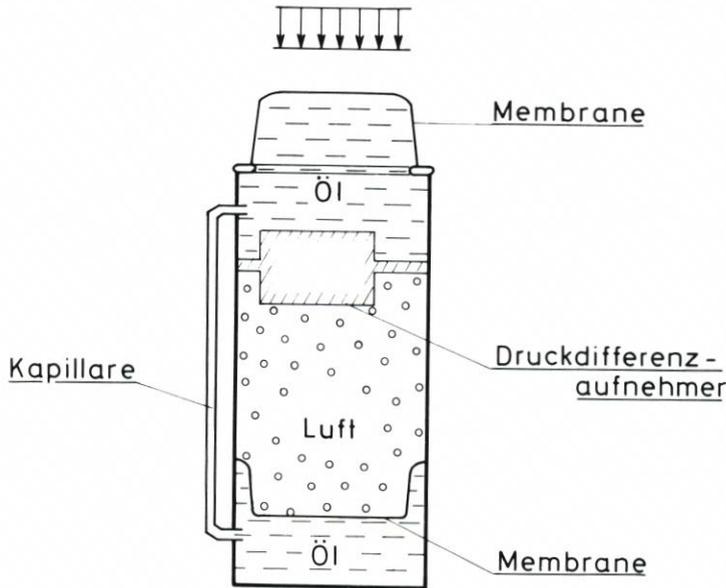


Abb. 4.4: Prinzip eines Differenzdruckmessers

(langsame Wasserstandsveränderungen) völlig zu eliminieren. Durch Wahl einer entsprechenden Kapillare und Viskosität des Öls läßt sich bei diesem System der zu messende Frequenzbereich der Wellen steuern. Außerdem besteht die Möglichkeit, durch Einbau eines absoluten Druckaufnehmers in die Luftkammer gleichzeitig den mittleren hydrostatischen Druck ( $\hat{=}$  Wasserstand) zu messen.

Zur Messung der Druckdifferenz mit einem sog. BOURDON-Druckmesser ist ein hochempfindliches BOURDON-Rohr (= spiralförmig gewickelte Metallfeder = Meßwertgeber) an z. B. einen elektrooptischen Meßwertnehmer gekoppelt. Das Rohr kann die über eine Membrankammer hydraulisch übertragenen Druckschwankungen in eine entsprechende Drehung der vertikalen Achse umsetzen. Ein durch ein spezielles Gittersystem fokussierter Lichtstrahl dient zur Abtastung sehr kleiner Drehungen des Rohres. Mittels einer Elektronik wird das Lichtsignal abgeglichen, d. h., das gesamte System wird in die absolute „Nullstellung“ zurückgeführt. Die der Druckdifferenz analoge Abgleichspannung ist das zu übertragende Meßsignal. Dieses System zeichnet sich durch eine hohe Meßgenauigkeit aus (Abb. 4.4).

#### 4.4.2.3 Anwendung der Echolotung, Ultraschallmethoden

Echolotgeräte, die ursprünglich für Tiefenmessungen entwickelt wurden, werden zunehmend auch für Wellenmessungen eingesetzt. Im Gegensatz zur Echolotung auf Schiffen, wo das Echolot vom Schiffsboden zum Meeresboden wirkt, wird zur Wellenmessung das Gerät am Meeresboden oder in stabiler Schwebeposition über dem Grund in Richtung auf die Wasseroberfläche eingesetzt. Der Sendeschwinger gibt Ultraschallimpulse senkrecht nach oben zur Wasseroberfläche, wo sie reflektiert und vom Empfangsschwinger aufgenommen werden. Die zur Entfernung Meeresboden – Wasseroberfläche proportionale Laufzeit der Schallimpulse wird durch die Lotelektronik ausgewertet und analog oder nach Umwandlung digital aufgezeichnet.

An einem Trägerbauwerk kann ein Luftschall-Sende-Empfangssystem montiert und senkrecht nach unten zur Wasseroberfläche gerichtet werden. Der Sender emittiert Ultraschallimpulse, die vom Wasser reflektiert und als Echos wieder empfangen werden. Der Abstand der Wasseroberfläche vom Luftschallsystem ergibt sich aus der Laufzeit, die von der Lotelektronik ausgewertet und einem Schreiber oder einer ADV-Anlage zugeführt wird.

#### 4.4.2.4 Wellenradar

Dieses Gerät wird über der Wasseroberfläche fest montiert. Die Meßeinheit besteht aus einem Radarsensor (mit Sender und Empfänger) und einem Meßsignalwandler. Gemessen wird der sich verändernde Abstand vom Sensor zur Wasseroberfläche, wobei der feste Abstand vom Gerät zum Ruhewasserspiegel subtrahiert wird, um das Wellenprofil unter Ausschluß der Tidebewegung aufzuzeichnen. Der Radarsensor richtet einen kurzen elektromagnetischen Impuls auf die Wasseroberfläche und liefert ein dem Zeitintervall bis zur Wiederaufnahme des reflektierten Impulses analoges Meßsignal. Dabei ist das Zeitintervall wiederum proportional dem jeweiligen Abstand Sensor – Wasseroberfläche.

Das Instrument kann auch an ein bewegliches Tragegestell montiert werden, wobei die dreiaxialen Bewegungen des Tragegestells mit aufgezeichnet werden müssen. Die Wellenhöhe ergibt sich dann aus der Superposition aller Meßergebnisse.

#### 4.4.3 Meßgeräte mit beweglichem Geräteträger

Meßgeräte, die eine Wellenmessung von einem beweglichen Geräteträger aus ermöglichen, werden hauptsächlich im Tiefwasser ( $d >$  halbe Wellenlänge) und Übergangsbereich eingesetzt. Zu den beweglichen Geräteträgern sind der Wasseroberfläche folgende Bojen sowie Schiffe und Flugzeuge zu zählen.

##### 4.4.3.1 Wellenbojen

Unter Wellenbojen sind komplette Geräteeinheiten, bestehend aus Sensor, Meßwertumwandler, Datenübertragungsanlage (Funk) und Energieversorgungspaket, zu verstehen. Die Datenregistrierung erfolgt an einer Land- oder Bordstation. Generell besteht das Meßprinzip darin, aus der vertikalen Komponente der oberflächenfolgenden Boje die Wellenhöhe zu ermitteln. Einer möglichst ungestörten Anpassung der Bewegung der Boje an das Profil der Wasseroberfläche steht meistens die Notwendigkeit einer Verankerung entgegen.

Ein Beschleunigungsmesser registriert die vertikale Beschleunigung der Boje im Seegang. Das Meßsignal wird elektronisch zweimal integriert, so daß das Versatzmaß der Boje in vertikaler Richtung und damit die Wellenhöhe bestimmt werden kann. Da das Prinzip auf der Messung der vertikalen Beschleunigungskomponente basiert, aber auch Beschleunigungen in horizontaler Richtung auftreten, ist das Meßinstrument so gelagert, daß seine Meßachse stets senkrecht bleibt. Dies geschieht durch eine kardanische Flüssigkeitslagerung (Kompaßprinzip) des Beschleunigungsmessers in der Boje (Wave Rider) oder durch eine Stabilisierung der Boje in vertikaler Richtung durch einen an der Unterseite herausragenden Stab mit Gewicht (Schwerkraftstabilisierung).

Schließlich kann eine der Wellenbewegung folgende Boje als Tragelement eines unterwasserseitig angehängten Gehäuses mit dem Beschleunigungsmesser verwendet werden. Die Stabilisierung ist durch die in entsprechender Wassertiefe herrschende Ruhe gegeben, so daß das Instrument nur vertikale Bewegungen erfährt.

Zur Messung der Verankerungskraft wird eine Wellenboje mit dem Meeresgrund über ein dehnbare Kabel mit bekanntem Elastizitätsmodul fest verankert. Eine zwischengeschaltete Sonde mißt die Zugkräfte, die auf das Seil wirken, wenn die Boje der Bewegung der Wasseroberfläche folgt. Die Zugkraft ist linear proportional der Wellenhöhe.

Beim Schiffswellenmesser (NIO ship-borne-wave-recorder) besteht die gesamte Meßeinheit aus je einem an jeder Bordwand installierten Druck- und Beschleunigungsmesser. Der Druckmesser registriert die Druckdifferenz an der Bordwand des Schiffes (korrespondierend der Wellenhöhe), der Beschleunigungsmesser die Bewegung des Schiffes im Seegang. Die Meßsignale werden kombiniert und ergeben somit die Wellenhöhe.

##### 4.4.3.2 Stereophotographie

Dieses photogrammetrische Verfahren (Luftbildauswertung) kann in etwas abgewandelter Form auch zur Wellenmessung herangezogen werden: Bei der konventionellen Stereophotographie wird das Objekt (unbewegliche Erdoberfläche) beim Überfliegen in regelmäßigen Abständen photographiert, so daß von jedem Objektteilstück zwei Aufnahmen existieren (Abb. 4.5). Da bei der Wellenmessung das „Objekt“, nämlich die Meeresoberfläche, ständig in Bewegung ist, muß hier das Verfahren umgekehrt werden, um eine „Momentaufnahme“ zu

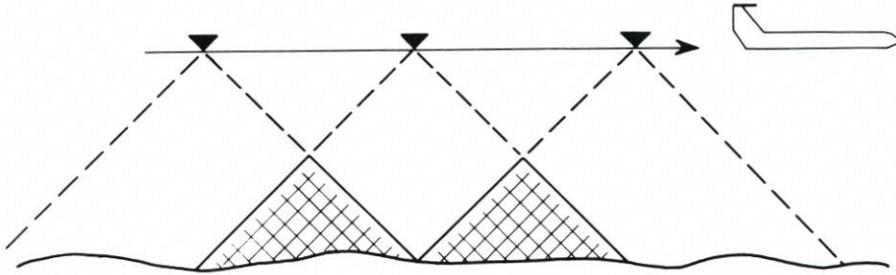


Abb. 4.5: Stereophotographie, intermittierende Messung

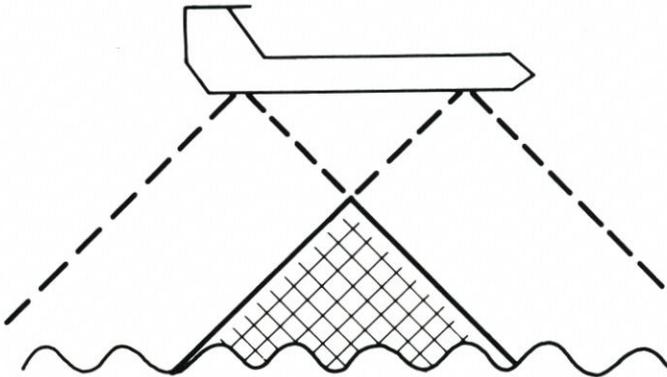


Abb. 4.6: Stereophotographie, synchrone Messung

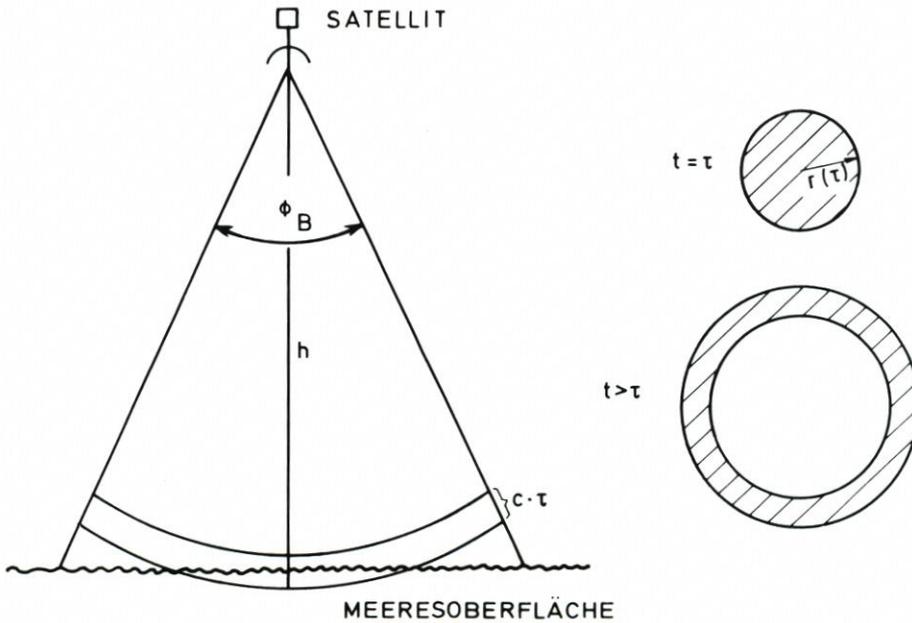


Abb. 4.7: Prinzip des Radar-Höhenmessers

erhalten. Mittels zweier Synchronkameras wird von zwei Punkten aus die Meeresoberfläche gleichzeitig photographiert (Abb. 4.6). Die in ein Stereoskop projizierten Stereoaufnahmen erscheinen dem Betrachter räumlich, so daß Messungen in den drei Dimensionen Länge, Breite und Höhe möglich sind.

Die Stereophotographie bietet die Möglichkeit der großflächigen Wellenmessung vom Flugzeug aus. Der Einsatz von Motorkameras gestattet eine zügige Messung großer Meßfelder. Mit Problemen behaftet ist jedoch das mit dem Einsatz des Flugzeuges verbundene erforderliche Höchstmaß an Synchronisation der Kameras. Nicht weniger problematisch ist der für die Auswertung der Messungen hohe Aufwand. Außerdem muß darauf hingewiesen werden, daß bei fast allen interessanten Sturmweatherlagen entweder schlechte Sicht herrscht oder aber auch der Einsatz eines Flugzeuges gänzlich unmöglich ist.

Laser-Systeme eignen sich auch für großflächige Wellenmessungen vom Flugzeug aus, befinden sich aber noch in der Entwicklungsphase.

Mit dem Verfahren der Radarmessung und der Stereophotographie können auch die Richtungen des Wellenfortschrittes bestimmt werden. Im übrigen gestaltet sich die Richtungsmessung außerordentlich schwierig.

#### 4.4.4 Messung des Seegangs durch Mikrowellenrückstreuung

##### 4.4.4.1 Seegangsmessung mit einem Puls-Radar-Höhenmesser

Der Radar-Höhenmesser sendet eine Folge sehr kurzer, rechteckförmiger Radar-Pulse aus (Länge der Pulse liegt im Bereich von  $10^{-9}$  sec.), die an der Wasseroberfläche reflektiert werden. Bei der Reflexion verändert sich die Form der Pulse. Die Verformung ist ein Maß für die mittlere Wellenhöhe.

Schematisch ist in Abb. 4.7 das Prinzip eines „pulse width limited altimeter“ (im Gegensatz zum „beam width limited altimeter“) dargestellt. Darunter wird ein Radar-Höhenmesser verstanden, bei dem die maximale Fläche, an der das Signal reflektiert werden kann, durch die Länge des Radarpulses bestimmt ist und nicht durch die Strahlenbreite  $\Phi_B$  der Antenne. Radar-Höhenmesser, die für die Seegangsmessung auf hochfliegenden Flugzeugen oder Satelliten installiert werden, sind von diesem Typ. Bei fast ruhiger Meeresoberfläche ist die rückgesteuerte Intensität proportional zur beleuchteten Fläche. Dabei wird jedoch eine geringe Oberflächenrauigkeit vorausgesetzt, so daß alle spiegelnden Elemente innerhalb der beleuchteten Flächen die gleiche Intensität zur Quelle reflektieren.

Werden Mikrowellen zwischen  $\lambda = 0,5$  cm und  $\lambda = 50$  cm zum Abtasten der Meeresoberfläche verwendet, dann erfolgt die Streuung hauptsächlich an den kurzen Seegangswellen (Kapillarwellen, kurze Schwerewellen), deren Wellenlängen vergleichbar sind mit denen der Mikrowellen. Aus Rückstreuexperimenten mit schrägem Einfall können deshalb in erster Näherung nur Informationen über die kurzwellige Komponente des Seegangs erhalten werden. Die hauptsächlich interessierende langwellige Komponente des Seegangs (gewöhnlich zwischen 5 und 200 m), in dem sich der Hauptteil der Wellenenergie befindet, kann mit diesen Verfahren nur indirekt gemessen werden. Da die primär für die Streuung verantwortlichen kurzen Seegangsrippel auf den langen Meereswellen reiten und von diesen moduliert werden, enthält das am Seegang gestreute Mikrowellensignal auch Informationen über die langwellige Seegangskomponente.

In dem Zwei-Frequenz-Verfahren zur Messung des vollen zweidimensionalen Seegangsspektrums wird ein Radarsignal, das aus der Überlagerung zweier Mikrowellen mit den

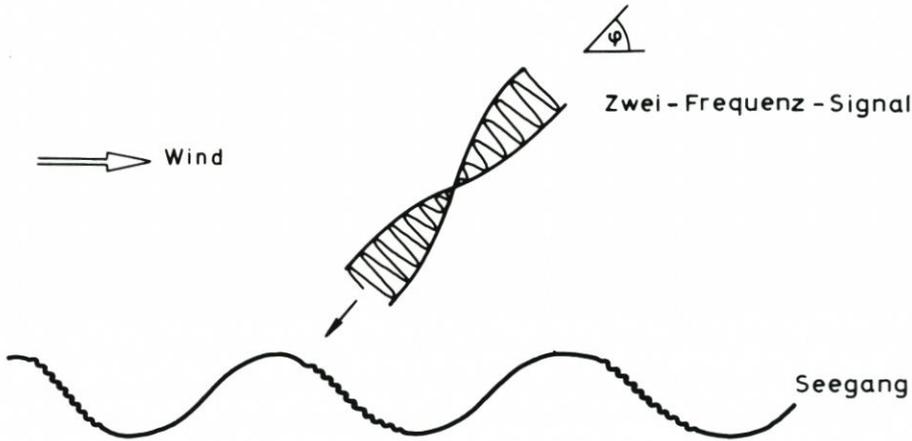


Abb. 4.8: Schema des Zwei-Frequenz-Verfahrens zur Messung des zweidimensionalen Seegangsspektrums

Frequenzen  $f_1$  und  $f_2$  entsteht, unter einem Glanzwinkel  $\vartheta$  auf die Meeresoberfläche abgestrahlt (Abb. 4.8). Die Differenzfrequenz  $\Delta f = f_2 - f_1$ , welche klein gegenüber  $f_1$  und  $f_2$  ist, wird in dem Experiment so verändert, daß die zugehörige Differenz der elektromagnetischen Wellenvektoren, projiziert auf die Meeresoberfläche, im Bereich der Wellenvektoren des langwelligen Seegangs liegt.

#### 4.4.4.2 Messung der mittleren Wellenhöhe mit dem Zwei-Frequenz-Radarinterferometer

Das Prinzip der mittleren Wellenhöhenmessung nach dem Zwei-Frequenz-Verfahren besteht darin, daß eine senkrecht auf die Wasseroberfläche gerichtete Radarantenne gleichzeitig zwei monochromatische Radarsignale aussendet und empfängt (Abb. 4.9). Die beiden an

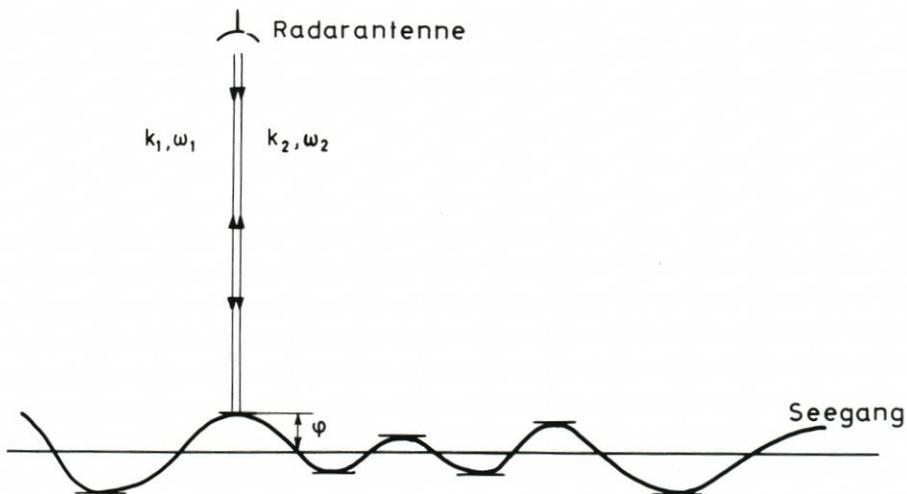


Abb. 4.9: Prinzip des Zwei-Frequenz-Radarinterferometers

einer Vielzahl von spiegelnden Oberflächenelementen der bewegten See reflektierten Signale werden anschließend miteinander korreliert. Aus dem Abfall der Korrelationsfunktion kann auf die mittlere Wellenhöhe geschlossen werden.

#### 4.4.4.3 Messung von zweidimensionalen Seegangsspektren unter schrägem Einfallswinkel mit Zwei-Frequenz-Verfahren

Die beschriebenen Verfahren erfordern eine senkrechte Ausrichtung des Antennenstrahles auf die Wasseroberfläche. Für die Beschreibung der Wechselwirkung Mikrowelle – Seegang wird nur das Reflexionsgesetz der geometrischen Optik benötigt. Trifft das Mikrowellensignal jedoch schräg auf die Meeresoberfläche, dann wird es nicht mehr nach den Gesetzen der geometrischen Optik reflektiert, sondern in alle Richtungen gestreut.

Das Zwei-Frequenz-Verfahren ist kein abbildendes („imaging“) Radar. Es liefert Wellenspektren aus Satelliten von Wellen, die sich im Abstrahlbereich unter seiner Umlaufbahn befinden.

#### 4.4.4.4 Messung des zweidimensionalen Wellenbildes in Küstennähe mit abbildenden („imaging“) Radarwellen

Für Einfallswinkel größer als ca.  $20^\circ$  kann die Streuung von cm-dm-Wellen an kurzen Seegangswellen gut mit dem Bragg-Streumodell beschrieben werden. In diesem Modell wird vorausgesetzt, daß die Neigungen der streuenden Oberflächenwellen klein sind und die Wellenlänge der Strahlung groß ist gegen die Höhe der kurzen Seegangswellen (Abb. 4.10).

Die Rückstreuung ist eine Folge der Wechselwirkung der Strahlung mit jeweils zwei in entgegengesetzte Richtung laufenden Oberflächenwellen (Abb. 4.11).

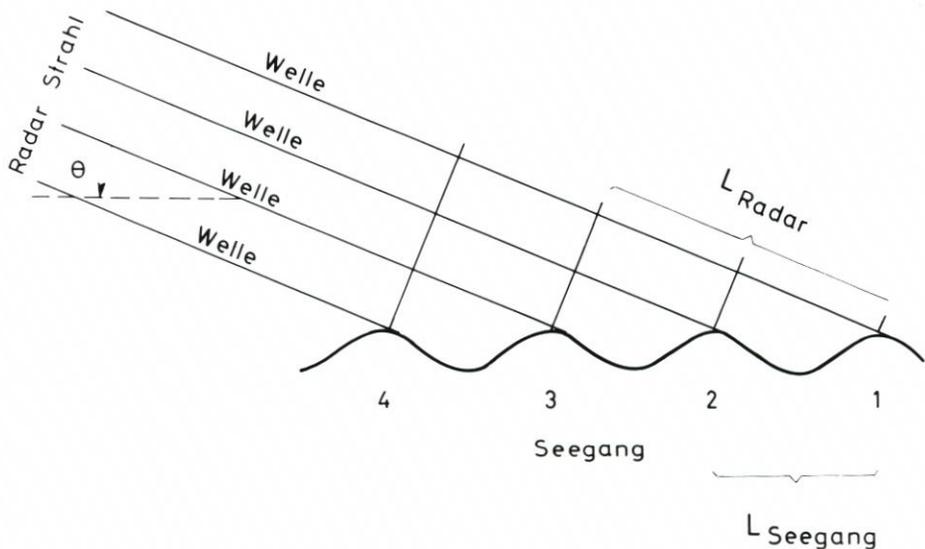


Abb. 4.10: Bragg-Streuung von Radarwellen, bei der jede Welle als Reflektor wirkt

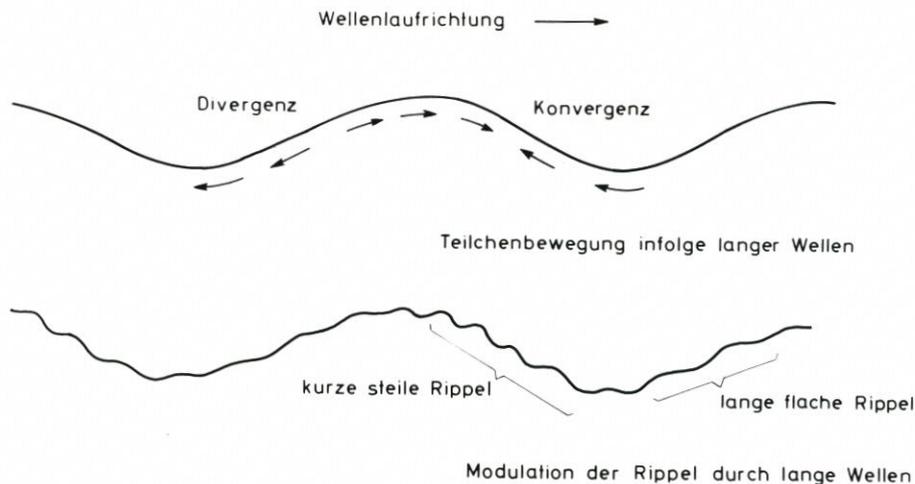


Abb. 4.11: Rückstreuungsmessung von entgegengesetzt laufenden Oberflächenwellen

#### 4.4.4.5 Seegangsmessung mit CODAR

Bei CODAR („Current Ocean Detecting and Ranging Radar“) handelt es sich um Landradarstationen, die es ermöglichen, von der Küste aus den Seegang zu erfassen. Es sind Hochfrequenz-Radargeräte, die im Wellenlängenbereich zwischen 10 und 100 m strahlen und empfangen. Sie bilden nicht nur den Seegang ab, sondern lassen auch dessen Verschiebung durch die Meeresströmung erkennen, die eine gewisse kleine Frequenzverschiebung durch den Doppler-Effekt bewirken.

Diese CODAR-Geräte können von der Küste her Strömungen im Meer mit einer Mindestreichweite von 50 km und einer Maximalreichweite von 100 km messen. Ein einzelnes, nach dem CODAR-Verfahren arbeitendes Radargerät kann einen Seebereich von mindestens 2500 km<sup>2</sup> auf Seegang und Strömung hin erfassen. Es werden landfeste und sehr stabile Beobachtungsplattformen für die Installation der CODARs benötigt.

### 4.5 Datenregistrierung, -übertragung und -verarbeitung

#### 4.5.1 Datenregistrierung

Die in Abschnitt 4.4 erläuterten Meßsysteme mit entsprechenden Meßwertumwandlern gestatten sowohl die analoge als auch die digitale Registrierung der Daten. Die Art der Aufnahme wird sich in erster Linie nach den zur Verfügung stehenden Auswertegeräten (Rechner, FOURIER-Analyser etc.) zu richten haben. Es sollte jedoch beachtet werden, daß zur optischen Kontrolle der Funktionsfähigkeit eines Systems Kontrollschriebe unerlässlich sind.

Die analoge Registrierung ermöglicht eine relativ einfache und sichere Kontrolle der Meßvorgänge und -ergebnisse. Schäden im Meßsystem lassen sich rechtzeitig erkennen bzw. bei der Auswertung der Ergebnisse berücksichtigen. Allerdings ist bei der analogen Datenregistrierung eine spätere Umsetzung in die digitale Form (u. U. von Hand) zur Datenverarbei-

tung notwendig. Eine Ausnahme stellt die Verwendung von FOURIER-Analysen dar, die in der Regel nur über einen analogen Eingang verfügen.

Der Vorteil einer digitalen Registrierung besteht in der Möglichkeit, die Meßdaten ohne weitere Handarbeit unmittelbar einer Rechenanlage zuführen zu können. Die Registrierung der Meßsignale oder -werte auf Lochstreifen oder Magnetband (digital oder analog) ermöglicht je nach Aufnahmefähigkeit des Datenträgers eine mehr oder weniger große Datenspeicherung. Dadurch können die Meßdaten entweder „en bloc“ abgerufen werden, oder sie werden später – nach Abschluß mehrerer Meßreihen – insgesamt dem Rechner zugeführt.

#### 4.5.2 Datenübertragung

Neben der Art ist der Ort der Registrierung und Speicherung für die Datenübertragung von Bedeutung. Hierbei ist zu unterscheiden zwischen der Fernregistrierung an einer Land- oder Bordstation oder der Selbstregistrierung am Meßort. Einer Land-/Bordstation müssen die Daten durch Fernübertragung zugeführt werden. Die Übertragung wird mittels Kabel oder Funk vorgenommen. Die wegen der rauen Einsatzbedingungen hohen Anforderungen (u. a. Aggressivität des Meerwassers, mechanische Angriffe z. B. durch Schiffsverkehr und Treibgut) zwingen zum Einsatz von Spezialkabeln. Die schwächsten Punkte eines Kabels sind die Unterwassersteckverbindungen. Trotz großer Sorgfalt können hier – vor allem bei Langzeiteinsätzen – allmählich Isolationsverluste eintreten. Diese verursachen Meßfehler, welche zudem noch schwer festzustellen sind, da sie nicht plötzlich auftreten. Allerdings löst die Kabelübertragung das Problem der Energieversorgung der Meßstation (Übertragungskabel gleichzeitig Versorgungskabel).

Die Funkübertragung von Meßdaten läßt Übertragungsstörungen (Interferenzen) vergleichsweise schnell und eindeutig erkennen. Das Risiko einer schleichenden, unerkannten Fehlerquelle wird dadurch eingeschränkt. Wegen der hohen Übertragungssicherheit, nicht zuletzt wegen der Stabilität gegenüber atmosphärischen Störungen, wird in der Regel die *Ultrakurzwellen* verwendet. Die Übertragungssicherheit ist jedoch mit begrenzter Reichweite verbunden (Sichtweite), so daß für große Übertragungsstrecken Relaisstationen benötigt werden (Störungen durch andere Quellen sind möglich). Der hohe Energieverbrauch der Sendeanlage läßt eine kontinuierliche Funkübertragung oft nicht zu. Aus diesem Grund werden telemetrische Systeme verwandt, wie sie z. B. die Wellenbojen aufweisen. Von der Empfangsstation wird die Messung gesteuert, und die Daten werden nur in Zeitintervallen abgefragt und registriert. Diese intermittierenden Wellenaufzeichnungen fügen sich jedoch bei entsprechender Intervallsteuerung zu einem geschlossenen Bild zusammen.

Sowohl Funk- als auch Kabelübertragung gründen im allgemeinen auf dem Prinzip der *Frequenzmodulation*, d. h., eine hochfrequente Trägerschwingung wird durch die niederfrequenten Schwingungen der zu übermittelnden Nachricht beeinflusst. Die Meßdaten müssen zur Übertragung somit in Schwingungen entsprechender Frequenz umgewandelt werden. Dieses Prinzip gewährleistet eine verhältnismäßig störunempfindliche Übertragung, da Störungen sich in erster Linie auf die Amplituden der Schwingungen auswirken.

Die Registrierung und Speicherung der Daten am Meßort vermeiden zwar die Risiken der Datenfernübertragung und ersparen den technischen Aufwand einer Übertragungsanlage. Sie bürgt daher für eine vergleichsweise höhere Meßgenauigkeit. Dafür ist aber die Registrier- und Speicheranlage den rauen Einsatzbedingungen am Meßort ausgesetzt. Sie muß daher entsprechend konzipiert und mit ausreichender Speicherkapazität für die Meßwerte etwa langer Sturmweatherlagen ausgerüstet sein. Ein Nachteil dieser Methode besteht darin, daß eine

Überwachung der Meßanlage im laufenden Betrieb selten möglich ist, so daß schon bei kleinen Fehlern eine ganze Meßperiode ergebnislos bleiben kann.

#### 4.5.3 Datenverarbeitung (-auswertung)

Die Auswertung der Meßdaten erfolgt an Land oder Bord (je nach Ausstattung), meist mittels digitaler Rechenanlagen. Sie liefern oder ermöglichen die Ausgabe rechnerkompatibler Meßwerte. Der Grad der Computerfreundlichkeit richtet sich nach Art und Anzahl der für die Aufbereitung zur elektronischen Weiterverarbeitung benötigten Zusatzgeräte, deren Beschaffung allerdings erhebliche Kostensteigerungen eines Meßvorhabens nach sich ziehen kann.

Computerfeindlich sind diejenigen Methoden, die Wellen photographisch zu erfassen suchen. Dennoch eröffnet die Stereophotographie die Möglichkeit großflächiger Wellenanalysen (zweidimensionale Wellenspektren). Hierdurch kann dieses Verfahren trotz äußerst aufwendiger Meß- und Auswerttechniken Ergebnisse erbringen, die anders nicht herbeizuführen sind.

In integrierten Gerätetypen bilden Meßinstrument mit Datenspeicher und Kleinrechner eine Einheit. Der Kleinrechner ist in der Lage,  $H_{1/3}$ -Welle und Periode aus Meßreihen (Dauer und Intervall der Messungen) unmittelbar zu ermitteln und aufzuzeichnen (digital oder analog). Die einzelnen Meßdaten werden auf Magnetband gespeichert, um eine spätere exaktere Analyse auf einer großen Rechenanlage zu ermöglichen.

#### 4.6 Generelle Kriterien für die Auswahl eines Wellenmeßsystems

Ein Universalgerät, das hinsichtlich seiner Einsatzfähigkeit allen Ansprüchen Genüge zu leisten vermag, gibt es bisher nicht. Die Frage, welches Gerät wann zu empfehlen ist, läßt sich wegen der Vielfalt der Instrumente und Meßprinzipien daher selten eindeutig beantworten. Mit der Wahl eines geeigneten Meßgerätes oder -prinzips ist das Problem der Wellenmessung noch nicht gelöst, da die vom Gerät gelieferten Meßdaten in geeigneter Form gespeichert oder übermittelt werden müssen. Die an das Gesamtsystem zu stellenden Anforderungen ergeben sich somit im wesentlichen aus der Meßaufgabe, den Gegebenheiten des Meßgebietes, der Einsatzdauer, der Fehleranfälligkeit und Genauigkeit, der Wirtschaftlichkeit sowie der Ausrüstung des Rechenzentrums.

##### 4.6.1 Einsatzort

Grundsätzlich sollte die Meßposition repräsentativ für das Untersuchungsgebiet sein. Eine erste Unterscheidung ist zu treffen zwischen Tief- und Flachwasserbereich. Im letzteren, vor allem in Küstennähe, wird man vielfach auf fest installierte Instrumente zurückgreifen können. Wenn die Montage eines Geräteträgers infolge geringer Wassertiefen wenig Aufwand erfordert oder eine Befestigungsmöglichkeit bereits vorhanden ist, bieten sich Wellenpegel an. Wegen ihrer vergleichsweise einfachen Konstruktion ermöglichen sie eine wenig aufwendige Wellenmessung mit ausreichender Genauigkeit. Durch ihre Lage an der Wasseroberfläche sowie ihre stabförmige Konstruktion sind sie jedoch anfällig gegen Treibgut und Schiffskollision. Die nach dem Widerstands- und Kapazitätsprinzip arbeitenden Geräte sind zudem noch „belagsempfindlich“ (z. B. durch Teer), was mit Meßgenauigkeitsverlusten verbunden ist. Vorteile hinsichtlich der Meßgenauigkeit bietet hier der elektromagnetische Wellenpegel. Im

Winter besteht Beschädigungsgefahr durch Eis. Bei einigen Meßprinzipien ist auch der Einfluß des Brackwassers zu beachten.

Große Tideschwankungen, wie sie möglicherweise gerade im Küstenbereich auftreten, können aber den Gebrauch von Wellenpegeln wegen der erforderlichen Konstruktionshöhen in Frage stellen. Diese Schwierigkeiten lassen sich durch über der Wasseroberfläche montierte Radar- oder Ultraschallgeräte überwinden.

Ist wegen zu großer Wassertiefe ein fest verankerter Geräteträger nicht einsetzbar, können Druckmeßdosen und Echolote in Erwägung gezogen werden. Beide Systeme bieten den Vorteil unkomplizierter Installation und einer gegenüber den rauen Bedingungen an der Wasseroberfläche geschützten Lage (letzteres gilt auch für über der Wasseroberfläche installierte Geräte). Durch erforderliche Kabelverbindungen ist die Einsatzreichweite von einer festen Station jedoch beschränkt. Druckmeßdosen sind bei Langzeituntersuchungen anfällig gegen Korrosion, Bewuchs und Verschmutzung. Sie haben jedoch eine vergleichsweise hohe Meßgenauigkeit. Infolge der in Abhängigkeit von der Wassertiefe veränderlichen Druckschwankung aus Oberflächenwellen, die ja gerade gemessen werden sollen, ist eine sorgfältige Kalibrierung der Geräte erforderlich. Hieraus ergibt sich vor allem im Tidebereich wegen der Berücksichtigung der wassertiefenabhängigen Dämpfung der Druckdifferenz ein größerer Aufwand bei der Datenauswertung.

Druckmeßdosen in 0,5 bis 5 m Wassertiefe können bereits Wellen unter Perioden von 4 sec nicht mehr einwandfrei identifizieren. Das einfachere Verfahren der absoluten Druckmessung ist auch abhängig von Dichteschwankungen des Meerwassers (z. B. durch Veränderung des Salzgehaltes) und des Luftdruckes, die nicht eliminiert werden können.

Mit umgekehrten Echoloten sind diese Schwierigkeiten zu überwinden. Allerdings ist die Aufzeichnung brechender Wellen fragwürdig: Der gesteigerte Lufteintrag an der Wasseroberfläche ist Ursache für eine veränderte Reflexion des Schalls, wodurch starke Verzerrungen der Ergebnisse auftreten. Da aber unter Umständen gerade diese Bedingungen in der Messung erfaßt werden sollen, kann das einen Verlust wertvoller Information bedeuten.

Im Bereich großer Wassertiefen ist die Wellenmessung im allgemeinen nur durch ein schwimmendes Meßsystem zu ermöglichen.

Die Verankerung von Wellenbojen mit Beschleunigungsmessern schafft insofern Probleme, als die Rückhaltekräfte möglichst gering gehalten werden müssen. Durch horizontale Kopplung der Boje an eine mit dem Meeresboden vertikal verankerte Spiere lassen sich die Rückhaltekräfte und die damit verbundenen Meßungenauigkeiten vermindern. Eine andere Möglichkeit (ohne Horizontalverankerung) besteht in der Wahl eines Eindrahtsystems (Gummiseil) mit entsprechender Flexibilität. Wellenbojen mit Zugkraftmessung zeichnen sich durch ein einfacheres Instrumentarium aus (kostengünstiger), sind aber recht strömungsempfindlich. Alles in allem ermöglichen Wellenbojen eine vergleichsweise kostengünstige Messung ab etwa 8 m Wassertiefe. Ihr Nachteil besteht in der Kollisionsanfälligkeit jeder Art.

Schiffswellenmesser sind auch unter rauhesten Bedingungen einsetzbar. Meßgeräte brauchen nicht ausgesetzt und eingeholt zu werden. Die gesamte Meßausrüstung befindet sich an einem Platz. Das Risiko eines Verlustes an Information ist gering. Der große gerätetechnische Aufwand zur Messung und vor allem der Auswertung macht eine solche Wellenmessung jedoch recht kostenaufwendig. Außerdem lassen sich nur Wellen mit Perioden  $> 4$  sec aufzeichnen.

Die Temperaturen im Meßgebiet stellen zusätzliche Ansprüche an die Meßgeräte. Einfache Wellenpegel und Druckmeßdosen gelten im allgemeinen als temperaturempfindlich. Das macht ihren Einsatz zwar nicht unmöglich, erfordert aber Meßwertkorrekturen, u. U. verbunden mit der Notwendigkeit, neben den Wellen auch die Temperaturen zu messen.

Besondere Anforderungen an Meßgeräte stellen Seeganguntersuchungen in Brandungszonen. Es wird empfohlen, hier fest installierte Geräte ohne bewegliche Teile einzusetzen (z. B. Druckmeßdosen, Wellenradar). Bei der Wahl des Meßprinzips ist zu bedenken, daß störende Einflüsse im Wasser-Sand-Luft-Gemisch der Brandung wahrscheinlich sind.

Bei Messungen im Watt fallen die Geräte periodisch trocken. Da hier u. U. schon Messungen bei wenigen Dezimetern Wassertiefe erforderlich sein können, ist der vertikale Meßbereich bei der Wahl des einzusetzenden Gerätes das entscheidende Kriterium.

#### 4.6.2 Einsatzdauer

Die Einsatzdauer eines Gerätesystems wird bestimmt durch die Energieversorgung, Korrosionsbeständigkeit und Bewuchsempfindlichkeit und – bei selbstregistrierenden Geräten – durch die Kapazität der Datenregistrierung. In unmittelbarer Küstennähe verursacht die Energieversorgung bei Langzeitmessungen (> 1 Jahr) durch die Möglichkeit von Kabelverbindungen im allgemeinen wenig Schwierigkeiten. Im Tiefwasserbereich bietet sich für eine langfristige, energietechnisch unproblematische Wellenaufzeichnung eine Stromversorgung durch Batterien an, die ggf. durch Windgenerator, Solarzellen oder einen automatischen Dieseldieselmotor nachgeladen werden können.

### 5. Geräte für Sediment- und Suspensionsmessung

#### 5.1 Meeresboden und Sediment

Untersuchungen über Aufbau und Eigenschaften des Meeresbodens als Aufgabe des Küsteningenieurwesens werden ausgeführt, um die geologisch/morphologischen Gegebenheiten und deren Änderungen in Wechselwirkung zu den Kräften aus Strömung und Seegang als Planungsgrundlage für Hafenaufbau, Seeverkehrswege, Pipelines (Erdgas, Abwasser) sowie für Küsten- und Inselchutzprobleme und ähnliche Fragestellungen zu erfassen. Zielsetzung dieser meist großräumig anzulegenden Untersuchungen ist die optimale Funktion von Bauwerken in einem dynamischen Umfeld. Daneben ist bei der Planung von Bauwerken der Meeresboden auch als statisches Element, nämlich als Baugrund, zu bewerten. Derartige bodenmechanische Untersuchungen für den konstruktiven Wasserbau gleichen den Verfahren zur Festlegung der Gründungsart, der Setzungsabschätzung sowie der Ermittlung der Standsicherheit usw., die auch unter festländischen Bedingungen angewandt werden. Diese Verfahren, deren Ausführung im marinen und amphibischen Bereich hinsichtlich Probengewinnung und In-situ-Messungen allerdings wesentlich aufwendiger ist, werden hier als bekannt vorausgesetzt. Vielmehr soll nachfolgend ausschließlich ein Überblick über die geologisch/morphologischen Vorgänge im amphibischen und marinen Bereich sowie über Verfahren zur Erfassung von Aufbau, Verteilung und Eigenschaften der Sedimente gegeben werden.

Um die Vorgänge von Sedimentation und Erosion, die sich als morphologische Veränderungen auswirken, aufzuzeigen, sind bei sediment-geologischen Untersuchungen im wesentlichen folgende Einzelaspekte zu berücksichtigen:

1. Alter, Herkunft und petrographische Zusammensetzung der Sedimente,
2. Ablagerungsbedingungen und geographische Verteilung der Sedimente sowie Morphologie der Gewässersohle,
3. Schichtaufbau,
4. biogene Einflüsse auf das Sediment,

Tabelle 5.1  
Einteilung der klastischen Sedimente

In Deutschland benutzte Einteilungen		Korngröße mm	Amerikanische Einteilung (ASTM)		
MÜLLER, 1964	MURAWSKI, 1972				
Grobkies	Blockkies	Stein	63	64	cobble
	Mittelkies	Grob-Mittelkies	Grobkies	20	
Feinkies		Fein-Mittelkies	Kies		Mittelkies
	Grand	Kleinkies		Feinkies	2,0
Grob sand		Kies sand	Grobsand	0,63	
	Mittelsand	Grob-Mittelsand	Sand		Mittelsand
Feinsand		Fein-Mittelsand		Feinsand	0,2
	Staub-Sand-Grobsilt	Mittelsilt	Schluff	Feinschluff	1/8
0,063					1/256
Mittelschluff	Feinschluff	Ton	0,02	1/32	silt
				0,006	
Feinschluff	Ton	Ton	0,002	1/256	clay
				0,002	

### 5. Erodierbarkeit, Setzungen und Veränderungen der Ablagerungen (Kompaktion und Diagenese).

Einzelne Punkte werden nachfolgend näher erläutert, um die Vielfalt der sediment-geologischen Vorgänge und deren enge Wechselbeziehung zu hydraulischen Randbedingungen zumindest aufzuzeigen.

#### 5.1.1 Alter, Herkunft und petrographische Zusammensetzung der Sedimente

Aus dem Alter der verschiedenen Sedimentschichten kann auf die Entwicklungstendenz eines Seegebietes geschlossen werden. Bei Fragestellungen im Küsteningenieurwesen ist es allerdings meistens ausreichend, zwischen älteren, dann überwiegend verfestigten Sedimenten

und rezenten, dann oft locker oder breiig-weich gelagerten, leicht erodierbaren Sedimenten zu unterscheiden. Die in Nord- und Ostsee bei weitem überwiegenden Sedimente wurden zum einen durch die Flüsse vom Festland herantransportiert, zum anderen stammen sie aus der Aufarbeitung des vornordseezeitlichen Untergrundes. Dieses terrigene, d. h. von Land kommende, Material wird als klastisch bezeichnet, da es aus der mechanischen Zerstörung anderer Gesteine entstanden ist. Die Einteilung dieser Sedimente erfolgt nach der Korngröße, wobei weder im nationalen noch im internationalen Rahmen einheitliche Klassifizierungsgrundsätze vorhanden sind (Tab. 5.1).

Gegenüber den klastischen Ablagerungen haben biogene Sedimente, wie z. B. Muschelbänke und Torflagen, nur untergeordnete, lokale Bedeutung. In Wattgebieten sind biogene Sedimente, z. B. Kotpillen, zusammen mit Schlickanteilen häufiger in Feinschichten vertreten und charakterisieren dann den Wechsel von Sandumlagerungen und Schlicksedimentation im Gezeitenablauf.

Es ist bis heute noch ungeklärt, in welchen Richtungen, großräumig gesehen, das Lockermaterial verlagert wird; für lokal begrenzte Gebiete bestehen dagegen schon recht genaue Vorstellungen. Diese konnten sowohl aus geologisch/morphologischen Betrachtungen unter Einschluß von Informationen über die hydrographischen Verhältnisse als auch durch den Einsatz von „Tracern“ gewonnen werden. Bei dem Tracer-Verfahren wird aus dem zu untersuchenden Seegebiet Material entnommen und nach Markierung mit fluoreszierenden Farben oder radioaktiven Substanzen wieder am Entnahmeort eingebracht. Aus der Verdriftung des markierten Materials kann auf Richtung und in gewissem Maße auf den Umfang der Sedimentumlagerungen geschlossen werden.

### 5.1.2 Ablagerungsbedingungen und geographische Verteilung der Sedimente sowie Morphologie der Gewässersohle

Ablagerung und geographische Verteilung der Sedimente sind sowohl abhängig vom hydraulischen Geschehen als auch von der Verfügbarkeit geeigneten Materials und dessen Eigenschaften (z. B. Korngröße, Sinkgeschwindigkeit). Neben diesen physikalischen Einflußgrößen werden insbesondere in den Wattgebieten auch biologische und chemische Faktoren wirksam. Aufgrund dieser Wechselbeziehungen kann aus den Ablagerungsbedingungen der Sedimente vielfach auf die hydrographischen Parameter der Vergangenheit oder auf die Einflüsse durch Wasserbauwerke geschlossen werden. Sedimentuntersuchungen ergänzen und erweitern somit die Möglichkeiten zur Beurteilung der zu erwartenden Auswirkungen von baulichen Eingriffen in die natürlichen Gestaltungsabläufe des Küstenraumes.

Die energetische Beeinflussung des Meeresbodens im Küstenbereich erfolgt dadurch, daß das Sediment von Seegang und Strömung aufgenommen, den Transporteigenschaften der einzelnen Korngrößenklassen entsprechend sortiert und verfrachtet wird, so daß schließlich eine Sedimentverteilung vorliegt, die mit den vorherrschenden Angriffskräften in einem dynamischen Gleichgewicht steht. Solange die Transportvorgänge nicht gestört werden und Zufuhr und Abtransport sich ausgleichen, bleiben Sedimentzusammensetzung und morphologischer Zustand langfristig stabil. Störungen in einem derart ausgeglichenen Sedimenthaushalt werden häufig durch Baggerungen und Verklappungen ausgelöst sowie durch Bauwerke, wobei sich Kolkungen, Lee-Erosion und Sedimentanhäufungen einstellen können. In den Wattgebieten und insbesondere im Schutz vorgelagerter Inseln sind die transportierenden und gestaltenden Kräfte aus Seegang und Strömung geringer als in den Hauptbrandungszonen, so daß auch Feinstanteile unter Mitwirkung biologischer Faktoren abgelagert werden. Das

Höhenwachstum der Watten wird durch die Wirkungsstufe des Seegangs begrenzt, hinsichtlich der Sedimentverteilung und der morphologischen Formen sind aber überwiegend Strömungskräfte prägend. Die Sedimentverteilung reicht vom mittelsandigen Feinsand im seeseitigen Wattbereich bis zum tonigen Schlick in den Verlandungszonen. Allgemein ist eine Zunahme der Feinanteile zu den Wattwasserscheiden und zur Küste hin festzustellen.

### 5.1.3 Schichtaufbau

Der innere Schichtaufbau gibt Hinweise auf die Ablagerungsbedingungen eines Sedimentes. So zeigt ein Schrägschichtungsgefüge nicht nur ein bewegtes Material an, sondern erlaubt auch Rückschlüsse auf die Bewegungsrichtung. Schichtgrenzen entstehen immer bei Wechsel der Ablagerungsbedingungen. Sie markieren Einzelereignisse, wie z. B. eine Sturmflut, oder grundsätzliche Änderungen, die eine Folge von langzeitigen Prozessen, wie etwa des Meeresspiegelanstieges, sind.

### 5.1.4 Biogene Einflüsse auf das Sediment

Biologische Einflüsse auf das Sediment ergeben sich zum einen aus der Tätigkeit von Organismen und zum anderen aus der Zuführung organischer Substanzen. Insbesondere im Lebensbereich der Wattgebiete erreicht die Produktion an Biomasse Werte, die größenordnungsmäßig sonst nur für tropische Regenwälder kennzeichnend sind. In Bereichen mit intensiver Sedimentumlagerung durch Seegang und Strömung (Riffe, Inselstrände) sind dagegen biogene Wirkungsmechanismen ohne Einfluß.

Die Tätigkeit der Lebensorganismen umfaßt das Verkitten von Partikeln in Kotballen und durch Schleimabsonderung, die Sortierung von Bodenteilchen durch Nahrungsaufnahme und Röhrenbau sowie die Zerstörung des Schichtaufbaus (Bioturbation). Ohne die biologisch bewirkte Bildung von Flockenstrukturen in den Schwebstoffen wäre beispielsweise auch die Sedimentation von Tonpartikeln erheblich eingeschränkt.

Aus der biologischen Aktivität der Organismen und der Sedimentation von Schwebstoffen werden dem Sediment organische Substanzen zugeführt, die chemische Prozesse auslösen und auch eine Änderung bodenphysikalischer Eigenschaften bewirken. So wird durch die organische Substanz insbesondere das Wasserbindevermögen der Sedimente erhöht. Ferner werden die plastischen Eigenschaften und die Kompaktionsfähigkeit bei bindigen Sedimenten beeinflusst (Erhöhung der Setzungsempfindlichkeit). Der Glühverlust, der in erster Annäherung der organischen Substanz entspricht, beträgt beispielsweise bei Wattsanden bis zu 2 %, bei Mischwatten (Schlicksand) bis zu 4 % und erreicht bei tonigem Schlick in Verlandungszonen Werte bis zu 20 %.

### 5.1.5 Erodierbarkeit, Setzungen und Veränderungen der Ablagerungen

Die Erodierbarkeit ist abhängig von der Korngrößenverteilung und bei bindigen Sedimenten außerdem von den plastischen Eigenschaften und dem Konsolidierungsgrad. Die geringste Erosionsgrenzgeschwindigkeit weisen Sande mittlerer Korngröße auf. Verfestigte und vorbelastete Sedimente sind dagegen erosionsbeständiger. So ist beispielsweise der im

Küstengebiet weit verbreitete Geschiebemergel vielfach auch für rezente morphologische Gestaltungsvorgänge bestimmend, weil seine Aufarbeitung verhältnismäßig langsam abläuft, da die nach Erosion der bindigen und feinkörnigen Bestandteile verbleibenden gröberen Anteile nur in geringem Umfang transportiert werden und dann als autochthones bzw. paraautochthones Restsediment den Untergrund gegen weitere Erosion schützen.

Jedes Sediment erfährt vom Zeitpunkt seiner Ablagerung an Umwandlungen durch Setzung (Kompaktion) und/oder durch chemische Prozesse. Die Kenntnis dieser Faktoren ist wesentlich für bodenmechanische Untersuchungen und für die Beurteilung von Sackungen.

## 5.2 Geräte zur Entnahme von Bodenproben

Die Vielzahl der für meeresgeologische Arbeiten zu messenden Parameter und besonders ihre Verschiedenartigkeit hat zu einer kaum noch überschaubaren Gerätevielfalt geführt. Welches Gerät im Einzelfall eingesetzt werden sollte, ist abhängig von der Beschaffenheit des Seegrundes im Untersuchungsgebiet, der speziellen Aufgabenstellung und von der Ausrüstung des Untersuchungsschiffes mit Bäumen und Kränen. Oft erweist es sich in der Praxis als erforderlich, vorhandene und durchaus bewährte Geräte den anstehenden Aufgaben entsprechend zu modifizieren. Diese Geräte können hier nicht alle erfaßt werden, vielmehr sind im folgenden nur die „Grundgeräte“ aufgeführt, wobei gelegentlich Hinweise auf Modifikationen gegeben werden.

Die „klassische“ Art der geologischen Arbeit auf See ist die Entnahme von Meeresbodenmaterial mit Greifern, Lot, Dredge o. ä. zur späteren Untersuchung an Bord und im Labor. Dieses ist ein sehr kosten- und zeitaufwendiges Verfahren, das z. T. auch nur ein stichprobenartiges Bild des Untersuchungsgebietes liefert. In der letzten Zeit werden daher verstärkt Anstrengungen unternommen, von der punktförmigen Probennahme mit anschließender verzögerter Laboranalyse zu flächenhaften Messungen (z. B. Sedimentechographen) überzugehen, die erste Ergebnisse bereits an Bord erkennen lassen. Diese Messungen sollen nicht nur die punktförmige Probenentnahme ersetzen, sondern darüber hinaus auch noch zusätzliche Informationen (z. B. über Schlickstärken) liefern. Hierbei handelt es sich um bodenberührungsfreie Verfahren, bei denen auf Vergleichs- oder Kalibrierungsuntersuchungen durch Einzelproben nicht verzichtet werden kann.

In der folgenden Aufstellung wird unterschieden zwischen Geräten zur Entnahme von Bodenmaterial, Geräten zur „in-situ“-Messung und nicht bodenberührenden Geräten. Schließlich werden auch noch Laborverfahren aufgeführt, da sie wesentlicher Teil der geologischen Untersuchungen sind.

### 5.2.1 Greifer (ohne Kastengreifer)

**Aufgabe:** Entnahme von Material unmittelbar von der Meeresbodenoberfläche an einem bestimmten Ort.

**Arbeitsweise:** Ähnlich wie bei Greifbaggern wird das Probenmaterial von meist zwei (selten mehr) Schalen zusammengeschart und kann so an Bord geholt werden. Das Gerät wird dazu in geöffnetem Zustand auf dem Meeresboden abgesetzt. Das Schließen der Klappen erfolgt nach Auslösen einer Sperrklinke entweder durch eine Feder (Shipek-Greifer) oder durch Hebelarme, an die der Hievdraht angeschlagen ist.

**Vorteile:** Leichte und unkomplizierte Handhabung, schnelle Probennahme (mit Hilfe

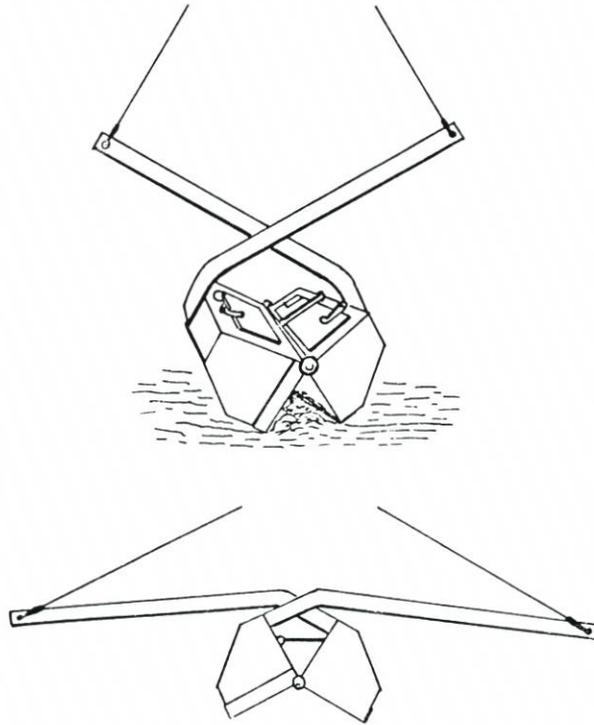


Abb. 5.1: Backengreifer

des Shipek-Greifers selbst noch bei verfestigten Böden), auch bei stärkerem Seegang einsetzbar, unterschiedliche Größen (besonders beim Van-Veen-Greifer) für den Einsatz von kleinen Booten ebenso wie für Entnahme größerer Materialmengen von größeren Fahrzeugen aus.

**Nachteile:** Meist mehr oder weniger „gestörte“, d. h. durcheinandergemengte Proben, Gefahr des Ausspülens der Oberflächen oder der feineren Fraktionen.

**Van-Veen-Greifer (Backengreifer, Abb. 5.1):** Gebräuchlichster Typ; zwei Klappen werden durch Hebelarme verschlossen. Bei grobem Material besteht die Gefahr, daß Steine zwischen die Klappen kommen und eine Schließung verhindern, so daß das Material ausgespült wird.

*Modifikation:* Klappen an der Oberseite der Greiferhalbschalen zur Materialentnahme.

**Monaco-Zangen:** Ältester Greifertyp, mehrere Verschlussteile, nur noch selten benutzt.

**Shipek-Greifer:** Schließt durch starke Federn, daher Möglichkeit zur Materialentnahme auch von festen, steinigen Gründen. Steine, die zwischen die Verschlusklappen geraten, werden zerschlagen, so daß ein Schließen mit Sicherheit gewährleistet ist. Verletzungsgefahr durch die sehr starken Federn bei vorzeitigem Ausklinken der Sperre beim Spannen oder Aufsetzen.

**Bumerang-Greifer:** Dieser Greifer wird nicht an einem Windendraht gefahren, sondern er fällt frei auf den Meeresgrund, wo er nach der Schließung Gewichte abwirft und durch Auftriebskörper wieder an die Wasseroberfläche gebracht wird.

## 5.2.2 Lotgeräte (Kerngeräte)

**Aufgabe:** Entnahme von weitgehend ungestörten Sedimentkernen bis zu 20 m Eindringtiefe.

**Arbeitsweise:** Das Grundprinzip ist, aus dem Meeresboden eine Sedimentsäule herauszustanzen, ohne die Sedimentoberfläche oder den Schichtaufbau zu zerstören. Die einfachste Lösung ist ein Rohr, das durch aufgelegte Gewichte in den Meeresboden hineingedrückt wird und an der Basis einen Verschluss hat, der beim Hieven die Sedimentsäule am Herausrutschen hindert. Der Einbau eines geeigneten Verschlusses ist nicht problemlos und die Gewinnung eines möglichst langen und vollständigen Kerns oft nur mit Zusatzeinrichtungen (Kolben) möglich.

Die Eindringtiefe eines Lotes ist nicht nur eine Frage der aufgelegten Gewichte, sondern ganz wesentlich abhängig vom Sedimenttyp: Je sandiger ein Sediment ist, desto schwerer dringt ein Lot ein (in reinem Sand nur wenige Zentimeter).

Der Kastengreifer oder REINECK-Greifer (REINECK, 1963) gehört zu den Lotgeräten. Ein Kasten von meist 30 × 40 cm Größe und ca. 40 cm Höhe wird durch Bleigewichte in den Boden gedrückt. Die Schließung erfolgt durch ein „Messer“, das beim Hieven unter den Kasten geschoben wird.

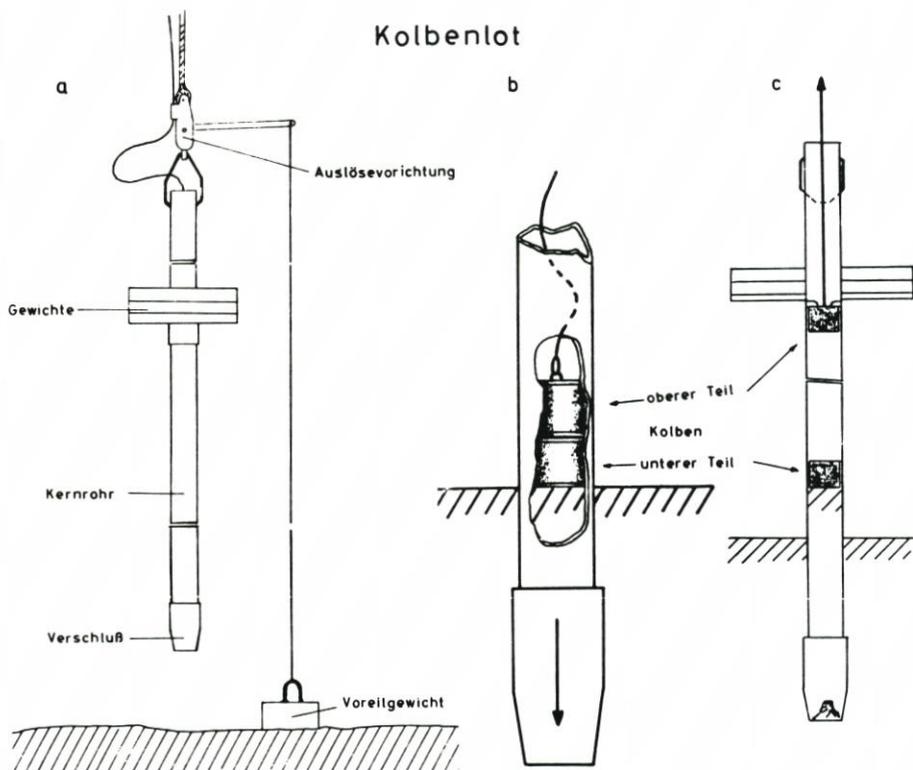


Abb. 5.2: Kolbenlot mit Abreißkolben

a) vor Bodenberührung; b) Das Rohr dringt in das Sediment ein, der Kolben bleibt auf der Sedimentoberfläche stehen; c) Beim Hieven wird das Lot am oberen Kolbenteil, der abreißt, aus dem Boden gezogen. Der untere Kolbenteil bleibt auf der Sedimentoberfläche. Gleichzeitig schließt der Verschluss im unteren Lot-Teil

**Vorteile:** Große Proben, ungestörte Sedimentoberfläche, kann auch für sandige Sedimente eingesetzt werden.

**Nachteile:** Schwer, unhandlich, nicht bei rauher See einsetzbar.

**Modifikation:** Kleinere Ausführung, aber dann geringere Eindringtiefen.

**Shi-Greifer:** Sehr kleiner Kastengreifer mit anderem Rahmen. Leicht zu handhaben, aber nur für weiche Sedimente geeignet. Wenig Material.

**Kastenlot:** Kasten, meist  $15 \times 15$  cm oder  $30 \times 30$  cm, bis 18 m Länge, mit wenigen Handgriffen an ein Oberteil anzubringen, welches die Gewichte trägt. Verschluss durch zwei Klappen.

**Vorteile:** Viel Material, Kastenlänge variierbar, die Möglichkeit, den Kasten an Bord aufzuschrauben und sofort Messungen vorzunehmen. Einfache Handhabung.

**Nachteile:** Verschluss funktioniert nicht immer zuverlässig, kaum Eindringtiefen schon bei geringen Sandgehalten.

**Kolbenlot** (Abb. 5.2): Lotgeräte, die zur besseren Eindringung mit einem Kolben ausgestattet sind. Dieser befindet sich vor der Probennahme anstelle des Kernes etwa in Höhe des Verschlusses im Kernrohr. Während das Kernrohr in das Sediment gedrückt wird, bleibt der Kolben an der Sedimentoberfläche stehen und erzeugt so einen Unterdruck. Besonders bei größeren Wassertiefen zu empfehlen.

**Vibrationskerngeräte und Spülcorer:** Wegen des hohen Reibungswiderstandes von Sand können Lotgeräte in sandigen Sedimenten nicht oder nur unwesentlich eindringen, selbst wenn zusätzliche Gewichte aufgelegt werden. Es besteht vielmehr die Gefahr, daß das Lot wegen seiner Kopflastigkeit umfällt, wobei im ungünstigen Fall das Kernrohr verbogen wird. Daher wurden zur Entnahme von Kernen aus Sanden und leicht verfestigten Böden Vibrationskerngeräte und Spülcorer entwickelt.

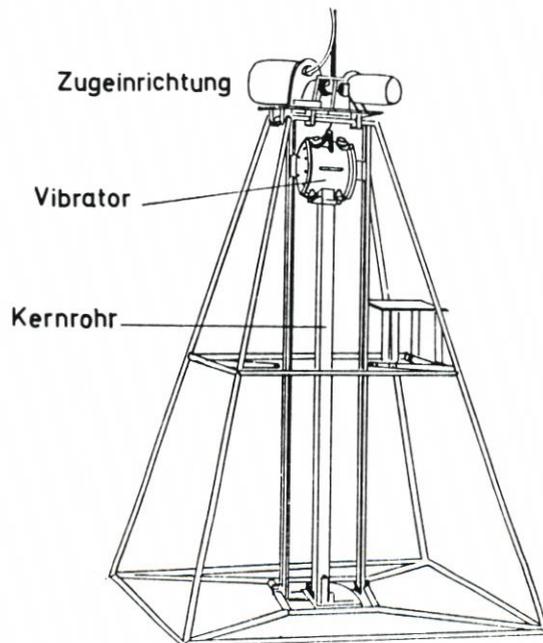


Abb. 5.3: Vibrationshammer

**Vibrationskerngerät (*Vibrocorer*)** (KIRBY, 1972): Bei diesem Gerät wird das Kernrohr in einem Gestell auf dem Meeresboden abgesetzt und dann mit Hilfe eines Vibrators in den Boden getrieben. Am Kopf des Gestells befindet sich eine Winde, die den Kern aus dem Boden zieht, bevor das Gerät an Bord gehievt werden kann (Abb. 5.3). Wegen der Abmessungen und des Gewichts nicht von kleinen Schiffen einsetzbar. Einigermaßen ruhiges Wetter erforderlich. Das Bedienungspersonal sollte geschult sein.

**Spülcorer:** Kurz über dem untersten Teil des Kernrohres, am sog. Schuh, befinden sich Wasserdüsen, die einen Kolk spülen, in welchen das Kernrohr nachrutschen kann. Die Düsen sind dergestalt angeordnet, daß nur oberhalb des Schuhs gespült wird, während das Kernrohr in den ungestörten Boden eindringt. Hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten gilt dasselbe wie beim Vibrationsgerät, welches in Deutschland bevorzugt wird.

### 5.2.3 Dredgen

**Aufgabe:** Aufsammeln groben Materials in einem größeren Gebiet.

**Arbeitsweise:** Einfaches Zusammenscharren von Material.

**Vorteile:** Unkompliziert. Große Materialmengen, besonders beim Aufsammeln verstreut liegender Gerölle.

**Nachteile:** Entnahmestellen schlecht zu lokalisieren, Gerät geht gelegentlich verloren.

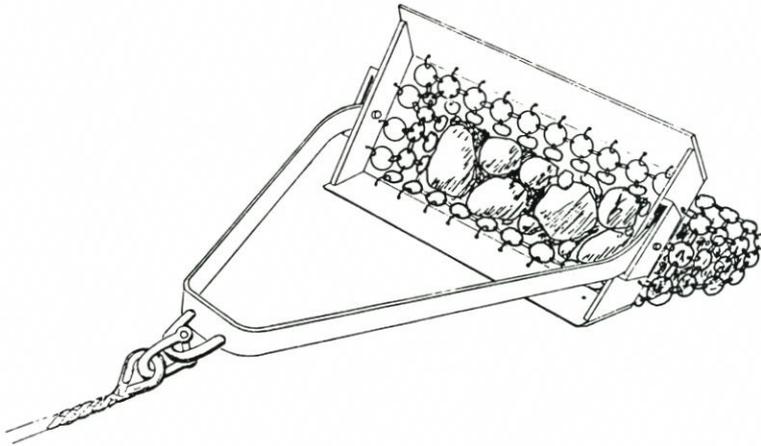


Abb. 5.4: Kettensackdredge

**Kettensackdredge** (Abb. 5.4): An einem Rahmen, der aufrecht über den Meeresboden gezogen wird, ist ein Kettensack zur Aufnahme der Gerölle befestigt. Sollen auch kleinere Gerölle gesammelt werden, wird ein Nylonnetz mit kleinerer Maschenweite in dem Kettensack angebracht. – Die Länge der Schleppleine sollte etwa das Dreifache der Wassertiefe betragen.

**Tonnendredge:** Das Material wird in einer Stahltonne gesammelt.

### 5.3 Geräte zur In-situ-Messung

Geräte zur In-situ-Messung von Sedimenteigenschaften wurden aus mehrfacher Sicht entwickelt (BECKMANN, 1971). Einmal sollen mit ihnen solche Messungen ausgeführt werden, die nicht an der aus dem Schichtverband losgelösten Probe vorgenommen werden können. Als Beispiel seien bodenmechanische Messungen genannt, wie Bestimmung der Lagerungsdichte und der Schichtstärken durch Drucksondierungen und Ermittlung der undrainierten Scherfestigkeit durch Flügelsondierungen. Zum anderen erlauben sie, durch Erfassung gesteinspezifischer physikalischer Parameter verschiedenartige Sedimente zu erkennen und voneinander zu unterscheiden. Da hierbei auf die arbeitsintensive Probennahme und -verpackung sowie auf die kosten- und zeitaufwendige Laborarbeit verzichtet werden kann, bietet sich die Möglichkeit, Bodenkartierungen in vertikaler (Schichtaufbau) und in horizontaler Richtung schnell, kostengünstig und mit großer Informationsdichte vorzunehmen.

Problematisch ist naturgemäß immer der Vergleich zwischen einer Kartierung, die auf herkömmlichen Methoden wie Korngrößenbestimmung etc. beruht, und der Klassifizierung eines Sediments nach seinem physikalischen Verhalten, zumal dieses durchaus unterschiedliche Ursachen haben kann. Es werden daher in der Praxis immer beide Verfahren angewandt, indem das Netz für die Bodenproben sehr weitmaschig angelegt und der Zwischenraum durch Sondenmessungen ausgefüllt ist. Zunächst wurden – wahrscheinlich den Sondenentwicklungen der Erdölindustrie (Bohrlochsonden) folgend – nur punktförmig arbeitende Sonden eingesetzt, mit denen der Schichtaufbau der obersten Sedimentlagen erkundet werden sollte. Wenig später traten dann die Bodenschleppsonden hinzu, die zur horizontalen Aufnahme des Seegrundes dienen. Allerdings ist dieser Sondentyp auch heute noch verhältnismäßig selten in Gebrauch und befindet sich zum Teil noch in der Entwicklungs- bzw. Erprobungsphase.

#### 5.3.1 Punktsonden

**Aufgabe:** Messung von physikalischen und bodenmechanischen Eigenschaften des Meeresbodens, Erfassung des Schichtaufbaus und der Änderungen in vertikaler Richtung. Oft auch zur Korrelierung weit auseinanderliegender Bohrungen oder zur Planung von Bohrungen eingesetzt.

**Arbeitsweise:** Die Sonden werden in den Untergrund gedrückt. Das Meßprinzip richtet sich nach der Art des zu erfassenden Parameters.

**Vorteile:** Verhältnismäßig kostengünstig und unkompliziert, besonders im Vergleich zu Bohrungen. Dadurch auch dichtes Stationsnetz möglich. Geeignet für schnelle Übersichten.

**Nachteile:** Einige der Sonden messen die interessierenden Sedimentparameter nur indirekt, z. B. Porosität über den elektrischen Widerstand. Dabei sind Interpretationsfehler möglich, weil die gemessenen Größen in Mehrfachkorrelation zu unterschiedlichen Eigenschaften stehen. Die Messungen mit den verschiedenen Sonden und die Ausdeutung der Meßergebnisse erfordern daher sehr viel Erfahrung.

**Geoelektrische Sonden:** Aus der Messung des elektrischen Widerstandes von Sedimenten kann der spezifische Gesteinswiderstandsfaktor bestimmt werden. Aus ihm lassen sich Porosität und Kompaktion der verschiedenen Schichten sowie die Schichtgrenzen ableiten.

Die Anordnung der Elektroden variiert sehr stark; sie wurde zum Teil in Anlehnung an die in der Erdölindustrie verwendeten Bohrlochsonden konzipiert.

**Isotopsonde:** Die Sonde enthält neben einem Scintillometer einen Gammastrah-

ler und eine Neutronenquelle. Sie dient zur Bestimmung von Lagerungsdichte und Feuchtigkeitsgehalt. In Verbindung mit anderen Meßmethoden ist diese Sonde besonders für Raumgewichtsbestimmungen bei Bodenersatzmaßnahmen unter Wasser geeignet.

**Flügelsonde:** Bestimmung der Scherfestigkeit des Sediments durch Verwendung eines Flügels bestimmter Größe und Messung der Kraft, die zum Drehen des Flügels aufgewendet werden muß.

**Spitzendrucksonde:** Gemessen wird der Spitzendruck einer Sonde beim kontinuierlichen Eindringen in den Boden in  $\text{kp} \cdot \text{cm}^{-2}$ . Bei Raumsonden werden Bodenaufbau und Festigkeitseigenschaften durch die jeweilige Schlagzahl pro 10 cm Eindringtiefe oder durch Eindringtiefe pro Schlag gekennzeichnet.

### 5.3.2 Bodenschleppsonden

**Aufgabe:** Erfassung von physikalischen Eigenschaften des Meeresbodens an der Oberfläche und ihrer Veränderungen in horizontaler Richtung mit dem Ziel einer schnellen Übersichtskartierung vom fahrenden Schiff aus. In Verbindung mit Rechner und Plotter kann bereits an Bord eine Karte entstehen.

**Arbeitsweise:** Die Sonden werden auf einem Schleppkörper über den Seegrund gezogen. Die Messungen erfolgen zum Teil über Dorne oder Stifte, die in den Boden gedrückt werden (BECKMANN, 1973). Das Meßprinzip richtet sich nach der Art der zu erfassenden Parameter. Häufig werden verschiedene Sondentypen gleichzeitig eingesetzt.

**Vor- und Nachteile:** Die Bodenschleppsonden sind ein wesentlicher Schritt auf dem Wege zur automatischen, schnellen und kostengünstigen sedimentologischen Kartierung des Meeresbodens. Ihre Entwicklung begann allerdings erst vor kurzer Zeit und ist heute noch nicht abgeschlossen. Daher werden bis zur Routineanwendung noch umfangreiche Arbeiten erforderlich sein, Meßprinzipien oder -schaltungen verbessert oder im ungünstigen Fall verworfen werden müssen. Bisherige Einsätze haben dennoch schon erfolgversprechende Ergebnisse gebracht.

**Mikrophonsonde:** Einfachste Bodenschleppsonde. Aus dem Schleifgeräusch eines Schleppkörpers („Lüneburg-Sonde“) oder eines am Schleppkörper montierten Dorns („Kratzsonde“) kann näherungsweise auf die Korngrößenassoziationen, Sedimenthärte und andere Eigenschaften geschlossen werden.

**Elektrische Schleppsonde:** Zur Bestimmung des Formationswiderstandsfaktors, aus dem Kompaktion und Porosität abgeschätzt werden können. Sehr unterschiedliche Anordnungen der Elektroden, z. B. bei der Direktmessung des induktiven oder des kapazitiven Formationswiderstandsfaktors (DEMIRAY, 1978).

**Gamma/Gamma-Sonde, Gamma/Neutronen-Sonde u.ä.:** Dieser Sondentyp dient zur Bestimmung von Porosität und Wassergehalt. Parallel zu den elektrischen Sonden gefahren, verbessert er deren Aussage und ermöglicht weitergehende Schlüsse über die Sedimentbeschaffenheit (BECKMANN, 1973).

## 5.4 Nicht bodenberührende Geräte

Schon bei den Bodenschleppsonden wurde auf die Kostenersparnis und Arbeiterleichterung hingewiesen, die sich bei Seegrundkartierungen mit diesen Geräten wegen der Reduzierung der Bodenproben und der höheren Informationsdichte ergeben. Das gilt auch für die

nicht bodenberührenden Geräte, die zum Teil den zusätzlichen Vorteil bieten, von der Wasseroberfläche aus arbeiten zu können.

Zwei Gruppen sind zu unterscheiden:

1. Die „passiven“ Geräte, die ein vorhandenes Feld und seine räumlichen Veränderungen registrieren. Hierzu gehören *Magnetometer* und *Gravimeter*, von denen für das Küsteningenieurwesen lediglich das Magnetometer interessant ist, da es zum Aufsuchen von Eisenteilen, wie z. B. Wracks oder Rohrleitungen, geeignet ist, auch wenn diese von Sedimenten überdeckt sind. Zu nennen sind das Protonen-Magnetometer zur Messung der Totalintensität, die Förster-Sonde für die Komponentenmessung und die Förster-Differenzsonde zum Aufspüren von Störkörpern im Nahbereich. Der Einsatz dieser Geräte erfordert allerdings erhebliche Erfahrungen.

2. Die „aktiven“ Geräte senden Impulse aus und registrieren das reflektierte Signal. Dazu gehören insbesondere die *Unterwasserschallgeräte*, die im Küsteningenieurwesen eine ständig wachsende Bedeutung erlangen. Der Gruppe der „aktiven“ Geräte werden hier auch die photographischen Methoden (einschließlich TV) zugeordnet, die wegen der ungünstigen Lichtverhältnisse an der Gewässersohle allerdings nur in Zusammenhang mit Blitzleuchten oder Scheinwerfern eingesetzt werden können.

#### 5.4.1 Akustische Geräte

Die gute Ausbreitung von Schallwellen im Wasser hat zur Entwicklung des Echolotes geführt, das die umständlichen Handlotungen zur Tiefenbestimmung ersetzte und durch die kontinuierliche Registrierung im Echogramm die Möglichkeit bietet, die Morphologie des Seegrundes zu erkennen (HAMPTON, 1974). Darüber hinaus ist bekannt, daß sich „harte“ Sedimente (z. B. Sand) von „weichen“ Sedimenten (z. B. Schlick) durch die Größe der Amplitude des reflektierten Schallimpulses unterscheiden. Diese Erfahrung führte zur Entwicklung eines *Echostärkenmeßgerätes*, das in Verbindung mit dem Echolot eine sedimentgeologische Übersichtskartierung des Meeresbodens erlaubt. Eine Weiterentwicklung der linienförmigen Echolotung ist schließlich das flächenhaft arbeitende *Side-Scan-Sonar*. Mit diesem Gerät, das einen schmalen horizontalen, aber großen vertikalen Öffnungswinkel hat, wird der Meeresboden nach beiden Seiten hin qualitativ aufgenommen. Damit sind natürliche Bodenstrukturen (z. B. Rippelfelder), durch Menschen erzeugte Spuren (Schleifspuren) und auf dem Boden liegende Gegenstände erkennbar, so daß dieses Gerät immer mehr Verwendung im Küsteningenieurwesen findet. Darüber hinaus kann auch die Sedimentbeschaffenheit aus den Sonogrammen näherungsweise abgeschätzt werden.

Bei den üblichen Vermessungsecholoten ist der ausgesandte Schallimpuls nicht stark genug, in das Sediment einzudringen und Reflexionen von tieferen Schichten oder im Sediment befindlichen Gegenständen zu liefern. Allenfalls gelingt das noch bei sehr weichen Schichten. Diese Aufgabe wird erfüllt durch die mit größerer Schallenergie und niedrigerer Frequenz arbeitenden *Sedimentechographen*. Ihre Bezeichnung und die Abgrenzung gegen Echographen ist unscharf, i. allg. versteht man unter diesem Begriff Geräte, deren Frequenzen zwischen 16 kHz und einigen hundert Hz liegen. Die Frage, welche Ausführung die besten Ergebnisse liefert, ist nicht allgemein festlegbar, sondern hängt im Einzelfall von der Aufgabenstellung und dem Sedimenttyp ab: Große Eindringtiefen sind nur mit niedrigen Frequenzen und einer damit verbundenen geringeren Auflösung zu erzielen. Umgekehrt erfordert eine gute Auflösung höhere Frequenzen und kurze Schallimpulse. Schallwellen durchdringen frisch aufgeschüttete Sande leichter als bereits verfestigtes Material. Der

Abstrahlwinkel ist meist sehr groß, daher sind Störungen häufig. Aber gerade dieser „Schmutzeffekt“ wird gelegentlich ausgenutzt, z. B. bei der Suche nach unter dem Meeresboden liegenden Rohrleitungen.

Vom Meßprinzip her sind Echolote Zeitmeßgeräte. Die Kalibrierung der Registriergeräte in Metern ist nur dann zulässig, wenn die Schallgeschwindigkeit im durchschaltten Medium annähernd gleichbleibend ist und Laufzeitkorrekturen für den gesamten Bereich gleich sind. Da die Schallgeschwindigkeiten in Wasser und Sediment sehr stark differieren können, ist diese Vereinfachung nicht immer möglich. In einem Sedimentechogramm werden deshalb Wassertiefen und Sedimentmächtigkeiten grundsätzlich durch Zeitangaben in Sekunden bzw. Millisekunden gekennzeichnet.

Für die Aufzeichnungen stehen Recorder verschiedener Hersteller zur Verfügung, die das Signal entweder analog oder digital registrieren. In neuerer Zeit werden zumindest für Sedimentechographen fast nur noch Trockenpapierschreiber verwandt, beim Side-Scan-Sonar sind dagegen Naßpapierschreiber üblich.

Side-Scan-Sonar- und Sediment-Echolotanlagen sind technisch aufwendig und entsprechend teuer. Sie sollten von eingearbeiteten Technikern eingesetzt und gewartet werden. Ebenso ist die Ausdeutung der Aufzeichnungen vielfach nicht problemlos. Es empfiehlt sich daher für den Küsteningenieur, bei dem nicht allzu häufig entsprechende Arbeiten anfallen, die notwendigen Untersuchungen im Auftragsverfahren ausführen zu lassen.

**Side-Scan-Sonar:** Qualitative, flächenhafte Erfassung der Bodenmorphologie. Möglichkeit zum Erkennen natürlicher und künstlicher Strukturen und zur groben Klassifizierung von Sedimenten. Geeignet zum Aufsuchen von Gegenständen, deren ungefähre Größe sich aus der Länge des akustischen Schattens und der Schlepptiefe des Gerätes

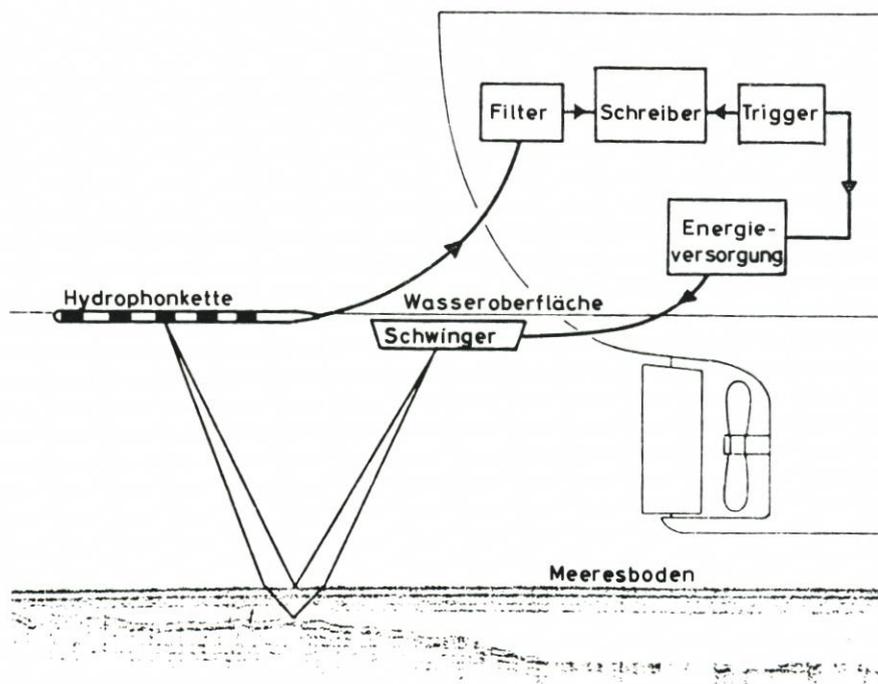


Abb. 5.5: Schematische Darstellung eines Boomer-Meßsystems mit Sedimentechogramm

abschätzen läßt, ferner zur Inspektion von Unterwasserbauwerken und zur Überwachung von Baggerstellen und Baggergut-Schüttstellen.

**Sedimentechograph (Sub-Bottom-Profiler):** Untersuchung der obersten Bodenschichten und ihres Aufbaus unterhalb der Gewässersohle. Begrenzte Eindringtiefe, besonders bei festgelagerten Sanden, aber meist gute Auflösung. Zur Kartierung durchgehender Horizonte (z. B. unterhalb einer beweglichen Sandschicht) und zum Aufsuchen von Bauwerken unterhalb der Gewässersohle (Düker, Rohrleitungen).

**Boomer, Sparker (Abb. 5.5):** Diese Geräte, die eigentlich noch zu den Sedimentechographen zu zählen sind, geben einen erheblich stärkeren Schallimpuls ab, der tiefer in den Boden eindringen und auch harte Sedimente durchdringen kann. Technisch wird der Impuls nicht durch einen Schwinger, sondern durch Druckstoß unter einer durch einen Stromstoß bewegten Wirbelstromplatte (Boomer) oder entlang einer Funkenstrecke (Sparker) erzeugt, wobei ein breites Frequenzspektrum entsteht. Deshalb und weil Störpegel und Nutzsignale dicht beieinander liegen, ist eine Weiterverarbeitung des Echos mit Filtern oder durch Rechenmethoden sehr zu empfehlen. Wegen der Art der Energiequelle sind Sender und Empfänger (Hydrophone, meist zu mehreren in einer Kette angeordnet) getrennt.

#### 5.4.2 Optische Geräte

Besondere Untersuchungen und genaue Beobachtungen sind in einigen Fällen nur visuell möglich. Häufig müssen derartige Arbeiten durch Taucher erledigt werden. Gelegentlich lassen sich die Aufgaben auch durch den Einsatz von Unterwasserfernsehen und Unterwasserphotographie lösen (LUCK, 1973), mit denen zusätzlich noch dokumentiert werden kann. Die Arbeitsweisen sowie die Vor- und Nachteile der verschiedenen Systeme sind allgemein bekannt. Der Unterschied zu den an Land benutzten Geräten besteht im wesentlichen in der Verwendung druckgeschützter Gehäuse. Wegen der ungünstigen Lichtverhältnisse ist in den deutschen Küstengewässern eine zusätzliche Beleuchtung durch Blitzlampen oder Unterwasserscheinwerfer erforderlich. Auch damit sind Übersichtsaufnahmen aus größerer Entfernung i. allg. noch nicht möglich. Mit Hilfe einer automatisch arbeitenden Kamera lassen sich schließlich Dauerbeobachtungen über einen längeren Zeitraum ausführen, eine Arbeitsmethode, die bei ökologischen Untersuchungen und bei Beobachtungen von Sandbewegungsvorgängen mit Erfolg angewandt wird.

#### 5.5 Geräte zur Suspensionsmessung

Der Transport feinkörniger Sedimente erfolgt in Abhängigkeit vom Turbulenzeintrag durch Strömung und Seegang als Geschiebe und/oder in Suspension. Zur Klärung von Sedimentations- und Erosionsabläufen können daher Suspensionsmessungen ergänzende Aufschlüsse zu den Ergebnissen von morphologisch/sedimentologischen Untersuchungen geben.

Die Gerätevielfalt ist ähnlich groß wie bei den Entnahmegerten für Sedimente. Vom Gerätetyp bzw. Verfahren her sind im wesentlichen zu unterscheiden:

1. Wasserschöpfer (WOHLENBERG, 1950)
2. Pumpverfahren (CHRISTIANSEN, 1974; GÖHREN, 1973)
3. Trübungsmeßverfahren (RAGUTZKI, 1974)

Vertikal- wie auch Horizontal-Wasserschöpfer sind einfach in der Handhabung. Da das Probenvolumen in der Regel aber nur 1 Ltr. beträgt, ist die Schwebstoffbestimmung noch

verhältnismäßig unsicher, weil durch die momentan ablaufende Probenentnahme z. B. Extremwerte aus Schwebstoffwolken erfaßt werden können. Besser geeignet ist daher die kontinuierliche, über mehrere Minuten laufende Entnahme durch eine Pumpe in einen Auffangbehälter (Größe bis 200 Ltr.), wobei eine Durchlaufzentrifuge zwischengeschaltet ist, um die Schwebstoffe abzutrennen. Nachteile dieser Zentrifugmessungen sind der größere Aufwand und die Einsatzbeschränkung auf ruhige Wetterlagen.

Die verschiedenen optischen Trübungsmeßverfahren können zum Teil auch für Dauermessungen eingesetzt werden. Da die Meßwerte – je nach Anordnung von Lichtquelle und Photozelle handelt es sich um Transmissions- oder Reflexionswerte – den Schwebstoffgehalt nur indirekt wiedergeben und u. a. vom Feinheitsgrad der Schwebstoffe abhängig sind, müssen zusätzliche Proben nach konventionellen Verfahren gewonnen werden.

## 5.6 Laboruntersuchungen

Von den Bodenkennwerten, deren Bestimmung nach Laborverfahren erfolgt, soll hier lediglich die Korngrößenzusammensetzung behandelt werden, da sie – wie erwähnt – ein wichtiges Merkmal für die Klassifizierung rezenter mariner Sedimente ist. Die Bestimmungsverfahren sind nicht vereinheitlicht, so daß es häufig schwierig oder unzulässig ist, die Ergebnisse unmittelbar miteinander zu vergleichen. Das ist in vielen Fällen, in denen es nur auf eine grobe Charakterisierung ankommt, belanglos. Bei speziellen Untersuchungen, wie z. B. Fragen zur Sandbewegung, können Verfahrensunterschiede aber durchaus zu Fehlschlüssen führen, wenn Vergleiche mit früheren Untersuchungen angestellt werden sollen.

### 5.6.1 Verfahren zur granulometrischen Analyse

Die verbreitetsten Untersuchungsmethoden sind (MÜLLER, 1964):

**Optische Messungen:** Bei diesem einfachsten Verfahren wird die Größe der einzelnen Gesteinskomponenten durch Messung mit einem Maßstab bestimmt. Obwohl unter Zuhilfenahme eines Mikroskopes auf diese Weise auch Sande untersucht werden können, ist dieses Verfahren für normale Korngrößenbestimmungen nur bei den groben Fraktionen zu empfehlen, da es sehr zeit- und arbeitsaufwendig ist. Als Hilfsmittel können ferner eine Kornstufenschaulehre oder spezielle Meßlupen verwandt werden.

Außer zur Korngrößenanalyse wird die optische Messung auch zur Untersuchung des Rundungsgrades der Einzelkomponenten herangezogen, der Hinweis auf das Transportverhalten und die Umlagerungshäufigkeit gibt.

**Siebanalyse:** Sie ist die wohl gebräuchlichste Methode. Die Klassifizierung des Sedimentes erfolgt wie bei der optischen Messung nach geometrischen Gesichtspunkten, wobei als Maß die Maschenweite der Siebe (bzw. der Löcher bei Lochsieben) dient. Die Stufung der Siebe ist logarithmisch und sollte gleichmäßig sein. Für die meist gut sortierten Sande an den deutschen Küsten ist die amerikanische Teilung, die auf dem Logarithmus mit der Basis 2 aufbaut, günstiger als das deutsche Verfahren nach DIN 4188, das auf der dekadisch logarithmischen Teilung beruht. Unterhalb einer Korngröße von 0,063 mm liefert die Siebung nur unbefriedigende Ergebnisse.

Für den Siebvorgang stehen Schüttelmaschinen zur Verfügung, die nach dem Prinzip der Plansiebung oder der Wurfsiebung, gelegentlich auch kombiniert, arbeiten. Beim Plansiebver-

fahren besteht die Möglichkeit, Siebhilfen einzusetzen. Weitere Modifikationen bestehen in der Anwendung der Geräte für Naßsiebungen oder Trockensiebungen. Bei sorgfältiger Vornahme der Analysen lassen sich in den Ergebnissen keine nennenswerten Unterschiede erkennen. Im Interesse einer sicheren Vergleichbarkeit zumindest der eigenen Daten sollte das einmal eingeführte Verfahren nicht geändert werden.

Die Genauigkeit des Siebverfahrens ist von der eingebrachten Materialmenge, der Dauer und der Intensität des Siebvorganges abhängig. Daher ist es erforderlich, bei zu großen Materialmengen eine Teilung vorzunehmen, die nur mit einem Probenteiler ausgeführt werden darf, der in unterschiedlicher Form im Handel angeboten wird.

Es ist wichtig zu wissen, daß Tone, die bei höheren Temperaturen (ca. 100 °C) getrocknet werden, zu größeren Aggregaten zusammenklumpen und sich auch mit Ultraschallgeräten oder  $H_2O_2$  nur unvollständig wieder dispergieren lassen. Wenn vor einer Trockensiebung die feinen Fraktionen nicht abgetrennt wurden, dann sollte die Trocknung unterhalb von 40 °C erfolgen.

**Sedimentierverfahren:** Es dient der Klassifizierung der Korngrößenverteilung nach hydraulischen Eigenschaften durch Bestimmung der Sinkgeschwindigkeit der Teilchen in einer Suspension. Früher wurde dieses Verfahren nur für die Ton- und Silt- (Schluff-)Fraktionen unterhalb 0,063 mm Korndurchmesser angewandt. Seit Ende der 60er Jahre werden große **Sedimentfallrohre** von zum Teil 3 m Länge verwendet, die für die Sandanalyse ebenfalls geeignet sind.

Am weitesten verbreitet ist das **Pipette-Verfahren**, das nur geringen Zeitaufwand und keine teuren Geräte erfordert (REINECK, 1967). Die **Atterberg-Methode** ist sehr zeitraubend und nur zu empfehlen, wenn Material bestimmter Korngrößen für weitere Analysen benötigt wird. Bei der **Sedimentationswaage** lagert sich, wie beim Sedimentfallrohr, das abgesunkene Sedimentmaterial auf einer Waagschale ab und wird kontinuierlich gewogen.

Am unkompliziertesten und am billigsten ist die **Aräometermethode**, bei der die Dichte der Suspension an einem eingetauchten Aräometer (Hydrometer) abgelesen wird. Der Analysenfehler ist dabei zwar relativ groß (bis  $\pm 3\%$ ), bleibt aber i. allg. innerhalb der ohnehin vorhandenen Heterogenität der anstehenden Sedimente. Außerdem wirkt sich die Art der Probenaufbereitung zur Vermeidung der Koagulation von Tonpartikeln häufig stärker auf die Ergebnisse aus als die verfahrensbedingten Unterschiede.

Andere Methoden zur Korngrößenanalyse sind Luftstrahlsiebung, Messung der optischen Dichte von Suspensionen (photometrische Methode), „Coulter-principle“ etc. Sie werden im Küsteningenieurwesen selten angewandt und brauchen hier nicht näher erläutert zu werden.

## 5.6.2 Auswertung und Darstellung von Korngrößenanalysen

Die Meßergebnisse der granulometrischen Analyse gestatten die Konstruktion graphischer Darstellungen, mit deren Hilfe Korngemische beschrieben und charakteristische Kenndaten bestimmt werden können (WALGER, 1964). Die einfachste Form ist das Histogramm, gelegentlich auch als Stufendiagramm bezeichnet, das in eine glatte Häufigkeitskurve umgewandelt werden kann. Die Korngrößen sind auf der Abszisse logarithmisch aufgetragen; die in den einzelnen Fraktionen gefundenen Mengen werden auf der Ordinate in Massenprozenten angegeben. In den meisten Fällen werden die Ergebnisse der Korngrößenanalyse in Form einer Summenkurve dargestellt, der Integralfunktion der Häufigkeitskurve. An der Summen-

kurve sind auch die Parameter definiert, die zur Kennzeichnung von Korngrößenverteilungen verwendet werden:

**Median-Wert** (oder  $D_{50}$ ) = Korngröße, bei der die Summenkurve die 50%-Linie schneidet (gelegentlich auch  $Q_2$ -Wert genannt).

**Quartil-Werte** = Korngröße, bei der die Summenkurve die 25%-Linie ( $Q_1$ ) bzw. die 75%-Linie ( $Q_3$ ) schneidet.

**Sortierungsgrad**  $S_o = Q_3/Q_1$  (ausnahmsweise werden auch zur Berechnung des Sortierungsgrades die Percentilwerte herangezogen).

$$\text{Schiefekoeffizient } S_k = \frac{Q_1 \cdot Q_3}{(Md)^2}$$

Gelegentlich erweist es sich als zweckmäßig, anstelle der logarithmischen Einteilung des Korngrößenmaßstabes auf der Abszisse eine ganzzahlige Skala zu verwenden, bei der die Analysenergebnisse ohne weiteres auf normalem Millimeterpapier darzustellen sind. Diese Möglichkeit bieten die Phi-Grad( $\Phi^\circ$ )- und die Zeta-Grad( $\zeta^\circ$ )-Einteilungen, die wie folgt errechnet werden (WALGER, 1964):

$$\Phi = -\log_2 \frac{x \text{ [mm]}}{1 \text{ [mm]}} = -\frac{1}{\lg 2} \lg \frac{x \text{ [mm]}}{1 \text{ [mm]}}, x_0 = 1 \text{ mm}$$

$$\zeta = -\lg \frac{x \text{ [mm]}}{2 \text{ [mm]}}, x_0 = 2 \text{ mm}$$

$x_0$  ist der nach Zweckmäßigkeits-Gesichtspunkten zu wählende Wert der Korngröße am Koordinatenursprung.

Der negative Logarithmus bewirkt, daß die Phi- bzw. Zeta-Werte bei abnehmendem Korndurchmesser größer werden, während sie im Kiesbereich sogar negativ sind. Das mag dazu beigetragen haben, daß sich diese Einteilungen in Deutschland bisher noch nicht durchgesetzt haben, wie das z. B. in den USA der Fall ist. Für eine Umrechnung stehen Tabellen bzw. Nomogramme auf halblogarithmischem Papier zur Verfügung.

### 5.6.3 Darstellung von Sedimenttypen

Geologische Karten werden nach unterschiedlichen Gesichtspunkten aufgebaut. Meist informieren sie über das Alter der anstehenden Gesteine, seltener über deren Genese. Einige Seegrundkarten sind ähnlich angelegt, besonders wenn sie die Fortsetzung terrestrischer Strukturen in das marine Milieu dokumentieren sollen. Bei Seegrundkarten aus dem Küstenbereich kann man jedoch im allgemeinen Gleichaltrigkeit der Ablagerungen und im Prinzip vergleichbare Entstehungsbedingungen voraussetzen. Ihr Inhalt sollte sich daher auf die Wiedergabe solcher Sedimenteigenschaften beschränken, die bestimmte Modifizierungen innerhalb des – insgesamt gesehen – einheitlichen Bildes charakterisieren. An der deutschen Nordseeküste finden sich z. B. fast nur klastische Sedimente, die häufigen Aufarbeitungs- und Wiederablagerungsbedingungen unterliegen und deren Hauptunterscheidungsmerkmal die Korngröße ist, die eine verschieden starke Beeinflussung des Meeresbodens in Wechselwirkung zu hydraulisch/morphologischen Gegebenheiten kennzeichnet.

In der Vergangenheit war es üblich, Korngrößenverteilungen nur qualitativ zu beschreiben wie etwa: feinsandiger Mittelsand, schluffhaltig. Die eingangs (5.1) gegebene Tabelle mit den uneinheitlichen Einteilungsschemen und die Tatsache, daß Korngemische nur durch

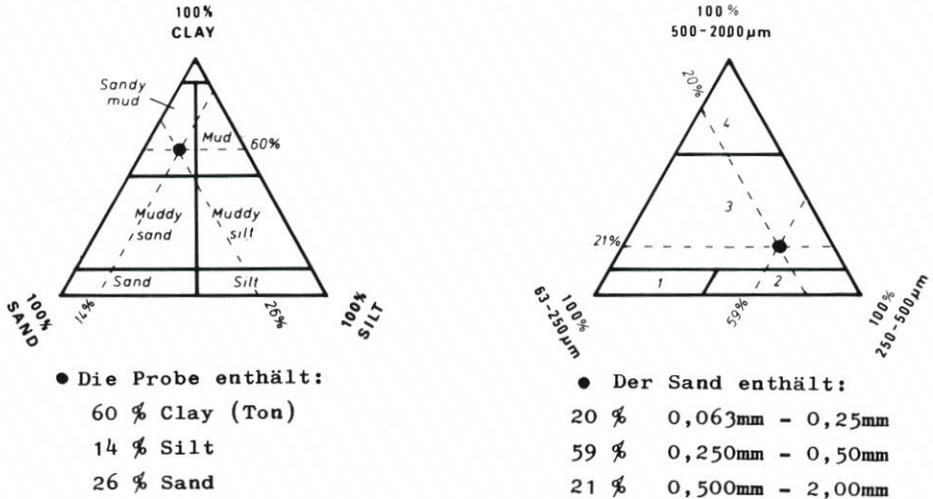


Abb. 5.6: Beispiele von Definitionen klastischer Sedimente nach Dreieckskoordinaten links: Beim „leg 66“ des Deep Sea Drilling Projektes“ der „Glomar Challenger“ benutzte Klassifikation; rechts: Beim Deutschen Hydrographischen Institut benutzte Einteilung der Sandfraktion in 4 Typen mit Angabe der Korngrößen Grenzen

Kurven unterschiedlicher Form und Lage im Koordinatennetz beschrieben werden können, lassen deutlich werden, daß eine solche Beschreibung nur sehr unbefriedigend sein kann. Eine kleine Verbesserung bedeutet es schon, wenn die Verteilung der Medianwerte auskartiert wird, obwohl auch damit keine eindeutige Aussage über das Sediment möglich ist.

In der letzten Zeit geht der Trend dahin, die Zusammensetzung klastischer Lockersedimente auf Dreieckskoordinatenpapier graphisch einzutragen und einzelne Felder innerhalb des Dreiecks bestimmten Sandtypen zuzuordnen, so daß Korngemische erfaßt werden (Abb. 5.6).

## 6. Meßgeräte im wasserbaulichen Versuchswesen

### 6.1 Einleitung

Im Zusammenhang mit der Planung wasserbaulicher Vorhaben sind auch die Auswirkungen von Bauwerken auf Tide und Seegang und dadurch ausgelöste Transportprozesse (Sedimente, Schadstoffe, Wärme usw.) zu prognostizieren. Darüber hinaus sind diese Bauwerke gegen die Wirkung hydrodynamischer Kräfte (z. B. Wellen) zu bemessen.

Während sich im rein konstruktiven Bereich die verschiedenen Möglichkeiten zur Ausführung eines Bauwerkes mit den Hilfsmitteln der Statik verhältnismäßig exakt berechnen lassen, unterliegen hydrodynamische Vorgänge trotz weitreichender Kenntnis der physikalischen Zusammenhänge gewissen Unwägbarkeiten, die eine genaue Vorausberechnung erschweren oder unmöglich machen. Der Ingenieur benutzt in solchen Fällen die Entscheidungshilfe „Modelle“, die es ihm gestatten, mit im Vergleich zum Bauaufwand geringen Kosten sowohl verschiedene denkbare Bauwerke zu untersuchen, als auch die Auswirkungen der Bauwerke auf hydrologisch/morphologische Vorgänge beurteilen zu können. Derartige

Modelle sind vereinfachte Vorstellungen natürlicher Vorgänge und Abläufe, die sich mit Hilfe physikalischer und mathematischer Gesetze entwickeln lassen und einen wechselseitigen Austausch der mit ihnen gewonnenen Erkenntnisse mit der Natur gestatten.

Der physikalische Modellversuch dient seit Jahrzehnten als Entscheidungshilfe zur Lösung wasserbaulicher Aufgaben. Er ist die verkleinerte Darstellung eines natürlichen Vorgangs. Voraussetzung für den erfolgreichen prognostischen Betrieb eines Modells ist die „Naturähnlichkeit“, d. h. die nach dem entsprechenden Modellgesetz notwendige Übereinstimmung bekannter Naturmeßdaten mit den Werten im Modell. Daraus folgt zwangsläufig die Unverzichtbarkeit auf möglichst umfassende Naturmessungen. Eine weitere wichtige Voraussetzung für die erfolgreiche Benutzung eines Modells ist die richtige Festlegung der Modellgrenzen und die Kenntnis der Modellrandbedingungen.

Meßverfahren und Meßgeräte im wasserbaulichen Versuchswesen unterscheiden sich in den wesentlichen Prinzipien kaum von denjenigen, die in der Natur benutzt werden. Da jedoch der im Wasserbau planende oder bauende Ingenieur häufig in die Lage versetzt wird, Messungen aus der Natur mit solchen aus Modellen wechselseitig vergleichen zu müssen, sind die gegenseitigen Kenntnisse der Verfahren und Geräte sowie die Beurteilung der Genauigkeiten von wesentlicher Bedeutung.

## 6.2 Grundsätzliche Bemerkungen zu hydraulischen Modellen

### 6.2.1 Allgemeines

Entsprechend der Thematik des AVMK beschränkt sich der folgende kurze Abriss über die Problematik hydraulischer Modelle auf Fragestellungen aus dem Bereich des Küsteningenieurwesens. Die hier wesentlichen hydrodynamischen Prozesse und deren Sekundärerscheinungen sind Tide und Seegang. Beide Vorgänge lassen sich in hydraulischen Modellen simulieren. Obwohl die Vielfalt der Anwendungsmöglichkeiten und auch der praktischen Bedürfnisse verschiedene Modelltypen verlangt, werden hier nur Modelle mit fester oder beweglicher Sohle behandelt. Im übrigen wird auf die Fachliteratur verwiesen.

### 6.2.2 Modelle mit fester Sohle

Da in hydraulischen Modellen des Seewasserbaues allgemein Strömungen unter Schwerkrafteinfluß behandelt werden (freie Oberfläche), muß neben der geometrischen Ähnlichkeit die FROUDE-Zahl in Modell und Natur gleich groß sein. Das Modellgesetz von FROUDE lautet

$$Fr_r = \frac{v_r}{\sqrt{g_r L_r}} = 1$$

Darin bedeuten  $v_r$ ,  $L_r$  und  $g_r$  die Relativgrößen (Naturgröße/Modellgröße) für die Fließgeschwindigkeit, die Längen und die Erdbeschleunigung. Unter der Voraussetzung, daß  $g$  in Modell und Natur gleich groß ist, also  $g_r = 1$ , ergeben sich die in der folgenden Tabelle zusammengestellten Übertragungsregeln für wichtige Modellgrößen in nicht überhöhten und überhöhten Modellen (Tab. 6.1).

In der Tabelle wird auch angegeben, welche Gründe für eine Modellüberhöhung ( $n$ ) maßgebend sein können. Bei den Tidegroßmodellen ist selbstverständlich der Platzbedarf von

Tabelle 6.1  
Maßstabszahlen für überhöhte und nicht überhöhte Flußmodelle (FROUDESche Ähnlichkeit)

	kinematische oder dynamische Bedingung	Ableitung der Maßstabszahl	überhöhtes Modell $n > 1$	nicht überhöhtes Modell $n = 1$	*)
Geschwindigkeiten			$v_r = \sqrt{\frac{L_r}{n}}$	$v_r = \sqrt{L_r}$	1)
Zeiten	$t = \frac{L}{v}$	$t_r = \frac{L_r}{v_r}$	$t_r = (L_r \cdot n)^{1/2}$	$t_r = L_r^{1/2}$	2)
Beschleunigungen	$b = \frac{v}{t}$	$b_r = \frac{v_r}{t_r} = \frac{v_r^2}{L_r}$	$b_r = \frac{1}{n}$	$b_r = 1$	
Gefälle	$I = \frac{h}{L}$	$I_r = \frac{h_r}{L_r} = \frac{L_r}{n \cdot L_r} = \frac{1}{n}$	$I_r = \frac{1}{n}$	$I_r = 1$	
Reynoldszahlen	$Re = \frac{v \cdot h}{\nu}$	$Re_r = v_r \cdot h_r = v_r \cdot \frac{L_r}{n}$	$Re_r = \left(\frac{L_r}{n}\right)^{3/2}$	$Re_r = L_r^{3/2}$	3)
Kräfte	$F = m \cdot b$	$F_r = m_r \cdot b_r = \frac{L_r^3}{n} \cdot \frac{v_r^2}{L_r} = v_r^2 \cdot \frac{L_r^2}{n}$	$F_r = \frac{L_r^3}{n^2}$	$F_r = L_r^3$	
Drücke (Geschwindigkeitshöhen)	$p = \frac{F}{A}$	$p_r = \frac{F_r}{A_r} = v_r^2 \cdot \frac{L_r^2}{n} \cdot \frac{n}{L_r^2} = v_r^2$	$p_r = \frac{L_r}{n}$	$p_r = L_r$	4)
Durchfluß <sup>+) </sup>	$Q = v \cdot A$	$Q_r = v_r \cdot A_r = v_r \cdot \frac{L_r^2}{n}$	$Q_r = \frac{L_r^{5/2}}{n^{3/2}}$	$Q_r = L_r^{5/2}$	5)

<sup>+)</sup>   $q_r = Re_r$  (Durchfluß je Breitereinheit)

\*) Gründe für die Modellüberhöhung:

Bei  $L_r (n > 1) = L_r (n = 1)$  gilt:

- 1) Höhere Fließgeschwindigkeit im Modell (Turbulenz)
- 2) Verkürzung der Versuchszeiten
- 3) Höhere Reynoldszahlen im Modell (bessere Ähnlichkeit)
- 4) Verbesserung der relativen Meßgenauigkeit
- 5) Verringerung des Einflusses von Wasserverlusten im Modell

wesentlicher Bedeutung, wenn der Zwang besteht, ein vollständiges Ästuar (See-Tidegrenze) im Modell nachzubilden und noch mit hinreichender Genauigkeit die Wasserspiegellagen zu messen.

Für Aufgabenstellungen, bei denen die Auswirkung eines Bauvorhabens auf das gesamte Ästuar beurteilt werden soll, ist die Verfälschung der Randstrombereiche durch die Überhöhung vernachlässigbar. Wenn jedoch Bauwerke untersucht werden sollen, die nur das örtliche Geschwindigkeitsfeld beeinflussen, ist es im allgemeinen nicht zulässig, unterschiedliche Horizontal- und Vertikalmodellzahlen zu benutzen. Es müssen dann Ausschnitte aus dem Tidestrom dargestellt werden. In den großflächigen überhöhten oder nicht überhöhten

Tidemodellen mit fester Sohle werden allgemein Strömungsfelder und Wasserspiegellagen gemessen.

Ein weiteres Anwendungsgebiet des hydraulischen Modellwesens ist die Untersuchung von Ausbreitungsvorgängen, die gerade im Tidegebiet durch die rhythmische Umkehr der Strömungsrichtungen kompliziert werden. Die Meßprobleme erweitern sich jetzt auf Temperaturmessungen und Konzentrationsbestimmungen konservativer Tracer.

Für hydraulische Seegangmodelle können Untersuchungen in Flächenmodellen und in zweidimensionalen Ausschnittmodellen vorgenommen werden. Die letzteren werden meist in Wellenkanälen ausgeführt. Bei Wellenuntersuchungen überwiegen Schwere- und Trägheitskräfte, d. h., die Voraussetzungen für die Benutzung des Ähnlichkeitsgesetzes von FROUDE sind allgemein gegeben, wobei jedoch auf die Schwierigkeiten bei der Erfassung brechender Wellen hinzuweisen ist. Modelle mit fester Sohle dürfen nicht überhöht werden, wenn der Wellenvorgang dynamisch ähnlich verlaufen soll. Gemessen werden im allgemeinen die zeitabhängigen Wasserspiegelschwankungen, Orbitalgeschwindigkeiten sowie Drücke und Kräfte.

### 6.2.3 Modelle mit beweglicher Sohle

Für die Herstellung von Modellen zur Untersuchung von Problemen des Feststofftransportes ist zunächst zu klären, welche gegenseitige Beeinflussung des transportierten und des transportierenden Mediums von Bedeutung ist. Es muß hier genügen festzustellen, daß dieses Problem außerordentlich komplex ist und sich bis heute einer allgemeinen Lösung entzieht. Es liegt eine Vielzahl von Untersuchungen vor, die sich experimenteller und theoretischer Methoden bedienen. Dabei wurde festgestellt, daß die Transportphänomene wesentlich von zwei dimensionslosen Größen abhängig sind:

$$Re_* = \frac{v_* \cdot d}{\nu_w} \quad \text{REYNOLDS-Kornzahl}$$

$$Fr_* = \frac{v_*^2}{\rho' w \cdot g \cdot d} \quad \text{FROUDE-Kornzahl}$$

Dabei ist  $v_* = \sqrt{g \cdot h \cdot I}$  (Schubspannungsgeschwindigkeit)

Für die naturähnliche Nachbildung der Feststoffbewegung im Modell ist nun die Übereinstimmung der Werte  $Re_*$  und  $Fr_*$  in Natur und Modell erforderlich. Die Einhaltung der Ähnlichkeit nach FROUDE für die hydrodynamischen Vorgänge wird dabei vorausgesetzt. Die zusätzlich erforderlichen Maßstabsbeziehungen können durch Gleichsetzen der Zahlen  $Re_*$  und  $Fr_*$  in Natur und Modell abgeleitet werden. Es ergibt sich dann eine Beziehung zwischen den Maßstabszahlen für die vertikalen und horizontalen Abmessungen

$$h_r = L_r^{0,7}$$

sowie eine Beziehung zwischen den Maßstabszahlen für den Korndurchmesser und der Dichte des Modellmaterials

$$d_r = \Delta \rho_r^{-1/3}$$

wobei  $\Delta \rho_r$  der Dichteunterschied zwischen Sohlmaterial und Wasser ist. Beide Beziehungen sind in Abb. 6.1 dargestellt.

Ganz allgemein ist bei Benutzung eines Modellmaterials mit einer vom Naturmaterial abweichenden Dichte eine Überhöhung des Modells unerlässlich. Bis zu Überhöhungen  $n > 5$

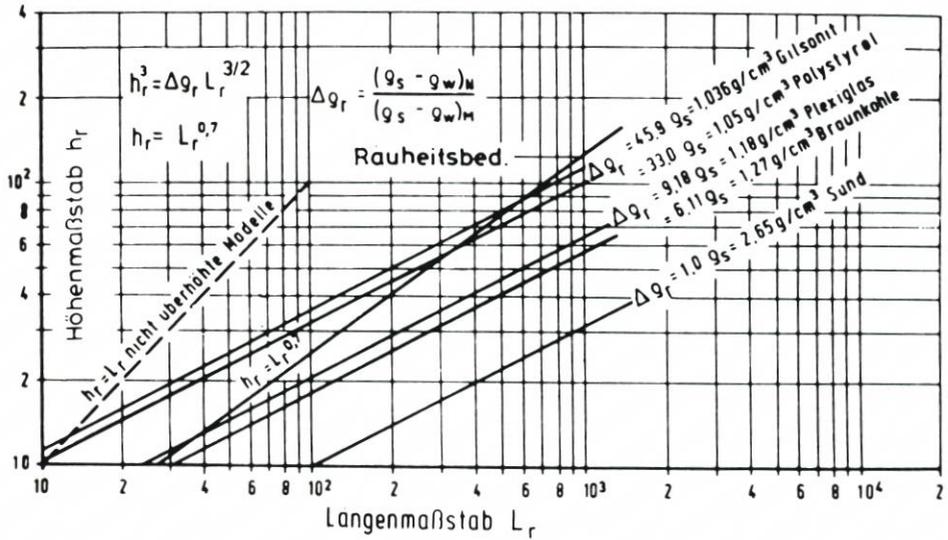


Abb. 6.1: Maßstabsbeziehung für Feststoffmodelle mit Berücksichtigung der Rauheitsbedingung

bereitet die Einhaltung der hydraulischen Ähnlichkeit nach FROUDE keine Schwierigkeit. Bei Überhöhungen  $n \leq 5$  sind jedoch besondere Überlegungen und Eingriffe notwendig, die u. a. ein Abweichen von der FROUDE-Ähnlichkeit einschließen.

Die hier gegebenen Beziehungen gelten in ähnlicher Form auch für die Untersuchung von Transportprozessen in Wellenmodellen. Es wird hier ebenso auf die exakte Darstellung der dynamischen Ähnlichkeit einer Welle verzichtet und die Nachbildung des Wellenklimas in seiner integralen Wirkung vollzogen, um primär die Änderung morphologischer Vorgänge erfassen zu können. Die Überhöhung bei Wellenmodellen mit beweglicher Sohle sollten wegen großer Unsicherheiten gering gehalten werden.

Neben den hydraulischen Daten wird in Modellen mit beweglicher Sohle die Veränderung der Sohle gemessen, aus welcher dann Rückschlüsse auf die Transportraten gezogen werden können. Daneben ist die direkte Messung des Transportweges mit Hilfe von Leitstoffen möglich.

### 6.3 Meßverfahren und Meßgeräte

#### 6.3.1 Allgemeines

Es liegt in der Natur eines wasserbaulichen Modellversuchs, daß eine Reihe von Problemen entfällt, die bei der Aufnahme von Meßgrößen in der Natur auftritt. So ist z. B. bei nicht ortsfesten Messungen (Schwimmer) eine zeitabhängige Ortsbestimmung in einem Modell ohne Schwierigkeiten möglich. Die gerade für das Tidegebiet außerordentlich wichtige Forderung nach synchronen Messungen, die den aufwendigen Einsatz einer Vielzahl von Meßgeräten erfordert, ist im Versuchswesen von untergeordneter Bedeutung, da sich die hydraulischen Vorgänge beliebig oft reproduzieren lassen. In einem Ästuarmodell lassen sich z. B. an jedem Punkt die dort auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten vollständig ermitteln. Ein derartiges Vorhaben ist in der Natur wegen des sich ständig ändernden Tideablaufes nur schwer zu verwirklichen.

Andererseits haben Modellmessungen teilweise einen integrierenden Charakter, da sich die Abmessungen mancher Meßgeräte zwangsläufig in einem Mißverhältnis zu den durch die großen Maßstabszahlen verursachten kleinen Modellabmessungen befinden. Wenn ein Meßflügel z. B. einen Durchmesser von 2 cm hat, so bedeutet das bei einer Vertikalmaßstabszahl von  $h_r = 100$  einen Naturdurchmesser von 2 m. Wenn nun die Horizontalmaßstabszahl  $L_r = 500$  beträgt, hat die durch den Flügel beschriebene Ellipse immerhin eine horizontale Achse von 10 m.

Die Kenntnis der unterschiedlichen Meßmöglichkeiten in der Natur und im Modell ist gerade für die Herstellung der Naturähnlichkeit eine entscheidende Voraussetzung, da durch Vergleiche die Qualität des erreichten Zustandes zu beurteilen ist. Die nachfolgend beschriebenen Geräte und Verfahren können selbstverständlich nicht alle im wasserbaulichen Versuchswesen benutzten Meßeinrichtungen abdecken, was darauf zurückzuführen ist, daß jede Versuchsanstalt für spezielle Probleme Meßgeräte und -verfahren entwickelt hat, die dann in kleinen Stückzahlen für den eigenen Bedarf angefertigt worden sind. In den letzten Jahren haben allerdings einige größere Laboratorien und Firmen die von ihnen entwickelten Geräte serienmäßig hergestellt und auf den Markt gebracht. Die Anpassung dieser Geräte an unterschiedliche Meßwerterfassungssysteme ist aber auch dann noch erforderlich. Die Registrierung der Meßwerte wird daher bei der Beschreibung der Einzelgeräte nicht näher behandelt.

Es ist hier nur grundsätzlich darauf hinzuweisen, daß sowohl eine analoge als auch eine digitale Aufzeichnung der Meßwerte möglich ist. Die Wahl des einen oder anderen Systems wird von der gewünschten Weiterverarbeitung der Meßwerte bestimmt. Es werden hierfür handelsübliche Geräte wie z. B. Punktdrucker, Linienschreiber, Magnetbänder, Lochstreifen u. ä. verwendet.

### 6.3.2 Wasserstand

Die Messung der Wasserstände bei stationären bzw. quasistationären Strömungsvorgängen ist verhältnismäßig einfach und erfolgt mit von Hand verstellbaren Spitzentastern, deren Berührung mit dem Wasserspiegel entweder visuell oder elektrisch kontrolliert wird. Der Wasserstand läßt sich über einen Nonius ablesen (Abb. 6.2).

Bei den nichtstationären Vorgängen in Tidemodellen ist die kontinuierliche Aufnahme und Registrierung der Wasserspiegellagen (wie in der Natur) erforderlich. Die einfachsten Geräte sind Schwimmerpegel, die im Modell fest oder beweglich angeordnet werden und die Veränderung des Wasserspiegels direkt auf einem wachsbeschichteten Bogen aufzeichnen, der auf einen durch einen Motor angetriebenen Zylinder aufgespannt wird (Abb. 6.3).

Die Festlegung eines Höhenbezugspunktes bei diesen Pegeln ist wegen der gleichzeitig erforderlichen zeitlichen Zuordnung außerordentlich umständlich. Während eines Untersuchungszyklus wird der Wasserstand unmittelbar am Pegel mit Hilfe eines mobilen Spitzentasters (s. o.) zu einem bestimmten Zeitpunkt gemessen, wobei simultan eine Markierung auf dem Pegelschrieb und auf allen anderen Pegeln erfolgt. Der Höhenbezug für den Spitzentaster erfolgt über einen am Pegel im Modell befindlichen Festpunkt.

Wegen der vom Zylinderdurchmesser abhängigen geringen Schreiblänge des Pegelbogens kann nur eine geringe Zahl von Tiden registriert werden. Ein häufiges Auswechseln der Pegelbögen ist unvermeidlich, wenn die Pegel nicht für eine Fernübertragung der Signale und analoge oder digitale Datenspeicherung ausgerüstet sind.

Die Meßgenauigkeit der Pegel ist bei direkter Registrierung nicht befriedigend. Im

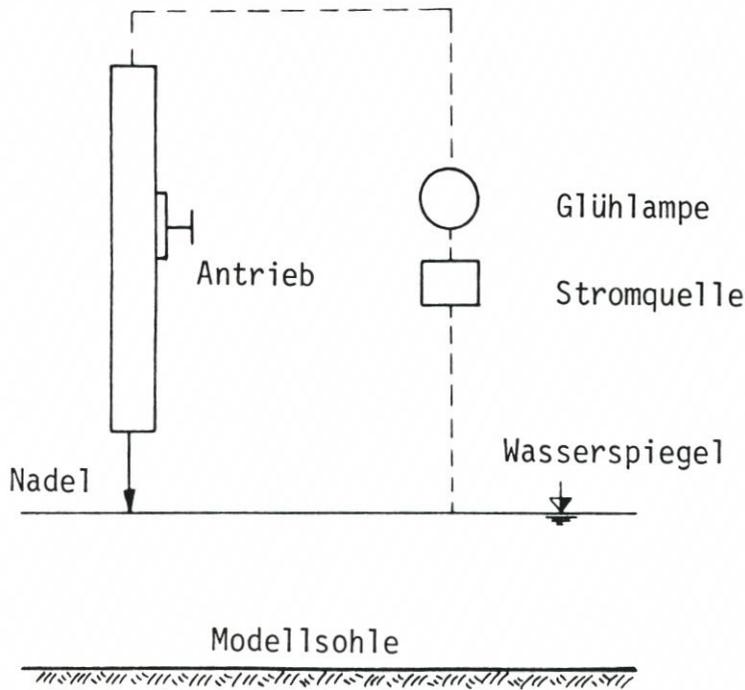


Abb. 6.2: Spitzentaster

übrigen kann durch die großen Abmessungen des Schwimmers (10 cm Schwimmerdurchmesser entsprechen bei  $L_r = 500\ 50\text{ m}$  in der Natur!) das örtliche Geschwindigkeitsfeld beeinflusst werden, was bei Modellen mit beweglicher Sohle zu deren Verformungen führt. Dieser Nachteil kann allerdings durch die Verlegung des Pegels in einen seitlich vom Modell befindlichen Schwimmerschacht vermieden werden.

Zur kontinuierlichen Messung von Wasserständen eignen sich Geräte, die den Fließvorgang möglichst wenig stören. In den Laboratorien werden heute hierzu vielfach *vibrierende Spitzentaster* (Abb. 6.4) mit Fernübertragung benutzt. Die Funktionsweise dieser Geräte beruht auf folgendem System (Chatou, Bauart Delft): Ein Schwinger mit einer Drahtspitze wird mit 50 Hz bewegt. Solange die Nadel in das Wasser taucht, fließt ein Strom. Das Gerät ist derart ausgelegt, daß bei ausgeglichener Ein- und Austauschphase ein Gleichgewichtszustand herrscht. Wenn sich nun der Wasserspiegel ändert, wird dieses Gleichgewicht gestört. Durch ein Nachfahrssystem (Motor und Potentiometer) wird der Schwinger wieder in eine Position gebracht, in der ein ausgeglichenes Ein- und Austauschen der Nadel erfolgt. Die Meßgenauigkeit vibrierender Taster liegt bei  $\pm 0,1\text{ mm}$ , wobei Wasserspiegeländerungen von maximal  $1\text{ cm/s}$  möglich sind.

Schnelle Wasserspiegeländerungen ( $> 1\text{ cm/s}$ ), wie sie beim Durchlauf von Wellen auftreten, werden mit sog. Wellenpegeln gemessen. Ganz einfache Wellenpegel arbeiten auf der Basis der mechanischen Übertragung der Wellenbewegung mit Hilfe möglichst trägheitsarmer Schwimmer (Tischtennisbälle) und direkter Registrierung. Meist werden jedoch elektrische Verfahren benutzt. Ein gebräuchliches Prinzip ist die *Widerstandsmessung*. Dazu werden zwei Meßfühler verwendet, die je nach Wellenhöhe unterschiedlich in das

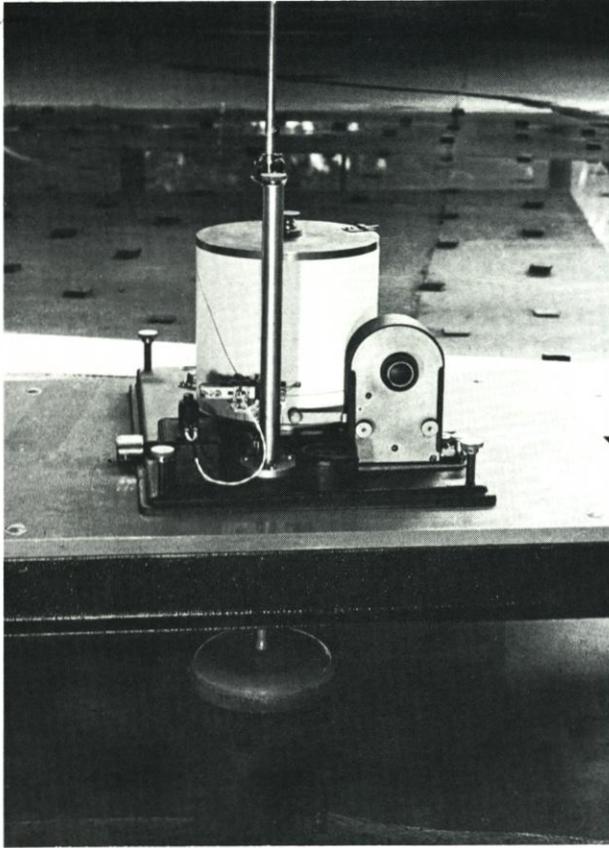


Abb. 6.3: Schwimmerpegel

Wasser eintauchen (Abb. 6.5). Bei neueren Geräten ist die Problematik veränderlicher Wassertemperatur oder -dichte durch geeignete elektronische Bauteile gelöst worden. Im Versuchswesen werden kapazitative Verfahren ebenfalls angewendet.

### 6.3.3 Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen

Die Meßprinzipien für Geschwindigkeit und Richtung der Strömung sind im Versuchswesen grundsätzlich den Naturmeßverfahren ähnlich.

Mit Hilfe von Schwimmkörpern ist das Strömungsfeld schnell zu überblicken. Wie in der Natur werden auch im Modell Oberflächen- und Tiefenschwimmer verwendet. Für die Visualisierung der Oberflächenströmung können beliebig geformte Papierschnitzel benutzt werden, deren Weg in einem bestimmten Bereich durch eine oder mehrere in geeigneter Höhe über dem Wasserspiegel angeordnete Kameras aufgenommen wird. Ablösungsbereiche und Kenterphasen lassen sich so sehr gut fixieren. Durch intermittierende Belichtung lassen sich aus der Länge des von dem Schwimmer durchlaufenden Weges die Geschwindigkeiten bestimmen. Die Strömungsrichtungen sind durch die Bilder vorgegeben,

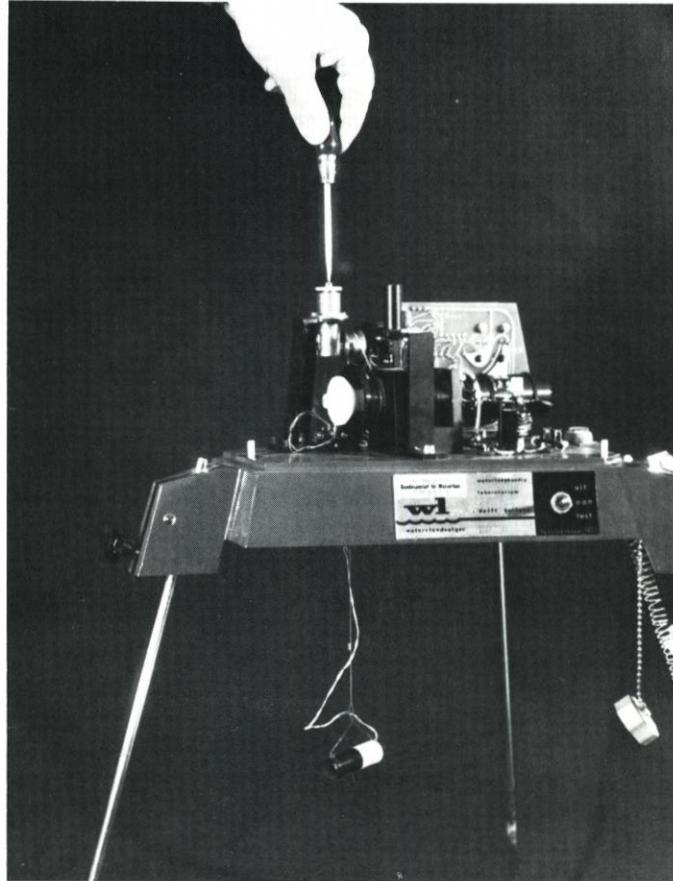


Abb. 6.4: Vibrierender Spitzentaster

können jedoch auf einfache Weise im Modell auch durch Farbmarkierung der Oberflächen- und Sohlströmung gemessen werden (z. B. Kaliumpermanganat).

Da sich gleiche Tiden beliebig oft nachbilden lassen, gestatten die Schwimmermessungen auch bei großflächigen Modellen die zwar aufwendige, aber sehr instruktive Herstellung eines „Strömungsatlases“ für gewünschte Phasen in einem Tideablauf.

Für das beschriebene Verfahren können auch Schwimmer benutzt werden, die verschieden tief in das Wasser eintauchen. Wird allerdings eine genauere Zeit/Weg-Zuordnung der einzelnen Schwimmer benötigt (z. B. Hafeneinfahrt), empfiehlt sich der Einsatz einer Film- oder Fernsehkamera, bei der sich später durch Einzelbildschaltung der Strömungsvorgang analysieren läßt.

Für die punktuelle Aufnahme von Strömungsgeschwindigkeiten werden meist Mikroflügel benutzt, deren Drehzahl gemessen wird. Die Impulse werden dabei durch Unterbrechung eines elektrischen Feldes ausgelöst und gezählt. Der angegebene Mittelwert ist dabei auf die wählbare Sammelzeit bezogen. Empfindliche Mikroflügel geben pro Umdrehung über 50 Impulse ab; die Anlaufgeschwindigkeiten liegen zwischen 2 und 3 cm/s.

Normalerweise werden Modellflügel richtungskonstant angeordnet und messen in beiden

Drehrichtungen. Das genügt bei parallelem Abfluß und rascher Kenterung. Für eine simultane Messung von Strömungsgeschwindigkeit und -richtung werden Geräte eingesetzt, die sich selbsttätig in Strömungsrichtung stellen. Der Richtungsaufnehmer besteht aus einer vom anströmenden Wasser bewegten Fahne, die zwei elektrische Fühler beeinflusst. Steht die Fahne im gleichen Abstand zu den Fühlern, so ist ein Servokreis in Ruhe, und an einem Potentiometer wird eine der Fahnenrichtung entsprechende Spannung abgegriffen. Wenn sich die Fahne dreht, wird das Gleichgewicht gestört, der Servokreis dreht die Fühler wieder in die Gleichgewichtsstellung. Der Propeller für die Geschwindigkeitsmessung ist mit dem Nachführsystem des Richtungsmessers mechanisch verbunden. (Abb. 6.6).

Ein einfaches Gerät zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten ist der Pendelströmungsmesser, der schon bei kleinen Geschwindigkeiten anspricht und in wählbaren Zeitabständen den momentanen (nicht gemittelten!) Wert mechanisch registriert. Es wird die Auslenkung einer eingetauchten und pendelnd aufgehängten Scheibe gemessen. Die quadratische Abhängigkeit des Widerstandes von der Fließgeschwindigkeit erfordert eine genaue Kalibrierung und erschwert die manuelle Auswertung (Abb. 6.7). Geschwindigkeitsmessungen mit Hilfe quasi starr angebrachter Scheiben und Messung der Auslenkung mit Dehnungsmeßstreifen werden ebenfalls ausgeführt.

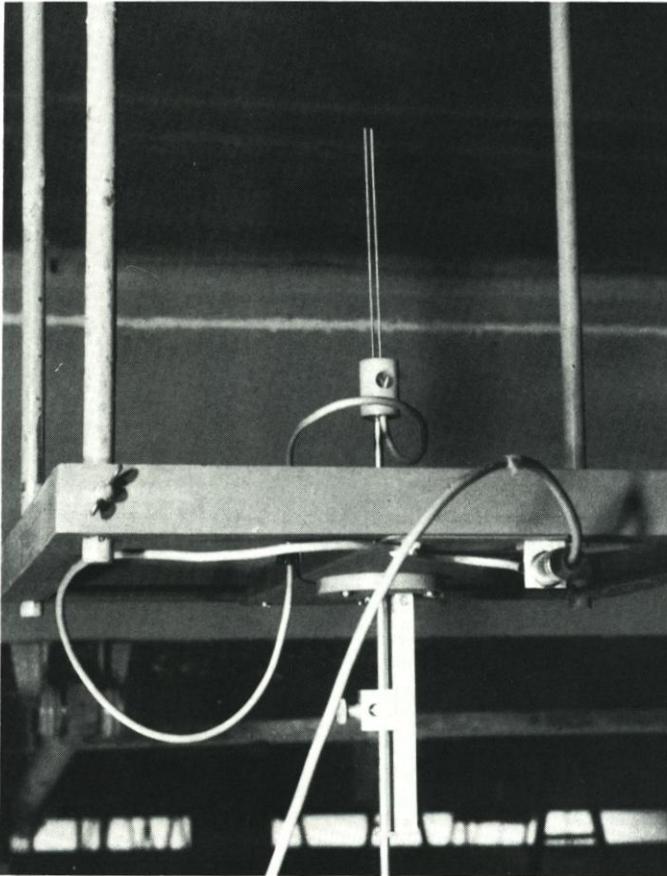


Abb. 6.5: Wellenpegel

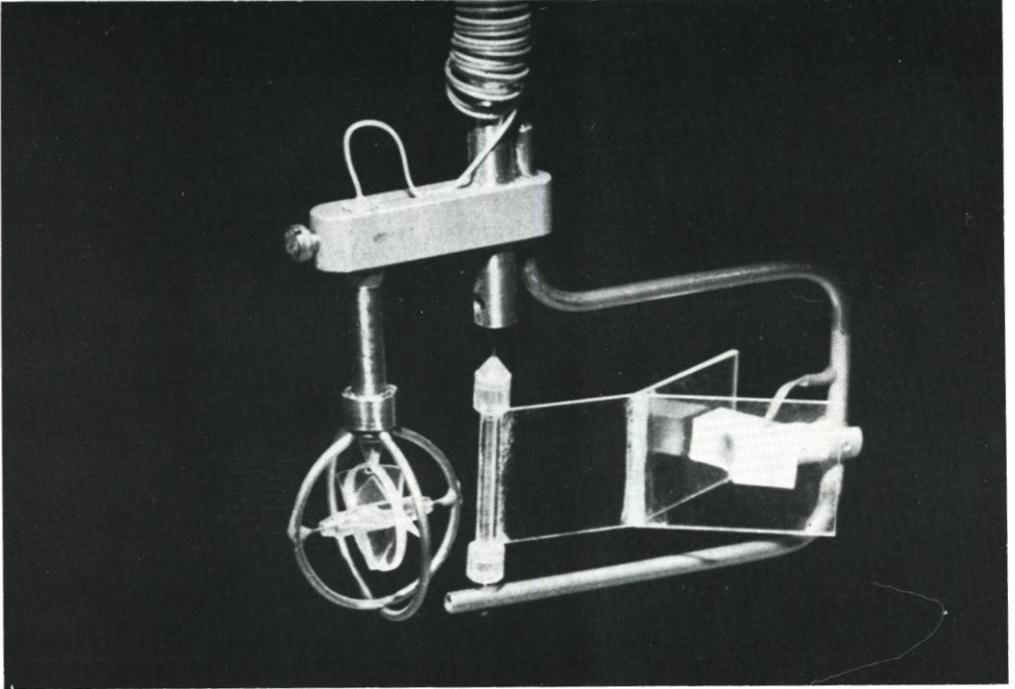


Abb. 6.6: Strömungs-/Richtungsmesser

Die zuletzt beschriebenen Meßverfahren, bei denen eine zeitliche Zuordnung der Kenterung möglich ist, gestatten dementsprechend auch die simultane Messung von Flut- und Ebbedauer. Ultraschallmeßverfahren sind in Modellen auch möglich, werden jedoch selten angewandt.

Die Messung von Orbitalgeschwindigkeiten ist mit mechanischen Gebern (z. B. Flügeln) wegen des richtungsabhängigen, instationären Charakters der Wellenbewegung problematisch. Besser geeignet sind elektronische Meßgeber wie Zwei-Komponenten-Strömungsmesser nach dem elektromagnetischen Prinzip. Für die Messung von Drücken und Kräften werden bei Wellenversuchen handelsübliche Druckmeßdosen und Dehnmeßstreifen verwandt.

Ein wichtiges Hilfsmittel für die Messung und Beurteilung wellenerzeugter Vorgänge sind photographische Aufnahmen zur Dokumentation und Messung der Orbitalbewegung in Wellenkanälen, zur Bestimmung der Wellenrichtung und Beurteilung der Wellenüberlagerung durch Diffraktions- und Reflexionseffekte (Interferenzen) oder zur Bestimmung von Zerstörungsgraden einer Wellenbrecher-Deckschicht durch Negativ-Positiv-Überlagerungsphotos.

#### 6.3.4 Morphologie

Von besonderer Bedeutung ist bei Modellen mit beweglicher Sohle die Aufnahme der Sohlveränderungen. Die klassische Methode besteht darin, nach Beendigung der Versuche den horizontalen Wasserspiegel schrittweise abzusenken und die Benetzungsgrenzen als Höhenlinien zu markieren (Wasserlinienverfahren). Die Sohlumbildung kann dann aus photographi-

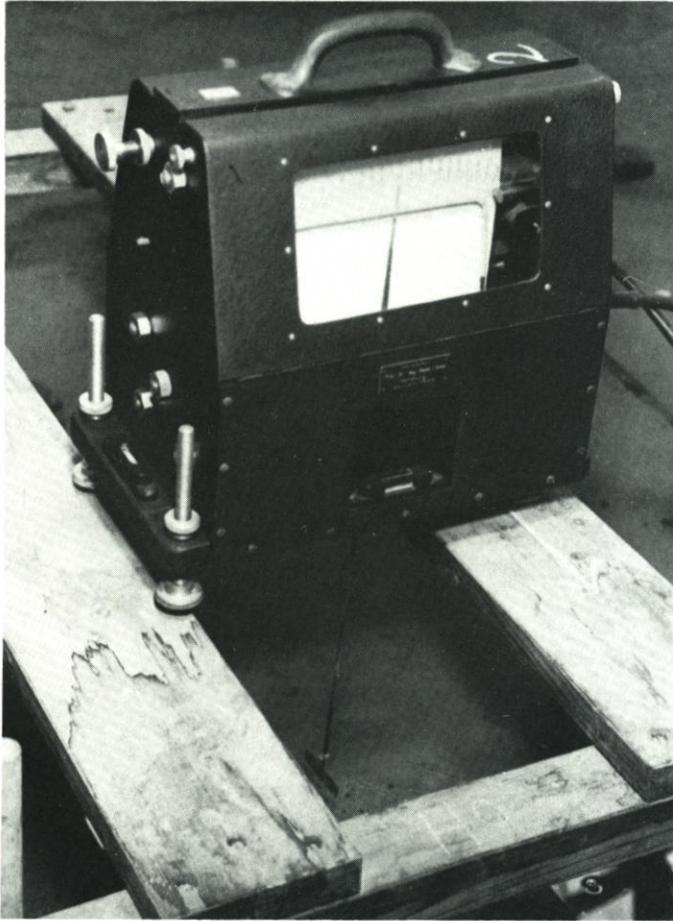


Abb. 6.7: Pendelströmungsmesser mit Registrierung

schen Aufnahmen ausgewertet werden. Die Genauigkeit dieses Verfahrens hängt vom Abstand der Höhenlinien und der Phototechnik ab und läßt sich somit beliebig variieren. Große Modellflächen erfordern allerdings einen erheblichen Zeitaufwand. Außerdem ist die Standfestigkeit der Böschungen von leichten Modellmaterialien (Kunststoffe) nach dem Trockenfallen nicht sehr groß.

Die Aufnahme der Sohle sollte daher unter Wasser erfolgen. Dafür gibt es akustische, elektrische und optische Verfahren. Infolge der geringen Wassertiefe im Modell können akustische Geräte nur begrenzt eingesetzt werden; elektrische und optische Meßverfahren lassen sich hingegen gleichermaßen gut verwenden. Das optische Verfahren bietet zusätzliche Vorteile, wenn Modellsohlmaterial und feste Modellsohle in einem Querschnitt gleichzeitig vorhanden sind. Beim optischen Verfahren wird ein Lichtstrahl senkrecht zum Wasserspiegel auf die Sohle gelenkt. Der von der Sohle reflektierte Strahl trifft über ein Linsensystem, eine rotierende Abtastscheibe mit veränderlichem Hell/Dunkel-Bereich auf einen Photoaufnehmer. Hier werden die Lichtsignale wieder in elektrische Signale umgewandelt und aufgezeichnet (Abb. 6.8).

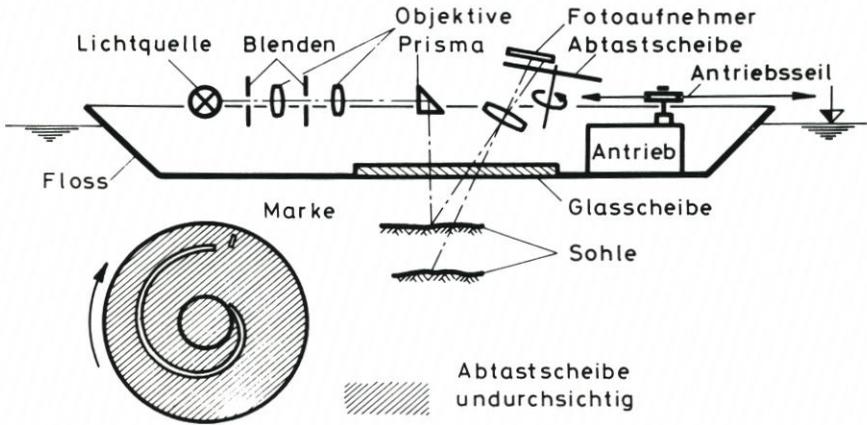


Abb. 6.8: Optischer Sohlabtaster (Prinzip)

Bei der elektrischen Sohlabtastung wird die Veränderung eines elektrischen Feldes bei der Annäherung an eine isolierende Schicht als Meßprinzip benutzt. Am Ende einer Führungsstange befindet sich eine Plattenelektrode. Derartige Geräte haben eine vertikale Verstellgeschwindigkeit bis zu 50 cm/s (Abb. 6.9).

Die Genauigkeit der Abtastsysteme liegt im Bereich  $\pm 1$  bis 1,5 mm, d. h. bei einer Vertikalmaßstabszahl  $h_r = 100 \pm 10$  bis 15 cm.

Die Auswertung der optisch oder elektrisch gemessenen Sohlprofile kann über Prozeß-

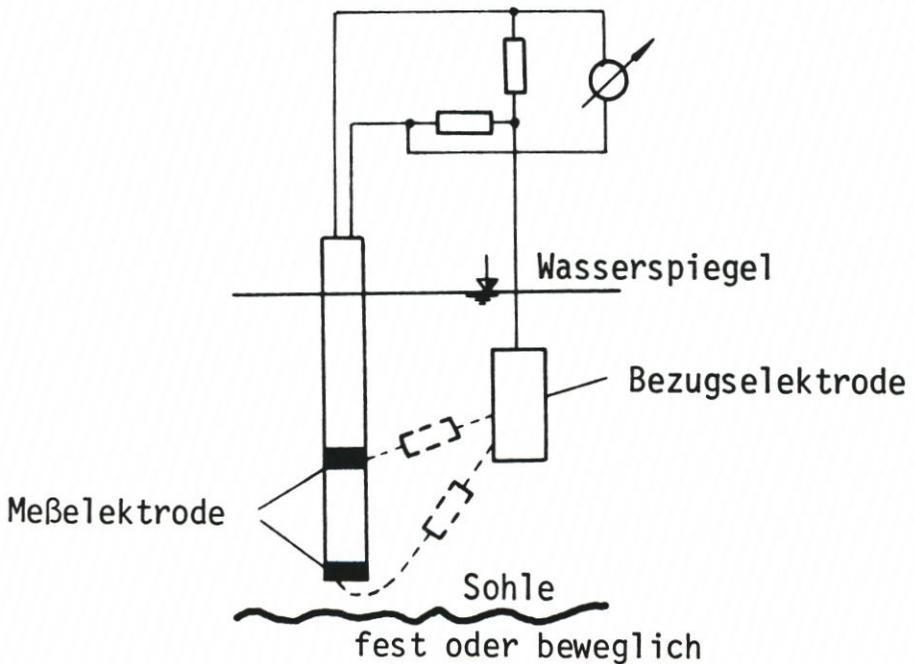


Abb. 6.9: Elektrischer Sohlabtaster, Skizze des Meßfühlers

rechner erfolgen, wobei mit Hilfe geeigneter Programme die Aufzeichnung von Höhenlinienplänen möglich ist.

Um Aussagen über die Materialverfrachtung bzw. die Bewegungsrichtung und -intensität machen zu können, reichen die Aufnahmen des Reliefs nicht aus. Man kann hierzu mit Hilfe einer geeigneten Markierung des Sediments *Tracermessungen* im Modell ausführen. Es muß beachtet werden, daß das markierte Material in seinen hydraulischen Eigenschaften nicht verändert werden darf, auch bei Überdeckung noch zu erkennen ist und seine Markierung nicht beständig sein soll, damit mehrere Versuche zeitlich hintereinander im gleichen Geschiebematerial ausgeführt werden können. Werden kurzlebige  $\gamma$ -strahlende Isotope zur Markierung verwendet, ist es möglich, diese Forderungen zu erfüllen. Die Halbwertzeiten sind aber so zu wählen, daß die Strahlungsintensität unterhalb der ohne besondere Schutzvorrichtungen zulässigen Grenze bleibt.

Der Nachweis der radioaktiv gekennzeichneten Geschiebekörner erfolgt mit Hilfe von Szintillationssonden. Wegen der geringen Überdeckungshöhen (cm-Bereich) läßt sich im Gegensatz zu Naturmessungen in Modellen meist eine 100%ige Strahlungsbilanz und damit eine exakte Markierung der Ausbreitungsflächen erreichen.

### 6.3.5 Ausbreitungsvorgänge, Dichteströmungen

Diese Problemstellung beschränkt sich im wesentlichen auf die Messung von Wassertemperaturen (Kühlwassereinleitungen) und diejenige der Konzentration von konservativen Tracern (Schmutzwassereinleitungen).

Die einfachste Temperaturmeßmethode in einem Modell ist die Benutzung geeichter Quecksilberthermometer. Diese Meßmethode ist verhältnismäßig personalaufwendig und liefert nicht immer genaue Ergebnisse über den zeitlichen Verlauf der Temperatur. Thermometer mit zu großer Empfindlichkeit sind ungeeignet! Mit günstigen Zeitkonstanten lassen sich brauchbare Temperaturganglinien ermitteln.

Mit Meßsonden ist die kontinuierliche Registrierung des Temperaturverlaufes möglich. Die im Handel erhältlichen Geräte sind größtmäßig ohne Schwierigkeit in hydraulischen Modellen verwendbar. Für eine sinnvolle Anordnung der Temperaturmeßgeräte empfiehlt es sich, die Grobverteilung des kontaminierten Wassers durch einfache Farbversuche vorher festzustellen.

Da die Wärmeabgabe Wasser/Luft in einem Modell nicht naturähnlich verläuft, sollte eine mögliche 100%ige Wärmebilanz erreicht werden. Das setzt eine gute Isolierung der Modellschale und eine Lufttemperatur in der Versuchshalle voraus, die etwa gleich der Wassertemperatur ist. Da letztere Bedingung kaum einzuhalten ist, werden auch simultane Verdunstungsmessungen ausgeführt und mit den Meßwerten die Wärmebilanz korrigiert.

Bei Untersuchungen der Ausbreitung von eingeleitetem Schmutzwasser werden in der Natur und im Modell konservative Farbstoffe benutzt, die in geringen Konzentrationen noch genau genug nachzuweisen sind. Wie die Erfahrungen gezeigt haben, eignet sich dafür besonders Rhodamin-B. Konzentrationen von weniger als  $10^{-10}$  sind mit handelsüblichen Fluorometern (z. B. System Turner) sicher bestimmbar. Die Probenentnahme im Modell ist zwar wieder sehr personalaufwendig, es lassen sich aber durch geeignete Geräte mehrere Proben gleichzeitig im Querschnitt entnehmen. Der im Modell vom Maßstab abhängige, zeitlich sehr geraffte Tideablauf ermöglicht sowohl die genaue Markierung der Ausbreitungszonen als auch die Messung der darin enthaltenen Konzentrationen in verhältnismäßig kurzer

Zeit. Aus dem Zusammenhang herausfallende Meßergebnisse lassen sich durch Wiederholungsversuche korrigieren oder verifizieren.

Die Messung von Dichteunterschieden in Modellen wird mit Leitfähigkeitsmeßsonden ausgeführt. Versuche mit Fluiden unterschiedlicher Dichte sind allerdings bei großflächigen Modellen sehr aufwendig. Da die Ästuarie der deutschen Nordseeküste zu den gut durchmischten Typen (Grenzzone: Salzwasser-Süßwasser) gehören und nach neueren Untersuchungen die Konvektion und die Makroturbulenz bei den Durchmischungsprozessen den Hauptanteil haben (der Einfluß der Dichteströmungen ist dabei um Zehnerpotenzen kleiner), lassen sich derartige Prozesse in hydraulischen Modellen auch mit Hilfe konservativer Tracer (Rhodamin-B) simulieren, die dank ihrer Langlebigkeit bei entsprechender Dichte der Meßstellen recht genau bilanziert werden können.

#### 6.4 Meßwertaufnahme und -verarbeitung

Die Anzahl der Meßwerte ist bei Tideströmungen und Seegang im Vergleich zu stationär richtungskonstanten Abflußvorgängen sehr groß. Das gilt besonders wegen der in Modellversuchen angestrebten Wiederholungshäufigkeit der Tiden und Wellen sowie den dort konzentrierten Einsatz von Meßgeräten.

Die Überschaubarkeit eines hydraulischen Modells bietet in Verbindung mit elektronischen Meßgeräten und Fernübertragung die Möglichkeit, sämtliche anfallenden Meßwerte zentral zu erfassen. Dabei hat sich als zweckmäßig erwiesen, sowohl eine analoge Überwachung zu benutzen als auch eine digitale Weiterverarbeitung der Meßwerte zu ermöglichen.

Für die analoge Überwachung können entsprechend der Schnelligkeit des Vorgangs entweder Schreibgeräte beliebiger Bauart oder aber Punktdrucker verwendet werden. Bei den letzteren ist darauf zu achten, daß die Punktfolge zeitlich so abgestimmt ist, daß der Ablauf gut erkannt werden kann. Es werden somit für Wellenmessungen Schreiber eingesetzt, während z. B. zur Registrierung von Tiden und Strömungsgeschwindigkeiten Mehrfarbepunktdrucker ausreichen.

Zur raschen Auswertung der Messungen sind zunächst die Digitalisierung sowie die Übertragung der elektrischen Signale in eine Datenverarbeitungsanlage erforderlich. Für die Auswertung lassen sich vorteilhaft Prozeßrechner verwenden, deren Speicherkapazität von dem Komfort des Betriebssystems, der Datenmenge und besonders davon abhängt, ob „on-line“ oder „off-line“ auszuwerten ist. Während für den „off-line“-Betrieb die Zwischenspeicherung der Daten in der Meßwernerfassungsstation auf Band, Platte, Lochstreifen oder dgl. für eine spätere Verarbeitung und Auswertung hinreichend ist, erfolgt im „on-line“-System die Übernahme der Daten direkt in den Kernspeicher mit sofortiger Auswertung und anschließender Ablage in die peripheren Geräte.

Bei der Untersuchung von Tidevorgängen lassen sich im „on-line“-Betrieb nach jeder Tide vorwählbare wichtige Daten über geeignete Geräte (Teletype, Sichtgerät) abrufen. Für Temperaturmessungen usw. ist die spätere Auswertung meist ausreichend, da Ausbreitungsprozesse allgemein über eine Serie von Tiden verfolgt werden müssen.

Zeichengeräte, die die Darstellung von Ganglinien hydraulischer oder anderer Prozesse gestatten, sollten zweckmäßig zur Ausrüstung der Meßwertverarbeitung gehören. Die Konfiguration von Meßwernerfassungs- und -verarbeitungsanlagen für hydraulische Modelle hängt von den Erfordernissen und Bedürfnissen der einzelnen Versuchsanstalten ab. Damit soll gesagt werden, daß die Meßwernerfassung im wasserbaulichen Versuchswesen keineswegs standardisiert ist. Aus verschiedenen handelsüblichen Geräten wird die gewünschte Konfigu-

ration zusammengestellt. Es sollte darauf geachtet werden, daß sich die entsprechenden Programme in einer gebräuchlichen Sprache (z. B. FORTAN IV) schreiben lassen.

### 6.5 Beispiele ausgeführter Modelle

#### 6.5.1 Hydraulisches Modell der Bundesanstalt für Wasserbau zur Untersuchung von Strömungsvorgängen im Tidegebiet

Das Jade-Weser-Modell bei der Bundesanstalt für Wasserbau in Hamburg-Rissen ist ein großflächiges Tidemodell (3700 m<sup>2</sup>) mit den Maßstabszahlen  $L_r = 800$  für die horizontalen und  $h_r = 100$  für die vertikalen Abmessungen (Abb. 6.10).

In diesem Modell sollen im wesentlichen Vorhaben zur Stabilisierung der Schifffahrtsrinnen untersucht werden. Die Einrichtungen des Modells wurden so konzipiert, daß sowohl ein Betrieb mit quasifester Sohle als auch mit beweglicher Sohle möglich ist, um die hydrodynamischen Vorgänge und die Feststoff-Transportprozesse getrennt messen zu können.

Da hier erstmalig zwei Ästuarie in einem Modell dargestellt werden, waren besondere Überlegungen bei der Einrichtung des Modells erforderlich. Das betrifft speziell die Ausrüstung mit Meß- und Auswertegeräten.

Bei den großen Abmessungen des Modells konnten nur Meß- und Steuergeräte mit Fernübertragung eingesetzt werden, um eine zentrale Meßwerterfassung und Steuerung zu ermöglichen. Die Meß- und Steuerzentrale wurde an der in Abbildung 6.10 eingezeichneten Stelle des Modells angeordnet. Während hierfür Erfahrungen vorlagen, war für die zusätzlich geforderte Meßwertverarbeitung auf einer angeschlossenen EDV-Anlage („on-

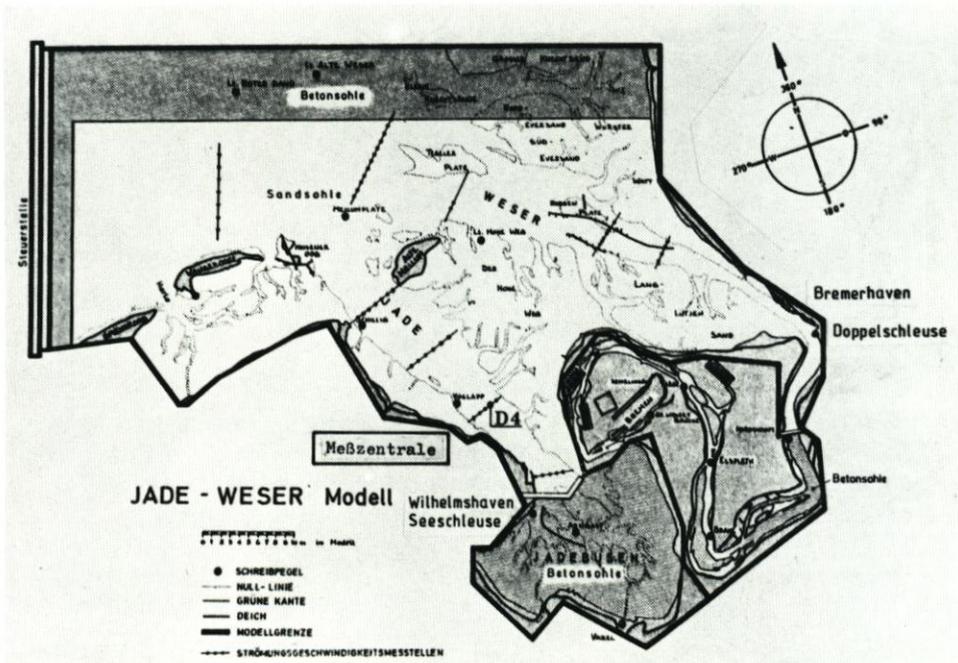


Abb. 6.10: Jade-Weser-Modell

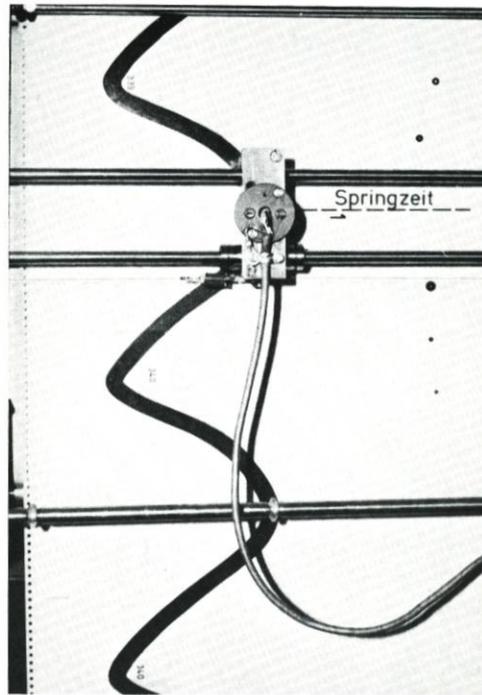


Abb. 6.11: Optische Abtastung der Tidekurve

line“ und „real time“) kein übertragbares Vorbild vorhanden. Die Gerätekonfiguration sowie die entsprechenden Programme mußten entwickelt werden. Weiterhin war auf eine simultane, analoge Darstellung der Meßwerte nicht zu verzichten. In das Modell sollten kontinuierlich Tiden mit veränderlichen Daten eingesteuert werden. Das erforderte einmal eine hohe statische Genauigkeit des Regelvorganges, zum anderen auch eine ausreichende Regelgeschwindigkeit der Anlage. Mit den bisher gebräuchlichen Steuerungen auf der Basis von Zweipunktregelungen mit einem Schwimmer als Ist-Wert-Aufnehmer ließ sich diese Aufgabe nicht mehr lösen.

Der Ist-Wert der Tide wird mit einem vibrierenden Spitzentaster gemessen. Um jederzeit eine visuelle Kontrolle des Tideablaufs zu ermöglichen, wird der Soll-Wert als ca. 10 mm breiter Kurvenzug mit schwarzer Tusche auf eine mattweiße Folie gezeichnet und dort optisch abgetastet (Abb. 6.11). – Das Abtastsystem arbeitet mit einer Auflösung von 0,1 mm Wasserstandsänderung im Modell bei dem Zeichenmaßstab 3:1 für die Soll-Wert-Kurve.

Die Tide wird mit einer 32 m langen Klappe erzeugt. Die Regelorgane sind in Abbildung 6.12 dargestellt. Im Vordergrund ist der Ist-Wert-Geber unmittelbar vor der Überfallklappe aufgestellt, der den tatsächlich vorhandenen Wasserspiegel abtastet. Die Differenzen zwischen Soll- und Ist-Wert werden durch den Stellmotor für die Klappenbewegung geregelt, der an dem Bock über dem Gegengewichtsrohr für die Klappe drehbar gelagert ist. Der Schrittmotor kann die Klappe in Schritten von etwa 2/100 mm aufwärts oder abwärts verstellen.

Im Jade-Weser-Modell werden im wesentlichen Wasserspiegellagen, Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen gemessen. Dafür werden vibrierende Spitzentaster (Abb. 6.4) und kombinierte Strömungs-Richtungsmesser (Abb. 6.6) eingesetzt. Die im Modell

aufgenommenen Meßsignale gelangen in die Zentrale und lassen sich dort direkt durch Steckverbindungen wahlweise auf ein System von sechs Farben-Punktdruckern (Punktfolge 2 sec) schalten. Bei den Wasserspiegellagen ist die Messung der Differenzen zwischen zwei Pegeln möglich.

In Abb. 6.13 sind z. B. die Pegel 1 und 2 den Druckereingängen 1 und 2 zugeordnet. Eingang 3 registriert die Wasserspiegeldifferenz zwischen den Pegeln 2 und 3 und Eingang 5 die Differenzen zwischen den Pegeln 3 und 4.

Simultan dazu gehen die ankommenden Signale über ein System „Filter – Multiplexer – Analog-Digital-Wandler“ zur Weiterverarbeitung und Speicherung in einen zentralen Prozessor mit entsprechenden Peripheriegeräten ein. Dabei ist der gleichzeitige Anschluß von bis zu 32 Geräten möglich. In Abb. 6.14 ist die grundsätzliche Konstellation der Geräte für die Meßdatenerfassung dargestellt. Bei entsprechender Speicherkapazität des Rechners können weitere Modelle angeschlossen werden.

Für die Meßwerterfassung im Modell wurde ein Echtzeitprogramm entwickelt, welches neben einer sortierten Speicherung aller gemessenen Werte eine Kurzberechnung der Kennwerte einer Tidephase ( $T_{hw}$ ,  $T_{nw}$ ,  $D_f$ ,  $D_e$ ,  $K_f$ ,  $K_e$ ,  $V_{fmax}$ ,  $v_{emax}$ ,  $v_{em}$ , mittlere Strömungsrichtung Flut und Ebbe) in Protokollform ausgibt.

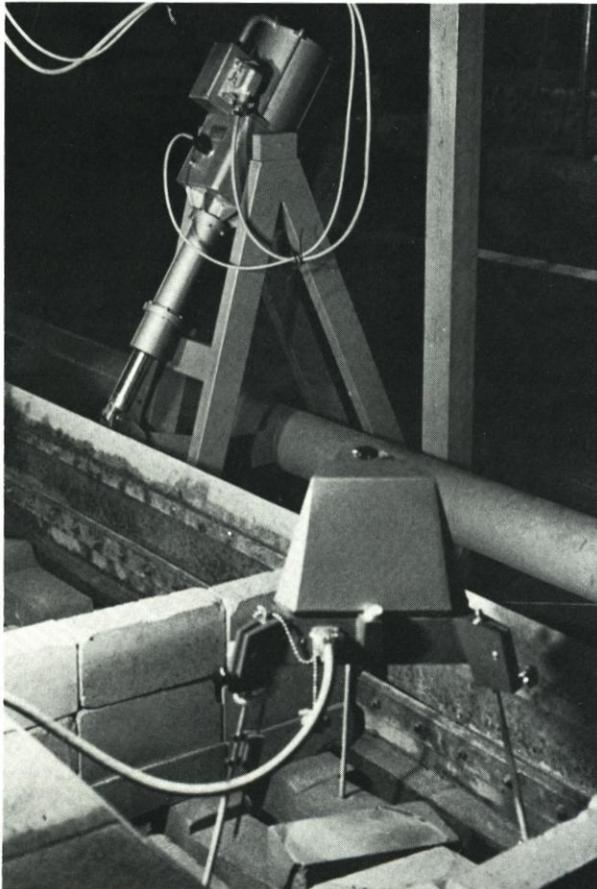


Abb. 6.12: Klappenantrieb und Istwertgeber

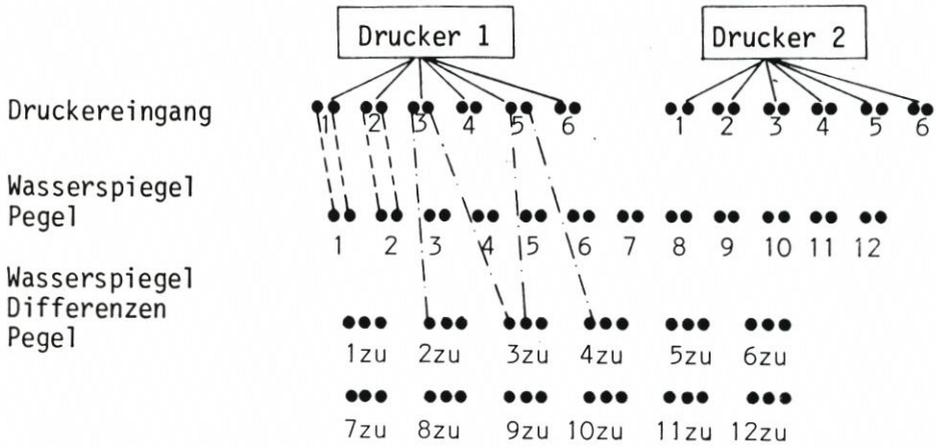


Abb. 6.13: Registriereinrichtung für Wasserspiegel und Wasserspiegeldifferenzen (schematisch)

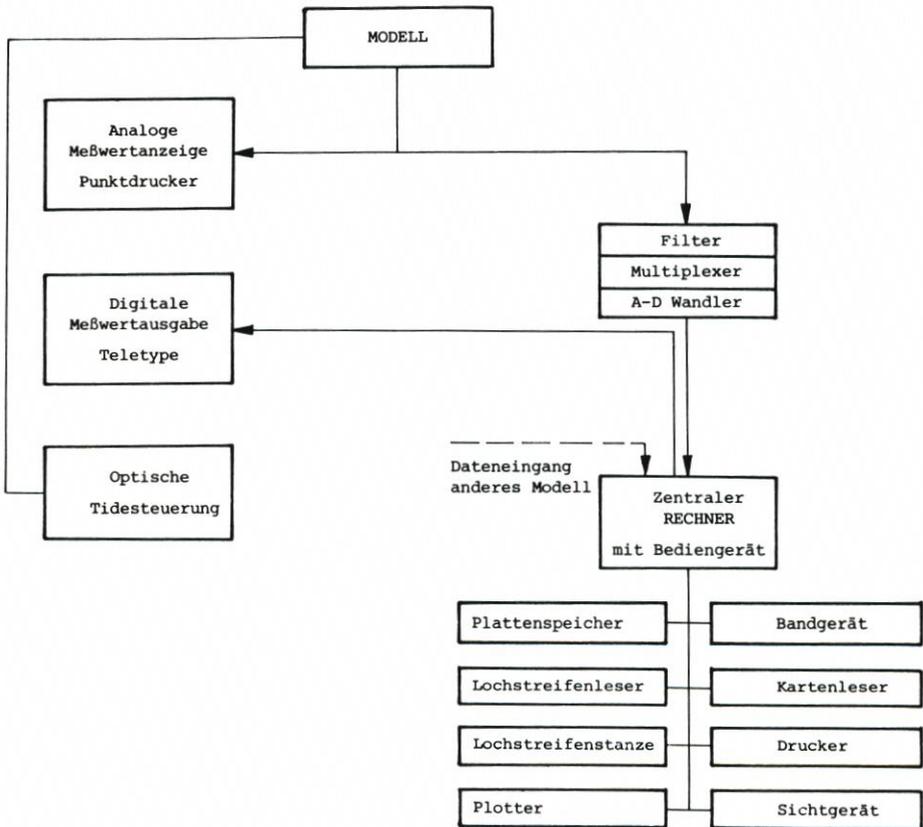


Abb. 6.14: Steuerung, Meßwertaufnahme und -verarbeitung für das Jade-Weser-Modell

Voraussetzung für die prognostische Benutzung jedes hydraulischen Modells ist seine „Naturähnlichkeit“, also die Qualität der Übereinstimmung von in der Natur und im Modell aufgenommenen Meßdaten unter Beachtung der Bemerkungen in Abschnitt 6.3.1. Die Herstellung der Naturähnlichkeit eines Tidemodells ist dann erschwert, wenn Bereiche der offenen See dargestellt werden müssen, deren Strömungsverhalten nicht ausreichend bekannt ist. In derartigen Fällen werden heute großmaschige, jedoch in den Randbereichen verfeinerte mathematische Modelle eingesetzt, um mit Hilfe der daraus gewonnenen Ergebnisse die günstigste Lage der Steuerstelle für die Tide im hydraulischen Modell zu ermitteln.

Da die mathematischen Modelle während der Planung und des Aufbaues des Jade-Weser-Modells noch in einer gewissen Entwicklung waren, konnten die Ergebnisse erst in der Phase der Naturähnlichkeitsversuche erfolgreich genutzt werden und erzwangen nachträglich einen Umbau des nördlichen Modellrandes (Abb. 6.10), um Zu- und Abflüsse in diesem Bereich zu simulieren.

Überhöhte Modelle erfordern allgemein eine ausgeprägte künstliche Sohlrauigkeit, um Wasserspiegellagen und Strömungsgeschwindigkeiten den natürlichen Verhältnissen anpassen zu können. Auswahl und Verteilung der Rauigkeit ist nur empirisch möglich. Etwaige Veränderungen des örtlichen Strömungsbildes in Flachwasserbereichen müssen sorgfältig beobachtet und gedeutet werden.

Die beim Jade-Weser-Modell zur Herstellung der Naturähnlichkeit benutzten hydraulischen Daten waren Wasserspiegellagen sowie Strömungs- und Tidefortschrittsgeschwindigkeiten. Wegen der in keinem Fall in der Natur erreichbaren Synopse eines großflächigen Geschwindigkeitsfeldes – ganz abgesehen von den meteorologischen Zufälligkeiten – kann in einem Tidemodell niemals eine vollkommene Übereinstimmung zwischen den in der Natur und im Modell gemessenen Werten erwartet werden. Das ist auch nicht erforderlich, da es im wesentlichen darauf ankommt, Veränderungen zu einem fixierten „Naturzustand“ festzustellen und zu beurteilen. So kann die Naturähnlichkeit nicht allein durch Zahlen bewertet

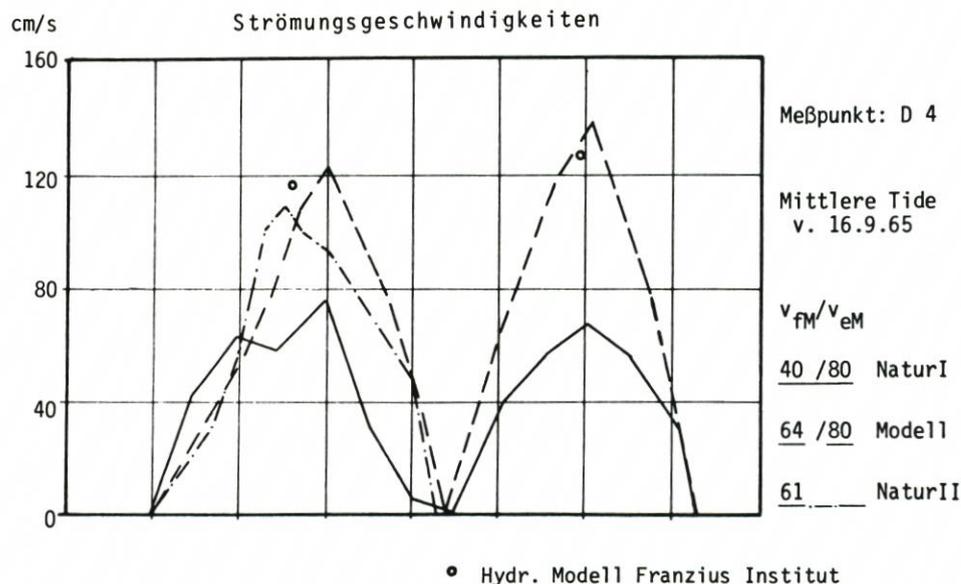


Abb. 6.15: Vergleich Strömungsgeschwindigkeiten Natur/Modell

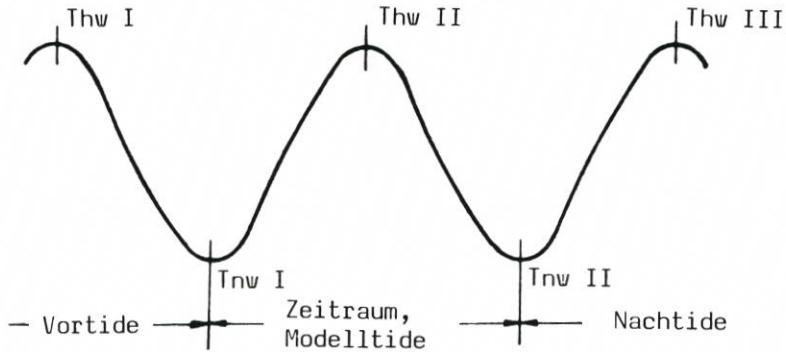


Abb. 6.16: Tidezyklus (schematisch)

werden, sondern nur unter Berücksichtigung der Qualität und der Vollständigkeit der Messungen in Natur und Modell.

In Abb. 6.15 sind beispielhaft die in Natur und Modell gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten im Meßpunkt D 4 (Abb. 6.10) aufgetragen. Die maximalen und mittleren Werte Natur/Modell weichen erheblich voneinander ab (Natur I). Es ist nicht zu erwarten, daß Schaufelradstrommessungen im unteren Drittel des Vertikalprofils repräsentativ sind. Die Vergleichsmessung mit einem Ott-Flügel (Natur II) an verschiedenen Punkten stimmt dagegen mit den Modellwerten recht gut überein. Ein derartiges „Mißverstehen“ zwischen Natur- und Modellmessung sollte die Ausnahme sein.

Für die Beurteilung der Wasserspiegellagen wurde im Jade-Weser-Modell ein Toleranzband benutzt, das aus den bei der gewählten Vergleichstide aufgetretenen Tnw und Thw vorher und nachher, entsprechend der schematischen Skizze in Abb. 6.16, gebildet wurde (für die Thw: I und III, für die Tnw: I und II). Die Bandbreiten (Natur) sind im Mittel für Thw 60 cm und für Tnw 30 cm. Die Werte der für die Modellversuche benutzten „mittleren Tide“ liegen innerhalb dieser Bänder und dienten als Ausgangswerte für Vergleichsversuche. Die Fortschrittszeiten der Tidewelle stimmen gut mit den Naturwerten überein.

Bei der Simulation einer Sturmflut traten größere Abweichungen in den Phasen und Höhenlagen des Tnw auf. Allerdings blieb dabei die für die mittlere Tide gefundene Rauigkeit unverändert. Für mittlere Sturmfluten läßt sich durch geeignete Anpassung der klassischen Rauigkeit – wie die Erfahrungen aus anderen Modellen zeigten – eine hinreichende Naturähnlichkeit herstellen. Da sich der bei Sturmfluten entscheidend wirksame Windeinfluß jedoch in großflächigen Modellen mit wirtschaftlich vertretbaren Mitteln kaum simulieren läßt, können sehr hohe Sturmfluten in großflächigen hydraulischen Tidemodellen nur mit neu konzipierten zusätzlichen Beschleunigungs- (Flut) und Verzögerungselementen (Ebbe) hinreichend ähnlich nachgebildet werden.

### 6.5.2 Hydraulisches Modell des Franzius-Instituts für die Untersuchung von Kühlwasserausbreitungsvorgängen im Tidegebiet\*)

Da Kraftwerke wegen des großen Kühlwasserdargebotes in zunehmendem Maße an den Küsten und Tideästuaren erstellt werden, die Wärmeausbreitung auf theoretischem Wege mit hinreichender Genauigkeit aber nicht vorherbestimmt werden kann, werden Vorgänge der Kühlwasserausbreitung nahezu ausschließlich im hydraulischen Modell untersucht. Es werden hier die Meßeinrichtungen für dreidimensionale Untersuchungen einer Kühlwassereinleitung dargestellt.

Für dreidimensionale Untersuchungen der Kühlwasserausbreitung im Nahbereich einer Einleitungsstelle ist im Franzius-Institut eine Versuchseinrichtung mit fest eingebauter Tidesteuer- und Meßwerterfassungsanlage entwickelt und aufgebaut worden. In dieser rund 20 m breiten und rund 45 m langen Versuchsanlage können beliebige morphologische Verhältnisse im Bereich eines Kraftwerkes für die Untersuchung spezieller Probleme eingebaut werden.

Die Tidebewegung im Modellbereich wird über ein kombiniertes Wasserstands-/Wasser-

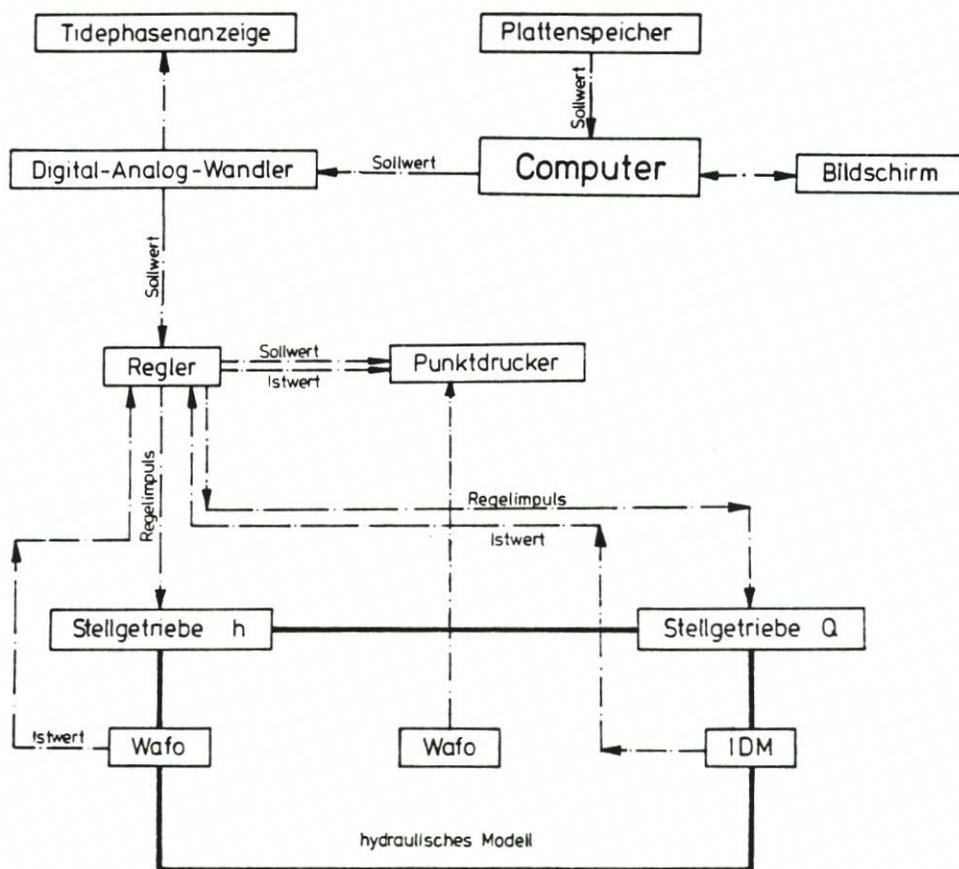


Abb. 6.17: Versuchseinrichtung (schematisch)

\*) Bearbeitet von Dr.-Ing. SCHWARZE, Hannover.

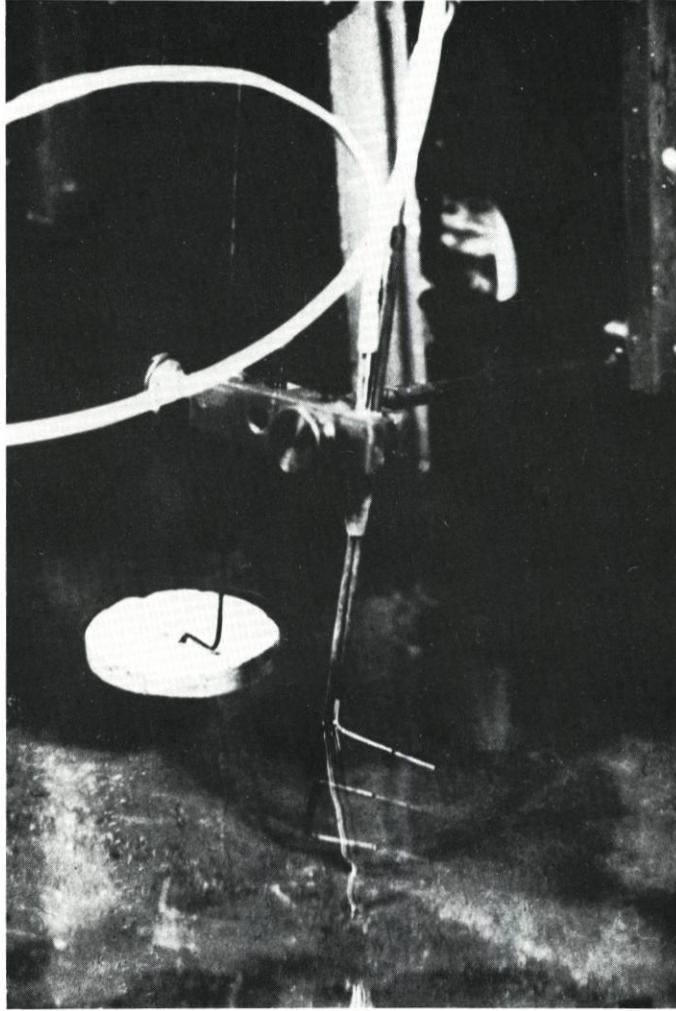


Abb. 6.18: Temperaturmeßsonden

mengen-Regelsystem gesteuert. Die Steuerung vorgegebener beliebiger Tideverhältnisse erfolgt von einer zentralen Rechnerstation aus, die gleichzeitig Meßwerte (Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen, Wassertemperaturen) aufnimmt, speichert und verarbeitet. Einen Überblick über die Einrichtung gibt Abbildung 6.17.

Die Erfassung der Kühlwasserausbreitung in einer instationären, alternierenden Tideströmung zur dreidimensionalen Darstellung der Ausbreitungsvorgänge verlangt in möglichst kurzen zeitlichen Abständen die synchrone Messung von Wassertemperaturen an einer möglichst großen Anzahl von Meßstellen, verteilt über Länge, Breite und Tiefe des Nahbereiches der Einleitung. Im Hinblick auf die hohen Anforderungen von Behörden und Kraftwerksbetreibern an die Genauigkeit der Aussage müssen Geräte zur Aufnahme der Temperaturen und zur Auswertung der Messungen mit entsprechenden Möglichkeiten und Genauigkeiten eingesetzt werden.

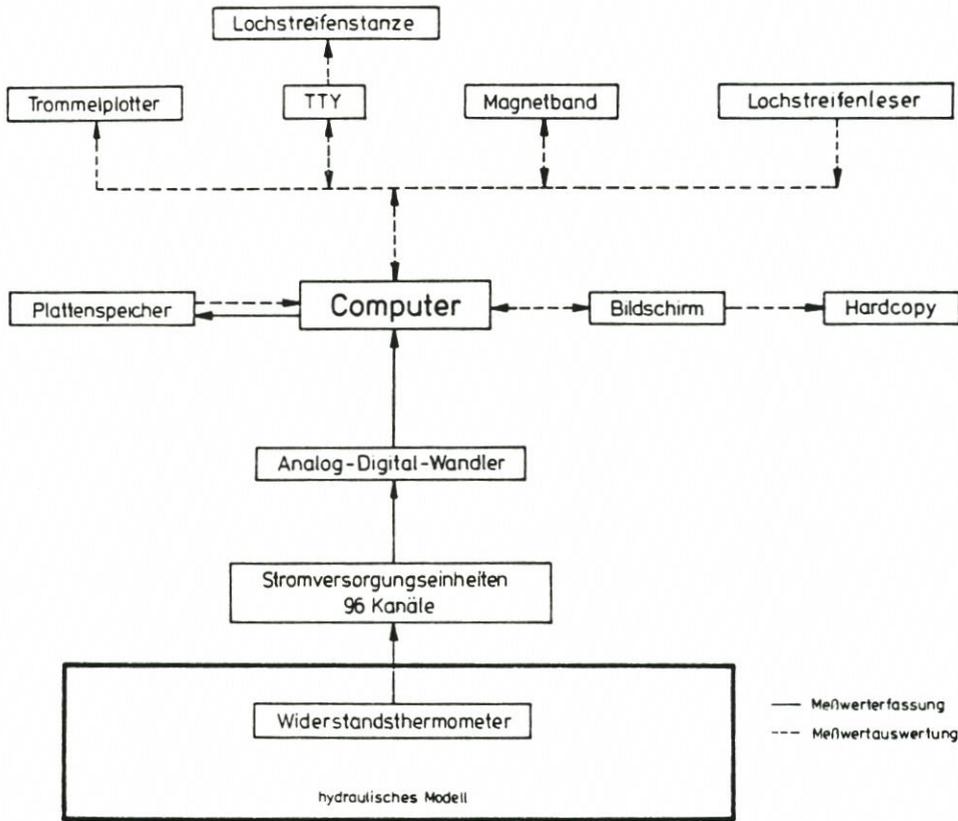


Abb. 6.19: Meßsteuereinrichtungen (schematisch)

Im Franzius-Institut werden für die Temperaturmessungen *Widerstandsthermometer* mit einer Genauigkeit von unter  $0,1^{\circ}\text{C}$  verwendet. Diese Temperaturmeßfühler mit einer Schaftdicke von 3 mm, die eine Behinderung der Strömung nahezu ausschließen, und einer Dicke des eigentlichen Meßfühlers von 1 mm (punktförmige Messungen) sind an über dem Modell angeordneten Meßträgern befestigt (Abb. 6.18). Durch die Aufhängung der Meßsonden an Schwimmern wird gewährleistet, daß auch bei tidebedingten Wasserstandsänderungen immer in gleicher Tiefe unter der Wasseroberfläche gemessen wird. Die Zeitkonstante der gewählten Temperaturmeßfühler beträgt im Hinblick auf die gewünschten großen Abstraten nur etwa 3 Sekunden.

Die analogen Signale der Meßfühler werden über einen Analog-Digital-Wandler zu einem Prozessor HP 21 MX-E weitergegeben und auf einer Magnetplatte gespeichert. Maximal können vom Rechner 96 Meßstellen gleichzeitig angesteuert und abgefragt werden. Die Temperaturwerte aller Meßfühler werden 480mal je Tide, die z. B. bei einem Maßstab von 1:100 im Modell 74,5 Min. dauert, abgefragt. Die Temperaturmeßwerte werden im Rechner in zeitliche Beziehung zu den gleichzeitig gemessenen Strömungen und Wasserständen gebracht und z. B. als Ganglinien oder Längsprofile automatisch auf einem Sichtschirm dargestellt und über eine Hardcopy ausgegeben oder auf einen Trommelplotter aufgezeichnet. Die Meßsteuereinrichtungen sind in Abb. 6.19 dargestellt. Abb. 6.20 zeigt ein Beispiel für die Messung

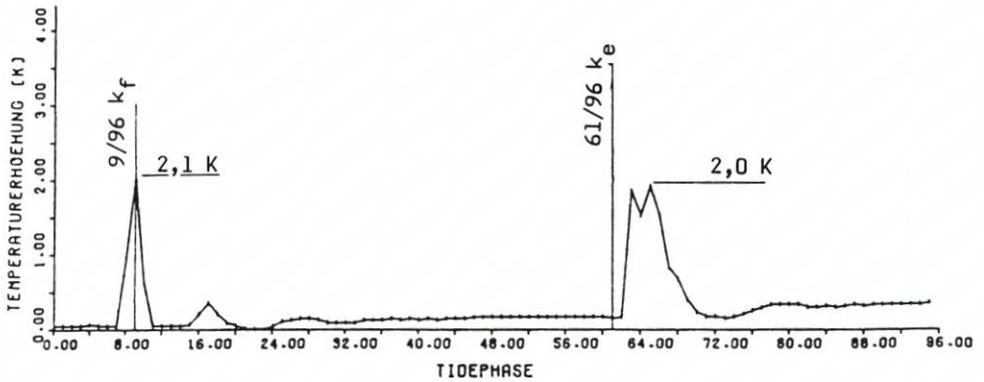


Abb. 6.20: „Ganglinien der Temperaturerhöhungen in der unterstromigen Öffnung des Kühlwasser-Entnahmebauwerkes OK Öffnung (Meßstelle 109)

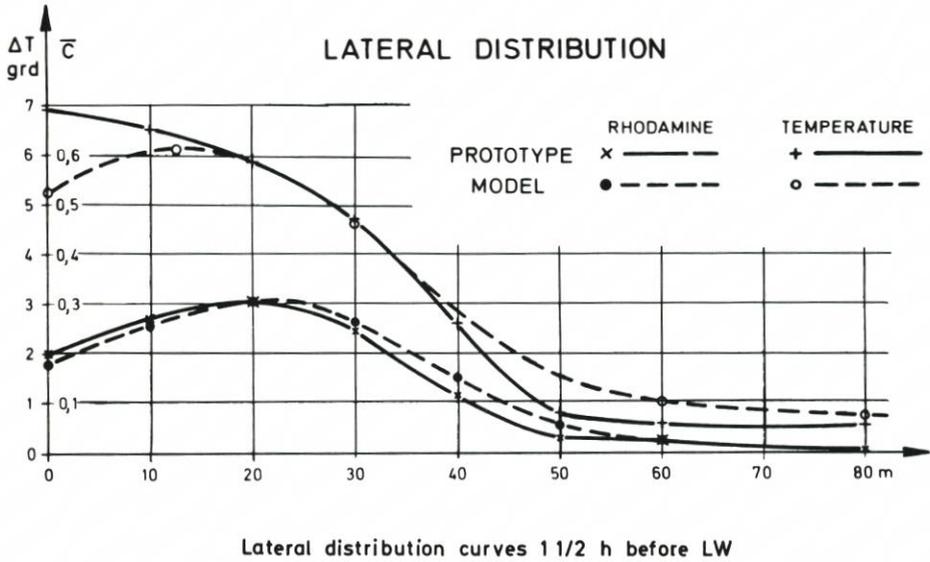


Abb. 6.21: Konzentrations- und Temperaturverteilung in einem Meßquerschnitt

einer tideabhängigen Temperaturverteilung im Nahbereich einer Kühlwassereinleitung im Modell.

Die Naturähnlichkeit von Wärmeausbreitungsvorgängen im Modell kann praktisch für den einzelnen Fall erst nach Fertigstellung der Anlage „in situ“ nachkontrolliert werden. Vergleichsmessungen Natur – Modell für das KKW Stade, die von der BAW Hamburg ausgeführt wurden, zeigten für Temperatur und Tracer (Rhodamin) eine befriedigende Übereinstimmung (Abb. 6.21).

### 6.5.3 Hydraulisches Modell des Franzius-Instituts für dreidimensionale Seeganguntersuchungen

Die Versuchseinrichtung wurde im Rahmen eines Forschungsvorhabens des Sonderforschungsbereiches 79 konzipiert und gebaut. Durch systematische, vergleichende Untersuchungen mit regelmäßigen Wellen und mit Wellenspektren werden problemorientiert Fragestellungen des Seebaus, Hafenbaus und Küstenschutzes bearbeitet, um vorhandene Verfahren zur Planung und Bemessung von Bauwerken im Hinblick auf die spektralen Eigenschaften des Seeganges zu erweitern bzw. gegebenenfalls neu zu entwickeln.

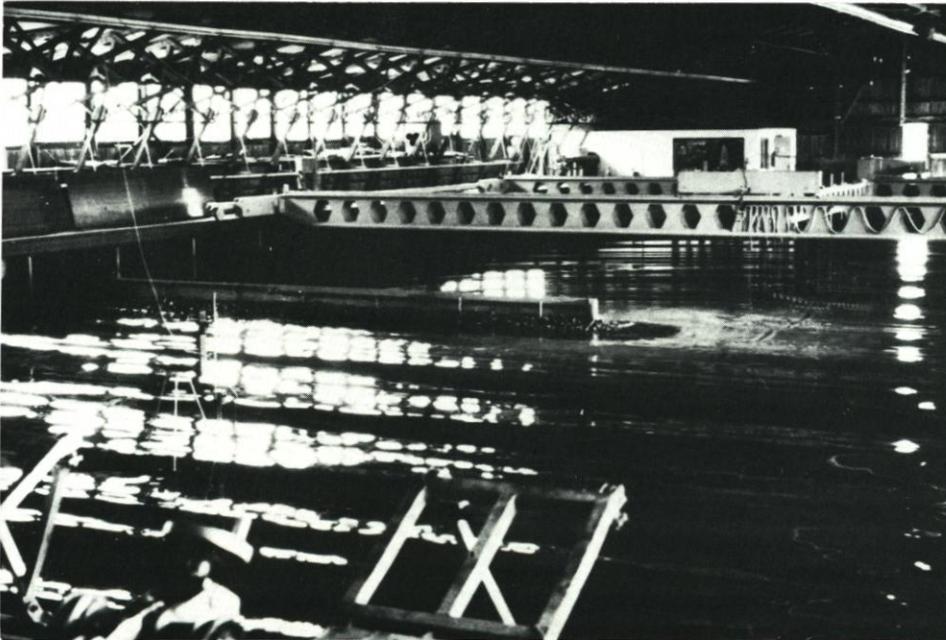
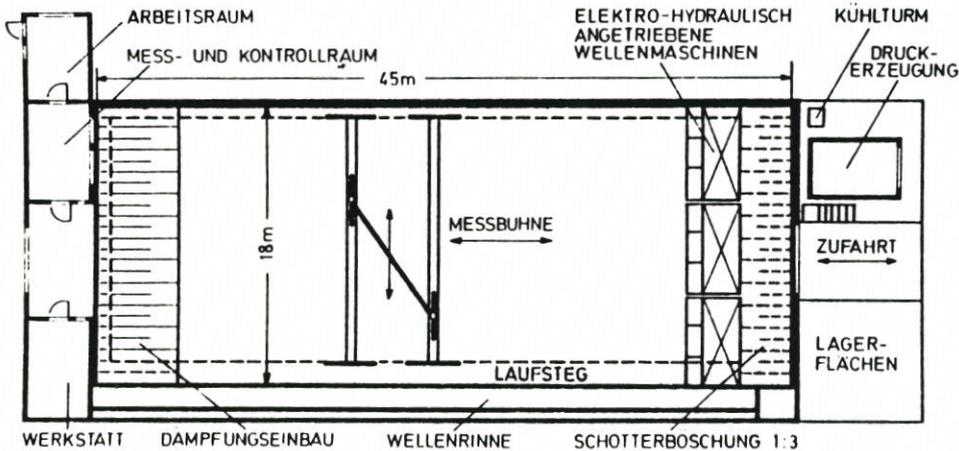


Abb. 6.22: (a und b) Versuchseinrichtung Wellenbecken

Im Vordergrund der wissenschaftlichen Untersuchungen stehen Fragen zur Diffraction, Reflexion und Wellentransmission an starren und schwimmenden, wellenabschirmenden Bauwerken.

Das Wellenbecken (Abb. 6.22) hat eine Größe von  $18 \times 45 \text{ m}^2$  mit fester, ebener Sohle. Die Seitenwände sind 1 m hoch, so daß mit einer Entwurfswellenhöhe von  $H = 40 \text{ cm}$  Untersuchungen bei einer maximalen Wassertiefe von  $d = \text{rd. } 0,6 \text{ m}$  möglich sind. An einer Stirnseite wurde eine mechanische Plattenwellenmaschine mit elektro-hydraulischem Antrieb fest installiert, deren Bewegung zwischen den Bewegungsformen Rotation und Translation im Hinblick auf eine möglichst gute Annäherung an das Profil der horizontalen Orbitalgeschwindigkeiten und zur Unterdrückung von unerwünschten Sekundärwellen stufenlos verändert werden kann.

Auf der der Wellenmaschine gegenüberliegenden Seite befindet sich eine wellendämpfende Böschung mit extrem geringem Reflexionsgrad. Für die seitliche Dämpfung werden – je nach Problemstellung – bewegliche Dämpfungskörbe aus Fasermaterial verwendet.

Zur Datenaufnahme dient eine Meßbühne, bestehend aus zwei Querträgern und einem Zwischenträger, die unabhängig voneinander bewegt werden können, so daß z. B. auch die Untersuchung von Reflexionseinflüssen bei schräg zu den Beckenachsen anlaufenden Wellen möglich ist.

Die Steuerelektronik für die Maschine und die Meßbühne sowie die Meßelektronik für den Versuchsbetrieb sind zentral in einem Meß- und Kontrollraum untergebracht (DAEMRICH et al., 1978).

Die Bewegung der Antriebszylinder der drei unabhängigen Maschineneinheiten, die wiederum jeweils aus drei miteinander gekoppelten Wellenmaschinen bestehen, wird durch analoge Steuersignale vorgegeben. Im statischen Betrieb ist die Auslenkung des Zylinders und damit diejenige der Wellenmaschinenplatte proportional zur Spannung des Steuersignals (Wegregelung). Im dynamischen Betrieb muß dagegen das Schwingverhalten der Maschine einschließlich der Hydraulikanlage und der Einfluß der Regelelektronik berücksichtigt werden. Das Schwingungsverhalten kann durch eine Übertragungsfunktion beschrieben werden, die das Amplitudenverhältnis von Soll- und Istwerten sowie die Phasenverschiebung in Abhängigkeit von der Frequenz angibt. Ein optimaler Betrieb und ein absoluter Gleich- und Synchronlauf der Maschinen wird durch Veränderung der Proportional-, Integral- und Differentialanteile der Regelverstärker erreicht.

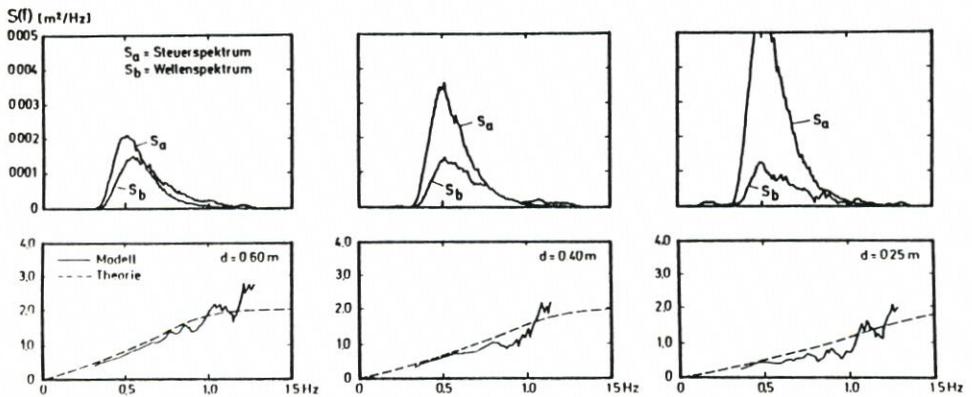


Abb. 6.23: Spektren und hydraulische Übertragungsfunktion in unterschiedlichen Wassertiefen (Wellenpegel 5,0 m vor der Wellenmaschine)

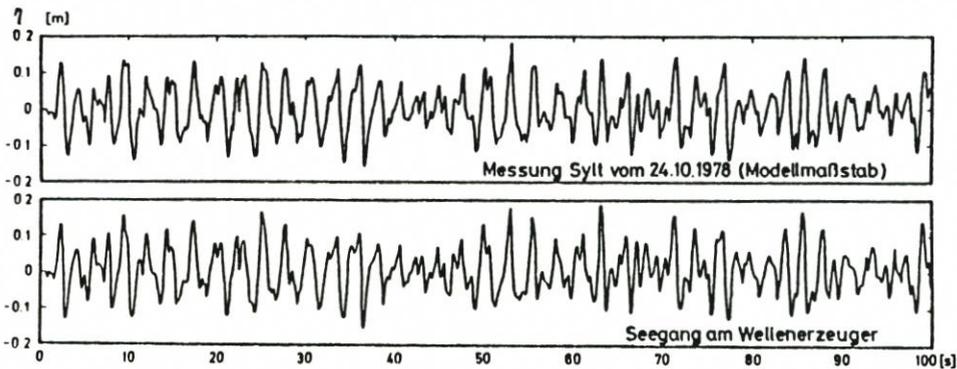


Abb. 6.24: Vergleich zwischen Eingangssignal und erzeugten Wellen (DHI-Signal-Generator)

Zur Nachbildung definierter Wellen im Modell muß weiterhin die Übertragungsfunktion zwischen der Bewegung der Wellenmaschinenplatte und der Wasserspiegelauslenkung für alle vorkommenden Betriebszustände bekannt sein.

Abb. 6.23 zeigt beispielhaft die Nachbildung von Spektren und hydraulischen Übertragungsfunktionen im hydraulischen Modell. Zur Nachbildung von regelmäßigen Wellen werden die Steuersignale für die Antriebszylinder in der einfachsten Form durch einen Sinusgenerator erzeugt. Zur Reproduktion von Wellenspektren und Zeitreihen stehen ein Wave-Spectrum-Synthesizer (Entwicklung Hydraulics Research Station in Wallingford, England) und ein Wave-Signal-Generator (Entwicklung Danish Hydraulic Institut) zur Verfügung. Es können jedoch auch beliebige Signale auf vorhandenen Computer-Anlagen erzeugt und – auf Analogmagnetband oder Lochstreifen gespeichert – als Steuersignale verwendet werden.

Abb. 6.24 zeigt den Vergleich einer Seegangsmessung vor Sylt, aufgenommen mit einer Datawell-Wellenreiterboje, und die Reproduktion dieser Wellenaufzeichnung im hydraulischen Modell.

Da der Seegang im Modell nicht nur von der Bewegung der Wellenmaschinenklappe, sondern in starkem Maße auch von der Reflexion an den Modellberandungen und Einbauten im Becken abhängt, ist eine selbstkorrigierende Steuerung der Maschine unter Verwendung eines FOURIER-Analyzers vorgesehen.

Abb. 6.25 zeigt, in welcher Weise diese Einflüsse durch iterative Veränderungen des Steuersignals rechnerisch berücksichtigt werden können. Gegenübergestellt sind das zu erreichende Originalsignal, die erste Messung und das Ergebnis nach der zweiten Korrektur.

Zur Messung der Wellenhöhen stehen u. a. im Delft Hydraulics Laboratory entwickelte Wellenpegel (Waveheight Meter, Model GHM, Widerstandsmessprinzip) zur Verfügung. Orbitalgeschwindigkeiten können mit Zweikomponenten-Sonden (COLNBROOK, NSW) gemessen werden. Meßgeber verschiedener Fabrikate zur Druck- und Kraftmessung sind ebenfalls vorhanden. Die Signale der Meßgeber werden über Hängeleitungen in einen Meß- und Kontrollraum übertragen und können dort auf Analog-Magnetbandgeräte und/oder Direktschreiber aufgezeichnet werden.

Zur Auswertung der Meßdaten nach beliebigen Verfahren stehen zwei Rechnersysteme zur Verfügung. Mit dem FOURIER-Analyzer-System (HP 5451 B) können Auswertungen auf der Grundlage der Analyse im Frequenzbereich (Energiespektren, Übertragungsfunktion, Kohärenzfunktion etc.) rationell vorgenommen werden.

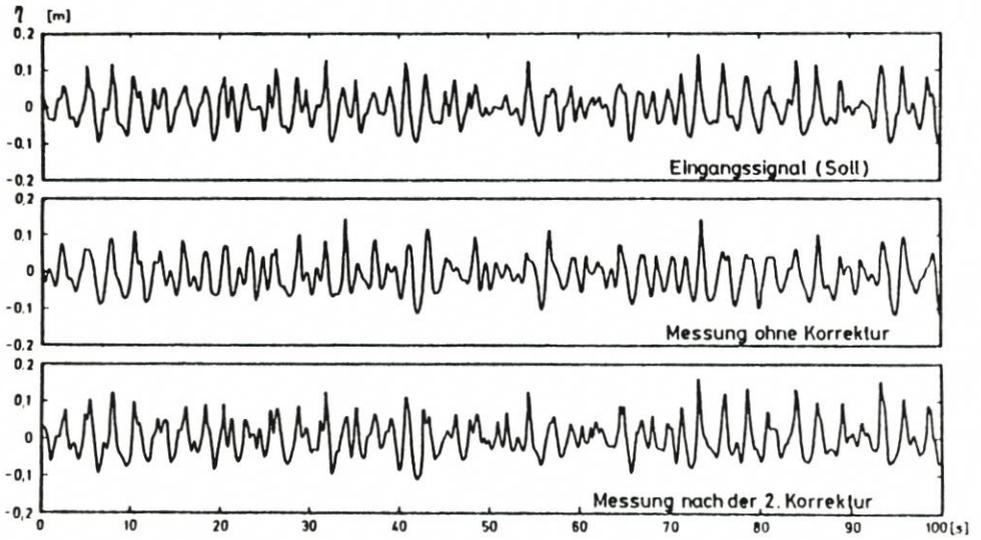


Abb. 6.25: Simulation eines selbstregistrierenden Steuersystems mit dem DHI-Signal-Generator

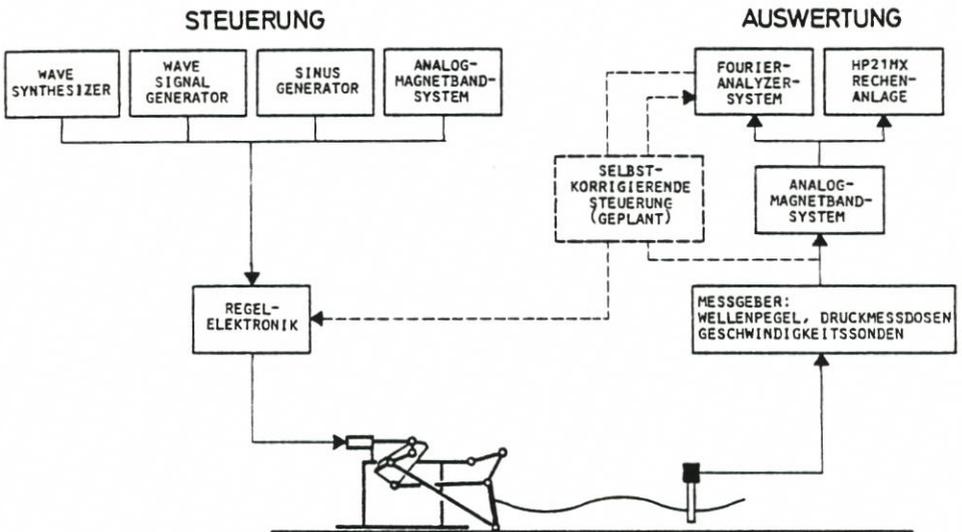


Abb. 6.26: Einrichtung zur Steuerung der Maschine sowie zur Datenerfassung und Auswertung

Auf der Rechanlage des Franzius-Instituts (HP 21 MX mit Platten- und Magnetbandeinheit), die mit entsprechenden A-D-Wandlern ausgestattet ist, können analoge Daten digitalisiert werden. Die Auswertung nach Verfahren der Extremwertstatistik (z. B. „Zero-up-crossing“ oder ähnliche Verfahren) kann nach Zwischenspeicherung auf Digitalmagnetbändern an dieser Anlage oder auch am Regionalen Rechenzentrum Niedersachsen (RRZN) erfolgen. Beide Rechanlagen sind mit graphischen Ausgabegeräten (Plotter oder Sichtschirm mit Hardcopy) ausgerüstet.

Abb. 6.26 zeigt zur Verdeutlichung eine schematische Darstellung aller Einrichtungen zur Steuerung der Maschine sowie zur Datenerfassung und -auswertung.

Hydraulische Wellenmodelle wurden bis vor wenigen Jahren ausschließlich mit regelmäßigen Wellen betrieben. Entsprechend unkompliziert war die Versuchstechnik. Für den Antrieb des Wellenerzeugers reichte z. B. ein Elektromotor. Die Meßtechnik war einfach. Eine Registrierung auf Papier war für die Auswertung ausreichend.

Die Nachbildung von irregulären Wellen mit Hilfe hydraulischer Antriebe und neuartiger Regelungssysteme hat die Versuchstechnik erheblich verändert. Mit der Simulation von Spektren sind die Fragen der Datenregistrierung und -verarbeitung verbunden. Die Registrierung der Wellenhöhen, Orbitalgeschwindigkeiten und Drücke auf einfachen Direktschreibern dient dabei nur der Kontrolle des Versuchsablaufs.

Ähnliche Wellenversuchsanlagen wurden auch in anderen Versuchsanstalten gebaut. Die Probleme der Gerätetechnik sind jedoch grundsätzlich ähnlich.

## 6.6 Schlußbemerkung

„Modelle“ werden im wissenschaftlichen Sprachgebrauch wie folgt definiert:

„Vereinfachende, bildliche oder mathematische Darstellung von Strukturen, Funktionsweisen oder Verlaufsformen“.

Damit soll gesagt werden, daß Modelle das Geschehen in der Natur nicht absolut genau nachbilden können. Sie sind als Hilfsmittel jedoch erforderlich, da gerade im Küstenbereich durch die verhältnismäßig großen Abmessungen, z. B. der Ästuare, die großräumigen Vorgänge in der Natur niemals exakt untersucht werden können. Hinreichende Genauigkeiten sind jedoch erreichbar.

Diese Erkenntnisse sollten beim Messen der Strömungs- und sonstigen Vorgänge in einem Gewässer beachtet werden. Der Vergleich von Modell- und Naturmessungen kann nur zu richtigen Schlußfolgerungen führen, wenn die Meßmethodik in beiden Fällen ähnlich oder aber zumindest dem Beurteilenden bekannt ist. Jedes Meßverfahren hat seine Genauigkeitsgrenzen, und es ist sinnvoll, in der Natur und im Modell ähnliche Grenzen einzuhalten. Daß Modellmessungen dem Außenstehenden oft subtiler als Naturmessungen erscheinen, ist darauf zurückzuführen, daß die Geräte wegen des Maßstabs kleiner und empfindlicher sein müssen. Bei einer Vertikalmaßstabszahl  $h_r = 100$  entsprechen 0,2 mm Modell eben 2 cm in der Natur. Wenn unterstellt wird, daß die Ablesegenauigkeit der Naturpegel  $\pm 2$  cm beträgt, wird von den vibrierenden Spitzentastern eine (auch vorhandene) Auflösung  $\pm 0,2$  mm erwartet. Für die Strömungsgeschwindigkeiten gilt das Gleiche. Während sich jedoch die Wasserspiegellagen ohne Beeinflussung der Strömung messen lassen, ist es für die meisten, praktischen Zwecken dienenden Modellversuche kaum möglich, Geräte zu verwenden, deren Abmessungen „naturähnlich“ sind.

Modelle sind sehr nützlich, wenn die Ergebnisse richtig beurteilt werden. Dazu gehören Kenntnisse der Physik des Vorgangs, die vielfach durch das Experiment erweitert und verbessert werden können. Das Wissen, daß Messungen im Modell und in der Natur fehlerbehaftet sind, macht erst eine Diskussion möglich und führt zur optimalen Beurteilung eines Vorgangs.

## 7. Werkstoffe und Korrosionsschutz in der Meerestechnik

### 7.1 Einleitung

Es besteht auf den Gebieten der Meeresforschung und der Meerestechnik sowie im Schiffbau ein großer Bedarf an Werkstoffen, die hinsichtlich Korrosion, Festigkeit und oft auch Dichte extremen Anforderungen gewachsen sein und auch wirtschaftlichen Ansprüchen genügen sollen. Häufig ist festzustellen, daß die zur Verfügung stehenden Werkstoffe den weitgesteckten Ansprüchen nicht in vollem Umfang entsprechen. So finden immer wieder neue Werkstoffe, die ursprünglich für andere Technologien, wie Raumfahrt, Flugzeugbau, Meerwasser-Entsalzungsanlagen oder Schiffbau, entwickelt wurden, Anwendung im Meßgerätebau für Meeresforschung und Meerestechnik.

Im folgenden sind einige der in der Meerestechnik gebräuchlichen Werkstoffe zusammengestellt und kritisch daraufhin geprüft, wie weit sie den Anforderungen in den verschiedenen Einsatzbereichen genügen. Die hier zugrundeliegenden Erfahrungen wurden vorzugsweise im Schiffbau gewonnen und sind auf den Bau von Meßgeräten übertragbar.

Wenn es auch für den Bau von Meßgeräten und Geräteträgern kaum eine ideale Kombination von Werkstoffen gibt, so kann die Beachtung der folgenden Grundsätze doch helfen, größere Mißgriffe und damit Schäden zu vermeiden.

### 7.2 Eigenschaften der gebräuchlichsten Werkstoffe

#### 7.2.1 Stähle und Gußeisen

Unlegierter Stahl (mit den Gütevorschriften nach DIN 17 100) ist der häufigste in Meerwasseranlagen und im Schiffbau verwandte Werkstoff. In Form von Blechen und Profilen wird er beim Bau von Schiffsrümpfen, Bojen, Bohrinseln, Geräteträgern und anderen Konstruktionen, die mit Meerwasser in Berührung kommen, eingesetzt.

Seine Streckgrenze liegt bei etwa 240 N/mm<sup>2</sup>. Zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit werden Schutzanstriche aufgebracht. In einigen Fällen wird unlegierter Stahl verwandt, der mit einem korrosionsbeständigeren Material, z. B. mit nichtrostendem Stahl oder Kunststoff (z. B. Plastal), plattiert ist.

Hochfeste, niedriglegierte Stähle (nach DIN 17 200 und 17 210): In den letzten Jahren sind Stähle mit geringen Legierungszusätzen, vorwiegend Nickel und Kupfer, entwickelt worden. Diese Zusätze erhöhen die Korrosionsbeständigkeit, da sich dichtere und widerstandsfähigere Schutzfilme bilden, die auch die Haftung und Lebensdauer der Schutzanstriche verbessern.

Tabelle 7.1  
Zusammensetzung einiger hochfester Stähle (IND 1968)

	C	Ni	Cr	Mo
HY- 80	0,18	2,65	1,4	0,4
HY-100	0,20	2,85	1,4	4

Tabelle 7.2  
Zusammensetzung einiger martensitaushärtbarer (Maragin) Stähle (WESSELING/VETTER, 1968)

Stahl	Mittlere Legierungsbestandteile in Gew.-%							$\sigma_{0,2}^{1)}$ [kp/mm <sup>2</sup> ] $\hat{=}$ [N/mm <sup>2</sup> ]		Bemerkung <sup>2)</sup>	Werkstoff-Nr.
	Cr	Co	Ni	Mo	Ti	Al	NB				
25 Ni	-	-	25,5	-	1,5	0,2	0,4	170	1700		
20 Ni	-	-	19	-	1,5	0,2	0,4	170	1700		
X2 Ni Co Mo 18 8 3	-	8,0	18	3,5	0,2	0,1	-	140	1400	18 Ni 200	1,6359
X2 Ni Co Mo 18 8 5	-	8	18	4,8	0,45	0,1	-	180	1800	18 Ni 280	
X2 Ni Co Mo 18 9 5	-	9	18	4,8	0,8	0,1	-	210	2100	18 Ni 300	
X2 Ni Cr Mo 12 5 3	4,6	-	12	3	0,25	0,3	-	115	1150		
	Sonstige Gehalte (max.)										
	C	Si	Mn	P	S						
	0,030	0,10	0,10	0,010	0,010						

<sup>1)</sup> In ausgehärtetem Zustand

<sup>2)</sup> Bezeichnungweise in den USA

Aus der Streckgrenze von etwa 350 N/mm<sup>2</sup> ergibt sich gegenüber unlegierten Stählen eine Gewichtseinsparung, die zu beachtlichen wirtschaftlichen Vorteilen führen kann.

**Hochfeste Stähle HY-80 und HY-100** (ohne deutsche Normung): Diese neuen Stahlsorten sind außergewöhnlich widerstandsfähig gegenüber Rißbildung sowie Rißausbreitung und haben eine Streckgrenze von mindestens 560 bzw. 700 N/mm<sup>2</sup>. Sie eignen sich daher als Material für Druckkörper und wurden für den U-Boot-Bau entwickelt. Die Zusammensetzung der Beimengungen in Gew.-Prozent ist der Tabelle 7.1 zu entnehmen.

**Martensitaushärtbare Stähle** (nicht genormt): Die martensitaushärtbaren Stähle vereinen eine sehr hohe mechanische Festigkeit mit einer guten Zähigkeit und Schweißbarkeit. Sie werden als Guß oder Walzstahl geliefert und erhalten ihre volle Festigkeit nach einer einfachen Wärmebehandlung ohne Abschreckung. Ihre Streckgrenze reicht bis 2100 N/mm<sup>2</sup>, und sie lassen sich im wärmebehandelten Zustand bearbeiten. Sie werden ebenfalls für Druckkörper in Unterseebooten und für andere, hochbeanspruchte Bauteile wie Stößel und Nocken verarbeitet. Ihre Zusammensetzung ist in Tabelle 7.2 angegeben.

**Gußeisen** (nach DIN 1693 und 1694): Die Korrosionsbeständigkeit von Gußeisen ist zwar besser als die der unlegierten Eisenwerkstoffe, meist aber noch nicht befriedigend. Deswegen wurden korrosionsbeständige, legierte Gußeisensorten entwickelt.

Nickellegiertes Gußeisen wird zunehmend für Gußstücke, die mit Meerwasser in Berührung kommen, verwendet. Nickelzusatz erhöht die Festigkeit, vermindert die Porosität und verbessert somit die Korrosionsbeständigkeit.

Gußeisensorten mit Kugelgraphit (nach DIN 1693) haben eine größere Festigkeit, sind gut zu gießen und leicht zu bearbeiten. Aufgrund der gegenüber reinem Gußeisen mit Lamellengraphit verbesserten Dehnbarkeit und Schlagfestigkeit werden sie für Fundamentplatten, Ventilgehäuse und Rohrleitungen verwendet.

Gußeisensorten (nach DIN 1694) mit Nickelgehalten von 12 bis 36 % weisen eine austenitische Matrix auf und korrodieren in Meerwasser nur wenig und mit gleichmäßigem Abtrag. Mit Kugelgraphit zeigen sie neben hoher Festigkeit zusätzlich eine gute Zähigkeit.

### 7.2.2 Rost- und säurebeständige Stähle (nach DIN 17 440)

**Stahlguß:** Nichtrostender Stahlguß vom AISI-Typ 316 (18 % Cr, 10 % Ni, 3 % Mo) sowie vom AISI-Typ 304 (18 % Cr, 10 % Ni) wird u. a. für Schiffsschrauben und Pumpenräder verwendet.

**Walz- und Schmiedestähle:** Aus Tabelle 7.3 kann bei Gegenüberstellung von amerikanischen, englischen und deutschen Werkstoffbezeichnungen einiger Metalle deren Zusammensetzung entnommen werden. Nichtrostender Stahl vom AISI-Typ 304 ist in langsam strömendem Meerwasser (s. Abb. 7.1) anfällig für Lochfraß. Oftmals bilden sich in ihm tiefe Löcher, wenn er längere Zeit nicht gereinigt wird. Dieser Stahl findet häufig Verwendung für Drahtseile. Durch Plattieren mit einer Kupfer-Nickel-Legierung 90/10 kann die Lebensdauer in Meerwasser verlängert werden.

Beständiger ist nichtrostender Stahl vom AISI-Typ 316. Er wird daher als Werkstoff für Schrauben und Bolzen sowie für Schlammsiebe und Kondensatorrohre (insbesondere in Kraftwerken) verwendet. Werden diese Kondensatorrohre durch die hohe Strömungsgeschwindigkeit oder durch regelmäßige Reinigung sauber gehalten, so kann eine gute Haltbarkeit erwartet werden. Bleiben die Rohre aber mit stehendem Wasser gefüllt, ist mit Lochfraß zu rechnen.

Der nichtrostende Stahl „Alloy 20“ (29 % Ni, 20 % Cr, 2 % Mo, 3 % Cu, Rest Fe) besitzt die größte Beständigkeit gegenüber Lochfraß- und Spaltkorrosion. Besonders bewährt haben sich für den Bau von Druckkörpern, Bolzen, Schrauben, mechanischen Elementen usw. im Gerätebau die Werkstoffe nach DIN 17 440. Hierfür wird im allgemeinen Sprachgebrauch häufig die Typenbezeichnung V2A und V4A der Firma Krupp verwandt, obwohl auch andere Firmen diese Werkstofftypen herstellen. Die Zusammensetzung ist der Tabelle 7.4 zu entnehmen. Schrauben mit den Bezeichnungen A2 und A4 haben entsprechende Zusammensetzungen. Konstruktionselemente aus Federdraht, die mit Seewasser in Berührung kommen, sollten aus Material mit der Werkstoff-Nr. 1.4310 gefertigt sein.

### 7.2.3 Kupfer und seine Legierungen (nach DIN 17 660)

**Kupfer** ist gegenüber Meerwasser recht beständig und nicht anfällig für Bewuchs. Deshalb wird es häufig als Abdeckung von Sensoren verwandt. Bei Strömungsgeschwindigkeiten von mehr als 0,9 bis 1,2 m/s (s. Abb. 7.7) kann allerdings Lochfraß auftreten.

**Messing** (Ms 58, inzwischen auch CuZn 39 Pb 2 und 3, CuZn 40 Pb 2 und 3 und CuZn 41 Pb 2): Diese Legierungen werden vorwiegend im Apparatebau verwendet. Sie sind je nach Legierungsbestandteilen gering kaltverformbar, warm verformbar, stanzbar, gravierbar und vor allem dreh- und fräsbearbeitbar. Aufgrund dieser Eigenschaften sind sie im Trockenbereich der Hauptbestandteil mechanischer Geräteteile. Durch Erhöhung des Kupfergehaltes von 58 % auf über 60–95 % nimmt die Kaltverformbarkeit mit den sich daraus ergebenden Fertigungsmöglichkeiten zu wie Drücken, Prägen, Nieten, Bördeln, Stauchen usw.

**Sondermessing** (SoMs 76, inzwischen auch CuZn 20 Al): Mit den Bestandteilen von Cu 76 % bis 79 %, Al 2 % sowie Beimengungen von Ni, Fe, Mn, P, Pb und As von zusammen fast 1 % und dem Rest aus Zink entsteht eine Legierung, die zu Rohren oder Rohrböden für Kondensatoren und Wärmetauscher verarbeitet und auch im Bereich meereswasserführender Leitungen verwendet wird. SoMs 59 (CuZn 35 Ni) und SoMs 60 (CuZn 39 Sn) besitzen eine mittlere bis hohe Festigkeit. Sie werden als Konstruktionswerkstoffe im Apparatebau sowie im Schiffbau eingesetzt.

Tabelle 7.3  
Gegenüberstellung amerikanischer, englischer und deutscher Werkstoffbezeichnungen (IND 1968)

Stähle										
amerikanische bzw. englische Bezeichnung	Zusammensetzung in Gew.-%									entspricht weitgehend dem deutschen Werkstoff (weigt. n. DIN 17440)
	C max.	Mn max.	P max.	S max.	Si max.	Cr	Ni	Mo	Sonstige	
AISI-Typ 301	0,12	2,0	0,045	0,03	1,0	16...18	7...9	-	-	1.4310 X 12 CrNi 17 7
AISI-Typ 302	0,12	2,0	0,045	0,03	1,0	17...19	8...10	-	-	1.4300 X 12 CrNi 18 8
AISI-Typ 304	0,07	2,0	0,045	0,03	1,0	17...20	8,5...10	-	-	1.4301 X 3 CrNi 18 9
AISI-Typ 304L	0,03	2,0	0,045	0,03	1,0	17...20	10...12,5	-	-	1.4306 X 2 CrNi 18 9
AISI-Typ 305	0,12	2,0	0,045	0,03	1,0	17...19	10...13	-	-	-
AISI-Typ 316	0,07	2,0	0,045	0,03	1,0	16,5..18,5	11,5...14	2,0...3,0	-	1.4436 X 5 CrNiMo 18 12 (1.4401) (X 5 CrNiMo 18 10)
AISI-Typ 316L	0,03	2,0	0,045	0,03	1,0	16,5..18,5	11...14	2,0...3,0	-	1.4404 X 2 CrNiMo 18 10
AISI-Typ 321	0,10	2,0	0,045	0,03	1,0	17...19	9...11,5	-	Ti mind. 5 x C	1.4541 X 10 CrNiTi 18 9
AISI-Typ 347	0,10	2,0	0,045	0,03	1,0	17...19	9...11,5	-	Nb-Ta mind. 8 x C	1.4530 X 10 CrNiNb 18 9
AISI-Typ 405	0,08	1,00	0,045	0,03	1,00	12,0..14,0	-	-	Al 0,10...0,30	1.4002 X 7 CrAl 13
AISI-Typ 410	0,15	1,00	0,045	0,03	1,00	12,0..14,0	-	-	-	1.4006 X 10 Cr 13
AISI-Typ 430	0,10	1,00	0,045	0,03	1,00	15,5..17,5	-	-	-	1.4016 X 8 Cr 17
Alloy 20	0,07	-	-	-	-	20	29	>2	Cu > 3	nicht genormt
HY-80	0,18	0,1...0,4	0,025	0,025	0,15..0,35	1,0...1,8	2,0...3,25	0,21	Cu 0,25 Ti 0,02 V 0,03	nicht genormt
HY-100 martensit-aushärtbare Stähle	0,28 0,03	0,30 0,10	- 0,01	- 0,01	0,25 0,01	1,40 -	3,0 18	0,40 5	- 7 Co, Ti Al, B, Zr	nicht genormt 1.6359 X 2 NiCoMo 18 8 5
0,03	0,10	0,008	0,008	0,10	5	12	3	Al, Ti	nicht genormt	
Unlegierte Stähle und Gußeisensorten										
amerikanische bzw. englische Bezeichnung	entspricht weitgehend dem deutschen Werkstoff				amerikanische bzw. englische Bezeichnung	entspricht weitgehend dem deutschen Werkstoff				
unlegierter Stahl und Stahlguß	siehe DIN 17 100 siehe DIN 1681				Gußeisen mit Kugelgraphit (Sphäro-Guß)	siehe DIN 1693				
hochfester niedriglegierter Stahl	siehe DIN 17 200 und 17 210				austenitisches Gußeisen	siehe DIN 1694				
Gußeisen mit Lamellengraphit	siehe DIN 1691									
Nickellegierungen (säure- und hitzebeständig)										
amerik. bzw. engl. Bezeichnung	Zusammensetzung in Gew.-%									entspr. weitgeh. d. dtsh. Werkst.
	Ni	Cr	Cu	Mo	Ti	Fe	W	C	Sonstige	
Nickel-Eisen-Chrom-Legierung 825	38,0... 46,0	19,5... 23,5	1,5... 3,0	2,5... 3,5	0,6... 1,2	Rest	-	0,05	Mn 1,0; Al 0,2 Si 0,5; S 0,03	NiCr 21 Mo W.-Nr. 1.4865
59% Nickel-Molybdän-Chrom-Legierung	mind. 52,0	14,0... 18,0	0,5	15,0... 18,0	-	4,0... 7,0	3,0... 5,0	0,1	Mn 1,0; Si 1,0 V 0,35 Sonstige: zusammen 0,1	NiMo 16 Cr W.-Nr. 2.4078
Nickel-Kupfer-Legierung 400	mind. 63,0	-	28,0... 34,0	-	-	1,0... 2,5	-	0,16	Al 0,5; Mn 1,25 S 0,02; Si 0,5 Sonstige: zusammen 0,1	NiCu 30 Fe
Nickel-Kupfer-Legierung K 500	mind. 63,0	-	27,0... 34,0	-	0,3... 1,0	0,5... 2,0	-	0,25	Mn 1,5; S 0,01 Si 0,1 Sonstige: zusammen 0,1	NiCu 30 Al

Tabelle 7.4  
Zusammensetzung einiger rost- und säurebeständiger Stähle (IND 1970)

Rost- und säurebeständige Stähle	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Sonst.	Werkst.-Nr.
V2A X 5 Cr Ni 189	0,07	1	2	0,045	0,03	17-20		8,5-10		1.4301
V4A X 10 Cr Ni Mo Ti 1810	0,1	1	2	0,045	0,03		2-2,5	10,5-13,5	5 × % C	1.4571

**Kupfer-Zinn-Legierung** (nach DIN 17 662): Legierungen dieser Art werden auch als Zinnbronze bezeichnet. Es werden hierbei besonders zwei Legierungen angewandt. Die Legierung CuSn 2 (1,0-2,5 % Sn, Rest Kupfer) wird zum Bau von Rohren und stromleitenden Federn in Relais verwendet. Aus der Legierung CuSn 6 (5,5-7,5 % Sn, Rest Kupfer) werden u. a. neben stromleitenden Federn auch Federrohre für Druckmeßgeräte und Membranen gefertigt.

**Kupfer-Nickel-Zink-Legierung** (nach DIN 17 663): Legierungen dieser Art sind auch als Neusilber bekannt. Wegen ihrer ausgezeichneten Bearbeitbarkeit und der hohen Korrosionsbeständigkeit wird vor allem die Legierung CuNi 12 Zn 30 Pb im feinmechanischen und optischen Geräteteil verwandt. Die Legierung besteht aus 56-58 % Cu, 11-13 % Ni, 0,5-2 % Pb und dem Rest aus Sn.

**Kupfer-Nickel-Legierung** (nach DIN 17 664): Die Legierungen 90/10, 80/20 und 70/30 (Tab. 7.5) sind bewährte Kondensatorwerkstoffe. Da sie gute Schweißbarkeit mit ausgezeichnetem Widerstand gegen Erosion, Kavitation und Korrosion verbinden, finden sie besonders im Schiffbau, in der Meerwasserentsalzung sowie im Apparatebau Verwendung.

**Guß-Zinnbronze und Rotguß** (nach DIN 1705): Neben dem weiten Bereich des Schiffbaus (Gleitlager, Kupplungen, Turbinenbau usw.) werden besonders im Apparatebau Formteile aus den Rotgußsorten Rg 5, Rg 7 und Rg 10 aus Form-, Schleuder- oder Strangguß gefertigt. Durch den Zusatz von 2 % Ni kann für Teile, die mit dem Meerwasser in Berührung kommen, das Verschleiß- und Korrosionsverhalten verbessert werden.

**Guß-Messing und Guß-Sondermessing** (nach DIN 1709): Bei diesem Material handelt es sich um legierte Kupfer-Zink-Werkstoffe für die Herstellung von Schiffschrauben und Armaturen. Dieser zähnharte Werkstoff G-SoMs F 45 mit hoher Festigkeit ist zusammengesetzt aus: Cu 55-68 %, Al bis 2,5 %, Fe bis 2 %, Mn bis 3 %, Ni bis 2 %, Rest Zn.

**Guß-Aluminiumbronze und Guß-Mehrstoff-Aluminiumbronze** (nach DIN 1714): Diese Werkstoffe besitzen neben ihrem Hauptanteil Cu von ca. 73-80 % unterschiedlich hohe Anteile von Al, Fe, Ni und Mn. Die dadurch erreichbare ansteigende Materialhärte bei erhöhter Meerwasser- und Korrosionsbeständigkeit macht sie u. a. in den

Tabelle 7.5  
Zusammensetzung einiger Kupfer-Nickel-Legierungen (DIN 1969)

	Cu	Ni	Fe	Mn
90/10 Cu Ni 10 Fe	Rest	10	1-1,8	0,5-1
80/20 Cu Ni 20 Fe	Rest	20	0,5-1	0,5-1,5
70/30 Cu Ni 30 Fe	Rest	30	0,4-1	0,5-1,5

Bereichen Schiffbau, Chemie und Apparatebau (Schnecken, Zahnräder, Gleitlager, Turbinenschaufeln usw.) verwendbar.

#### 7.2.4 Nickel-Knetlegierungen

Legierungsbestandteile Chrom und Molybdän (nach DIN 17 742): Der Werkstoff NiMo 16 Cr (durchschnittlich 59 % Ni, 16 % Mo, 16 % Cr, 5 % Fe und 4 % W) ist aufgrund von über 20jährigen Versuchen als absolut beständig gegenüber Meerwasser anzusehen und daher besonders für den Apparatebau und ähnliche Bereiche geeignet.

Legierungsbestandteil Kupfer (nach DIN 17 743): Die ausgezeichnete Beständigkeit des Werkstoffes NiCu 30 Fe (durchschnittlich 63 % Ni, 31 % Cu, 1,5 % Fe) hat zu einer weiten Verbreitung in der Meerestechnik geführt. So werden daraus z. B. Pumpen und Fischereiseile, Ventilbausteine und Propellerwellen hergestellt.

Legierungsbestandteil Eisen (nach DIN 17 745): Die Erhöhung des Legierungsbestandteiles Eisen auf 14–53 % führt zu einer Magnetisierbarkeit des weichmagnetischen Werkstoffes. Er wird daher bei meeres technischen Meßgeräten (Relais, Abschirmungen, Drosseln usw.) verwandt.

#### 7.2.5 Aluminiumlegierungen (nach DIN 1725)

In der Meerestechnik und im Schiffbau werden hauptsächlich die Knetlegierungen AlMg 3, AlMg 5 und AlMg 4,5 Mn (3–5 % Mg und 0,5–1 % Mn) in Form von Blechen, Bändern und Rohren sowie als Guß verwandt, weil sie im allgemeinen eine gute Korrosionsbeständigkeit mit genügender Festigkeit, Verformbarkeit und Schweißbarkeit verbinden.

Eine hochwertige Eloxalschicht bzw. eine geeignete Spritzlackierung mit vorangegangener Sandstrahlung erhöhen die Beständigkeit der Oberfläche gegen Lochfraß und Spaltkorrosion. Schwermetalle wie Cu, Ni und Fe erhöhen zwar die Festigkeit dieser Legierung, vermindern aber ihre Korrosionsfestigkeit gegenüber chloridhaltigem Wasser. Die Flächenkorrosion ist bei allen Aluminiumlegierungen ähnlich groß und kann durch geringe Zusätze von Chrom und Mangan verringert werden.

#### 7.2.6 Titanlegierungen

Titan wird wegen seines geringen Gewichtes bei großer Festigkeit und langer Standzeit in Form von Blechen, Stangen, Profilen und Rohren hauptsächlich in der Raumfahrt, im Flugzeugbau und im U-Boot-Bau verwendet.

Titan und seine Legierungen zeichnen sich durch eine außergewöhnliche Haltbarkeit in Meerwasser, selbst bei höheren Temperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten, aus. Es kann von einer sehr großen Lebensdauer ausgegangen werden, was für besondere Anwendungsfälle den vergleichsweise hohen Materialpreis und die schwierigen Fertigungsmethoden rechtfertigt.

Im Forschungsbereich Meerestechnik gewinnt Titan trotz hoher Kosten zunehmend an Bedeutung für den Bau von Druckkörpern – Sonden und U-Boote –, da trotz großer Einsatziefen wegen des geringen Gewichtes eine gute Handhabung erhalten bleibt. So haben Titanlegierungen Streckgrenzen bis etwa 1050 N/mm<sup>2</sup> und eine um 40 % niedrigere als Stahl.

## 7.2.7 Nichtmetallische Werkstoffe

Als nichtmetallische Werkstoffe sind in erster Linie Kunststoffe zu nennen, die vorwiegend aus Erdöl und Erdgas gewonnen werden und damit

- in ihren wesentlichen Bestandteilen organischer Natur sind,
- aus Makromolekülen aufgebaut sind oder
- durch Umwandlung von Naturprodukten oder durch Synthese entstehen.

Die so entstandenen Werkstoffe werden eingeteilt in: Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere.

**Thermoplaste** werden aus langen Kettenmolekülen gebildet und sind bei Raumtemperatur spröde oder zähelastisch. Sie lassen sich ohne chemische Veränderung durch Erwärmen erweichen.

**Duroplaste** werden aus räumlich eng vernetzten Molekülen gebildet und sind bei Raumtemperatur hart und spröde. Sie zersetzen sich beim Erwärmen, ohne weich zu werden oder zu schmelzen.

**Elastomere** sind bei Raumtemperatur gummielastisch. Sie zersetzen sich oberhalb eines bestimmten Temperaturbereiches.

Für die Anwendung im Seewasser spielen folgende Materialien eine wesentliche Rolle:

**Polyvinylchlorid - PVC:** Dieses preiswerte Material in Stangen-, Rohr- und Plattenform wird wegen seiner guten mechanischen Bearbeitbarkeit einschließlich der Schweißarbeit bei genügenden Festigkeitseigenschaften für die Herstellung beweglicher und statischer Konstruktionsteile sowie von Tanks und Druckgehäusen häufig verwandt. Die Halbzeuge werden in Rot und Grau geliefert.

Weiterhin ist dieses Material als Hartschaum (Conticell) auf dem Markt und läßt sich bei hervorragender Bearbeitbarkeit und geringem spezifischem Gewicht zu Auftriebskörpern in jeder Form für SONDENSYSTEME bis in Tiefen von mehreren 100 m einsetzen.

**Plexiglas (Polymethylmethacrylat - PMMA):** Dieses glasklare, optisch verzerrungsfreie Material findet Anwendung als Deckscheibe in Gehäusen. Da es sich bei Wärmeanwendung leicht formen läßt, lassen sich aus Plattenmaterial Rahmen, Abdeckungen und ganze Gehäuse für geringe Einsatziefen leicht herstellen. Als Verbindungsmittel dient ein Acrylharzkleber, der durch Einwirkung des UV-Anteils im Licht innerhalb einiger Stunden bei Raumtemperatur aushärtet.

**Teflon (Polytetrafluoräthylen - PTFE):** Wegen seiner Formbeständigkeit durch keinerlei Wasseraufnahme und seiner ausgezeichneten Gleiteigenschaften wird dieses Material überall dort als Dichtung, Hahnküken, Spindel oder als Lager eingesetzt, wo es gilt, die ohnehin geringen Reibungswerte der meisten Kunststoffe innerhalb des Seewassers noch weiter zu vermindern. Dabei wird durch die äußerst dichte und glatte Oberfläche ein Bewuchs und das Absetzen von anderen Fremdstoffen besonders erschwert.

**Ultramid S (Polyamid - PA):** Die große Zähigkeit dieses Werkstoffes macht ihn für alle hochbeanspruchten Teile wie Gestänge, Getrieberäder, Zahn- und Nockenräder sowie für Schrauben, Muttern, Bolzen und Scheiben geeignet. Die verhältnismäßig geringe Wasseraufnahme ist dabei in der Regel unbedeutend und muß ggf. konstruktiv bei Passungsmaßen berücksichtigt werden.

**Makrolon (Polycarbonat - PC):** Die ausgezeichnete Formbeständigkeit (bei Umgebungstemperaturen bis 130 °C), die hohe Schlagzähigkeit und der große E-Modul machen dieses fast glasklare Material als Formmasse zu einem ausgezeichneten Ausgangswerkstoff für Halbzeuge und Formteile überall dort, wo eine wirtschaftliche Fertigung aufgrund entsprechender Serienteile gegeben ist.

**Kunststoffbeschichtungen:** Überall dort, wo sich die Festigkeitseigenschaften von Metall und die Korrosionsbeständigkeit von Kunststoff vereinigen lassen, wird das Metall mit einer Kunststoffschicht versehen. Das geschieht einmal durch Aufwalzen oder Aufpressen einer Folie unter gleichzeitiger Wärmeeinwirkung auf das metallische Trägermaterial (Bleche für Kästen, Gehäuse oder Zwischenwände). Ein anderes Verfahren ist das Beschichten mit Pulver bei anschließender Wärmebehandlung, so daß das geschmolzene Pulver auch hier den Träger mit einer homogenen Haut umkleidet (Rohr- und Stabkonstruktionen mit schwer zugänglichen Zonen).

**Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK):** Diese Kunststoffe sind Verbundwerkstoffe aus Reaktionsharzmassen und textilen Glasfasern. Die für Verstärkungszwecke verwendeten textilen Fasern sind nach DIN 61 850 genormt. Sie werden als Glasseide oder als Glasstapelfasern hergestellt. Die einzelnen GFK-Werkstoffe besitzen voneinander abweichende Eigenschaften, die durch das Harzsystem, die Art und Ausrichtung der Verstärkungsmaterialien, die Tränkmethode, den Glasanteil, die Reaktions- und Verarbeitungsbedingungen usw. bestimmt werden.

Bei sorgfältiger Abstimmung aller Faktoren lassen sich Verbundwerkstoffe unterschiedlicher mechanischer Festigkeit, Steifigkeit, Ermüdungs- und Schlagfestigkeit herstellen und damit einem speziellen Verwendungszweck anpassen. Folgende Arten der Glasfaserverstärkung werden unterschieden:

**Endlosfäden** sind Einzel- und Mehrfachfäden, die, von einer Haspel abgewickelt und in beliebiger Richtung verlegt, ein Verbundmaterial mit entsprechend gerichteter Festigkeit ergeben.

**Gewebe** wird aus Garnen hergestellt und besitzt unterschiedliche Gewichte von 300 bis 15 000 g/m<sup>2</sup> und Fadendicken von 0,08 bis 1,15 mm. Bei bidirektionaler Anordnung läßt sich eine doppelt so große Festigkeit erreichen wie bei parallel angeordneten Fäden. Der Glasgehalt liegt zwischen 65 und 75 %.

**Gewebte Rovings** werden aus Einzelfäden zu groben, schwer faltbaren Geweben verwebt. Diese billigen Gewebe besitzen eine hohe Festigkeit und bilden daher ein günstiges Preis-Leistungs-Verhältnis. Der Glasgehalt beträgt 40 bis 70 % bei einer Fadendicke von 0,9 bis 3,8 mm und einem Gewicht von 480 bis 12 000 g/m<sup>2</sup>.

**Stapelglasseide** besteht aus kleinen Rovingsstücken zwischen 1 und 13 mm. Die 13 mm langen Teile werden für großflächige Teile mittlerer Festigkeit, die Kurzfasern bei Teilen mit unterschiedlichen Querschnitten und mäßiger Festigkeit verwendet. Durch die Kürze sind diese Fasern für eine Verarbeitung mit der Spritzpistole geeignet.

Die für die Verbindung der Glasfasergewebe erforderlichen **Reaktionsharzmassen** nach DIN 16 946 werden ständig weiterentwickelt, um optimale mechanische, dielektrische, chemische, flammenbeständige oder auch nur verarbeitungsgünstige Eigenschaften in Verbindung mit dem Träger zu erreichen. Es werden vor allem die traditionellen Duomare wie Polyesterharze, Epoxidharze und Phenolharze eingesetzt. Zu den in letzter Zeit immer häufiger angewendeten Thermoplasten zählen Polyamide, Polycarbonate, Polystyrol oder Polyolefine.

Auch sollen die Katalysatoren Benzoylperoxid und Laurylperoxid zur Beeinflussung günstiger Verarbeitungsbedingungen wie Temperatur, Betriebsdruck, Topfzeit, Gelierungs- und Härtezeit sowie Witterungscharakteristika oder die Zugabe von Pigmenten zur Einfärbung nicht unerwähnt bleiben.

Die **Herstellungsverfahren** richten sich nach den geforderten Eigenschaften der Form und Stückzahl. Während bei Massenanfertigungen und genauen Abmessungen vorzugsweise ein Preßverfahren in geschlossenen Formen angewandt wird, werden Einzel-

teile, wie z. B. in der Meerestechnik, je nach Größe und Form im Spritz- oder auch Handverfahren hergestellt. Dabei lassen sich Metall- und andere Bauteile mit einarbeiten.

Das Endprodukt kann mit einem Glasanteil von z. B. 30 % Gew.-% einen E-Modul von rund  $10^4$  N/mm<sup>2</sup> bei einer Dichte von rund 1,45 g/cm<sup>3</sup> und damit die Festigkeitseigenschaften von Leichtmetallen erreichen.

## 7.3 Korrosion

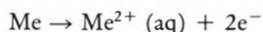
### 7.3.1 Korrosionsarten

Nach DIN 50 900 ist in der Metallurgie die Korrosion als „Zerstörung von Metall durch chemische oder elektrochemische Reaktionen mit seiner Umgebung“ definiert. Die meisten Gebrauchsmetalle sind in Anwesenheit von Sauerstoff und Feuchtigkeit unbeständig und können in ihre chemischen Verbindungen übergehen. Aufschluß über die Potentialdifferenzen einiger Metalle gegenüber der Normal-Wasserstoffelektrode und der Normal-Kalomelektrode gibt die Tabelle 7.6.

In der Elektrochemie werden Metalle mit einem positiven Potential als „edel“ und solche mit einem negativen Potential als „unedel“ bezeichnet. Als Faustregel kann für ihr Korrosionsverhalten gesagt werden, daß ein Metall im allgemeinen um so stärker korrodiert wird, je negativer sein Potential ist. Einen weiteren Einfluß stellt die Leitfähigkeit bzw. der Salzgehalt (Seewasser) der umgebenden Flüssigkeit dar. Je mehr Ionen vorhanden sind, desto schneller verläuft die Korrosion.

Im Gegensatz zu Nichtleitern wie Gasen, organischen Stoffen u. a., bei denen sich weitgehend chemische Vorgänge abspielen, handelt es sich bei Korrosionen an Metallen um einen elektrochemischen Prozeß, wenn ein Medium wie Seewasser als Elektrolyt mit der Eigenschaft, Ionen des korrodierenden Metalls aufzunehmen, daran beteiligt ist.

Damit überhaupt eine Korrosion entstehen kann (Abb. 7.2), ist eine Oxydation des Metalls als anodischer Teilvorgang mit



um eine Reduktion des Elektrolyten als kathodischer Teilvorgang von Wasserstoffionen mit



notwendig. Es bedeuten dabei:

Me = Metall

Me<sup>2+</sup> (aq) = zweiwertiges, hydrolysiertes Metallion in der Lösung

e<sup>-</sup> = vom Metall abgegebenes Elektron

Für die meisten Korrosionsvorgänge ist die Elementbildung die eigentliche Ursache. Lokalelemente mit Größen < 0,01 mm<sup>2</sup> können bei leitender Verbindung zwischen Korngrenzen, edleren und unedleren Legierungselementen, Deckschicht und Grundmetall, bearbeiteter und unbearbeiteter Stelle und an der Grenze eines belüfteten zu einem unbelüfteten Elektrolysevorgang entstehen. Auch Kristallbaufehler in sonst völlig homogenen Metallen können zu Oberflächenkorrosionen führen.

Die allgemeine abtragende Korrosion kann durch Wägung ermittelt und ihre Größe in µm/Jahr umgerechnet werden. Typische Korrosionsgeschwindigkeiten für die wichtigsten Werkstoffe können aus Abb. 7.3 entnommen werden.

Während die Korrosionsschichten bei Chrom, Nickel und Aluminium eine Passivierung der Metalloberfläche und damit einen gewissen Schutz gegen z. B. Seewasser bewirken,

können ungleichmäßige oder nur locker haftende Korrosionsschichten (z. B. bei Eisen) zu einer vergrößerten Oberfläche des Metalls und zu zusätzlichem Lochfraß führen (Tab. 7.7).

Ursache für diese örtlich begrenzte, aber sehr schnell zu Löchern führende Korrosion, die

Tabelle 7.6  
Normalpotentiale einiger Metalle (Aluminium AG., Neuhausen/Rheinfall)

Metall	Normalpotential gegen Wasserstoff (ohne Passivierung) Volt	Normalpotential bezogen auf Aluminium (ohne Passivierung) Volt
Magnesium	- 2,34	- 0,65
Reinaluminium	- 1,69	0
Zink	- 0,76	+ 0,93
Eisen	- 0,43	+ 1,26
Kadmium	- 0,42	+ 1,27
Kupfer	+ 0,35	+ 2,04

Lösungspotentiale metallischer Werkstoffe

Metall	Potential gegen die Normal- Kalomelektrode, gemessen in luftgesättigter 2 % NaCl- Lösung (Richtwerte) Millivolt	Potential gegen Reinaluminium 99,5 in luftgesättigter 2 % NaCl-Lösung (Richtwerte) Millivolt
Magnesium	- 1600	- 850
Zink	- 1050	- 300
AlZn 4 Mg 1	- 1000	- 250
AlZn 1	- 900	- 150
AlMg 5	- 800	- 50 bis - 40
AlMg 3	- 780	- 30 bis - 20
AlZnMgCu	- 770	- 20 bis - 10
AlMgMn	- 760	- 10 bis 0
Reinaluminium 99,5 %	- 750 bis - 760	0
AlMgSi	- 750	0 bis + 10
AlMn	- 740	+ 10 bis + 20
Kadmium	- 740 bis - 760	0 bis + 20
GAISI 12	- 700 bis - 730	+ 30 bis + 60
GAICu 4	- 650	+ 100
Eisen	- 650	+ 100
AlCuMg, kaltausgehärtet	- 580 bis - 600	+ 150 bis + 180
Blei	- 480 bis - 500	+ 250
Zinn	- 450 bis - 470	+ 300
Messing (50 % Zn)	- 350	+ 400
Nickel	- 270	+ 480
Messing (30 % Zn)	- 250	+ 500
Kupfer	- 200	+ 550
Silber	- 50 bis + 50	+ 700 bis + 800
Quecksilber	0	+ 750
Chromnickelstahl 1818	+ 100	+ 850
Gold	+ 220	+ 1000
Platin	+ 240	+ 1000

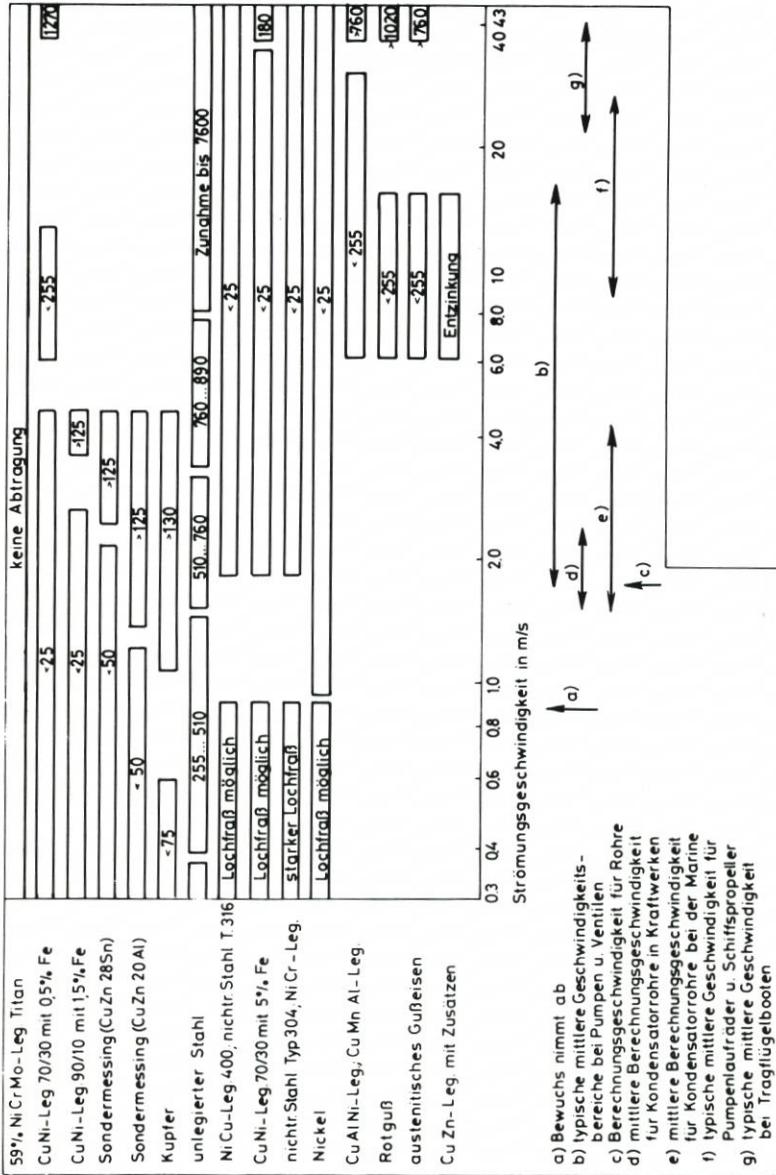


Abb. 7.1: Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit auf die Korrosion in Meerwasser. Die Zahlen geben die ungefähre Korrosionsgeschwindigkeit in m/Jahr an (IND 1968)

auch viele edlere Legierungen angreift, sind Sauerstoffkonzentrationszellen, die sich bei unterschiedlichen Temperaturen, wechselnden Strömungsgeschwindigkeiten und Bewuchs bilden können. Ähnliche Ursachen hat auch die sog. Spaltkorrosion an konstruktionsbedingten Spalten.

Wird eine Konstruktion aus verschiedenen Legierungen dem Seewasser ausgesetzt, so können ebenfalls galvanische Effekte zur Korrosion führen. Dabei gewährt das stärker korrodierende Metall dem anderen einen gewissen kathodischen Schutz. Tab. 7.6 und Abb. 7.4 zeigen unterschiedliches Verhalten der verschiedenen Legierungen.

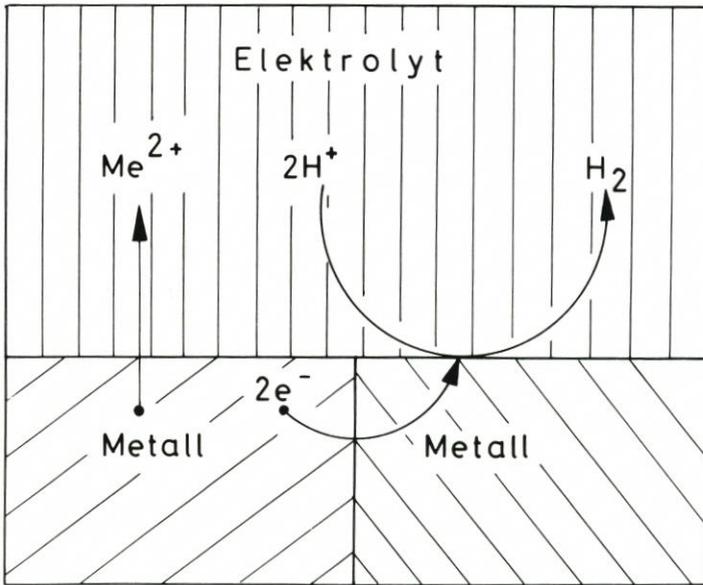


Abb. 7.2: Korrosionsvorgang zwischen zwei Metallen oder in einem Metall mit heterogenem Gefüge (Meyers Lexikon, 1969)

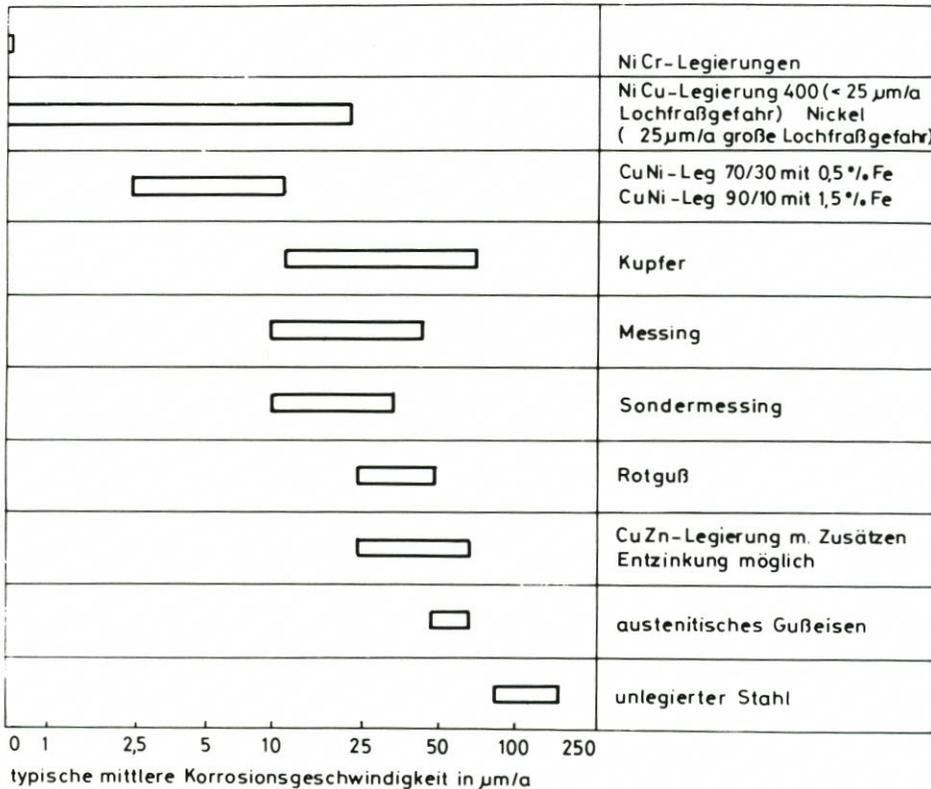


Abb. 7.3: Abtragende Korrosion verschiedener Werkstoffe in stehendem Meerwasser: Strömungsgeschwindigkeiten 0,6 m/s (IND 1968)

Tabelle 7.7

Typische Lochfraßgeschwindigkeit in stehendem Meerwasser (Strömungsgeschwindigkeit 0 bis 1 m/s)  
(IND 1968)

Werkstoffe	Lochfraß- beständigkeit	typische Lochfraß- geschwindigkeit in $\mu\text{m}/\text{Jahr}$
hochfester niedriglegierter Stahl	gering	380 ... 760
niedriggekohlter Stahl	gering	380 ... 760
Stahl mit Zunderschicht	sehr gering	510 ... 1020
Guß Eisen oder Sphäroguß	gut	100 ... 300
Kupfer	gut	150 ... 300
Blei-Zinn-Lot 60/40	ausgezeichnet	-
Messing (CuZn 15)	gut	150 ... 300
Sondermessing (CuZn 28 Sn)	gut <sup>1)</sup>	150 ... 300
Sondermessing (CuZn 20 Al)	gut <sup>1)</sup>	180
Sondermessing (CuZn 39 Sn)	gut <sup>2)</sup>	> 180
Kupfer-Aluminium-Legierung	gut	76
Kupfer-Aluminium-Nickel-Legierung	gut	50 ... 230
hochfeste Kupfer-Zink-Legierung (Sondermessing)	gut <sup>2)</sup>	250 ... 280
Kupfer-Silicium-Legierung	gut	180 ... 360
Kupfer-Zinn-Legierung	gut	130 ... 250
Kupfer-Zinn-Legierung mit Bleizusatz	gut	130 ... 380
Kupfer-Zinn-Nickel-Legierung	gut	20 ... 50
Kupfer-Nickel-Legierung 90/10 (CuNi 10 Fe)	gut	25 ... 130
Kupfer-Nickel-Legierung 70/30 (CuNi 30 Fe)	gut	25 ... 130
Nickel-Molybdän-Chrom-Legierung (NiMo 16 Cr)	ausgezeichnet	-
Nickel-Kupfer-Legierung 400 (NiCu 30 Fe)	gering <sup>3)</sup>	130 ... 380
Eisen-Nickel-Chrom-Legierung	sehr gering <sup>3)</sup>	1530
nichtrostender Stahl Typ 304L	sehr gering <sup>3)</sup>	1780
nichtrostender Stahl Typ 316	gering <sup>3)</sup>	1530 ... 1780
Alloy 20 (nichtrostender 29%-Nickelstahl)	gut <sup>3)</sup>	180
austenitisches Gußeisen	gut	50 ... 100

<sup>1)</sup> Ohne Zusatz von Inhibitoren wie Antimon, Arsen, Phosphor empfindlich gegen Entzinkung.

<sup>2)</sup> Eine Entzinkung wird durch Zusatz von Zinn verringert.

<sup>3)</sup> Bei Strömungsgeschwindigkeiten > 1,5 m/s ist die Lochfraßbeständigkeit gut bis ausgezeichnet und die Korrosionsgeschwindigkeit < 2,5  $\mu\text{m}/\text{Jahr}$ . Die Werte können um  $\pm 200\%$  streuen. Dies ist für diese Korrosionsart typisch.

Liegt ein bevorzugter Korrosionsangriff an einer Legierungskomponente vor, so spricht man von **selektiver Korrosion**. Typische Beispiele sind:

- Graphitkorrosion bei weißem Gußeisen (Entgraphitierung),
- Entzinkung bei Kupfer-Zinn-Legierung,
- Entaluminierung bei Kupfer-Aluminium-Legierung.

Eine spezielle Art der Korrosion entsteht bei bestimmten Kombinationen von Spannungen in korrodierenden Medien. Ähnlich wie bei Kristallbaufehlern in reinen Metallen können **Spannungsrißkorrosionen** vorzugsweise in Legierungen durch Verformungen (Schweißen, Walzen, Zug oder Biegung) entlang der Kristallgrenzen entstehen. Besonders empfindlich sind

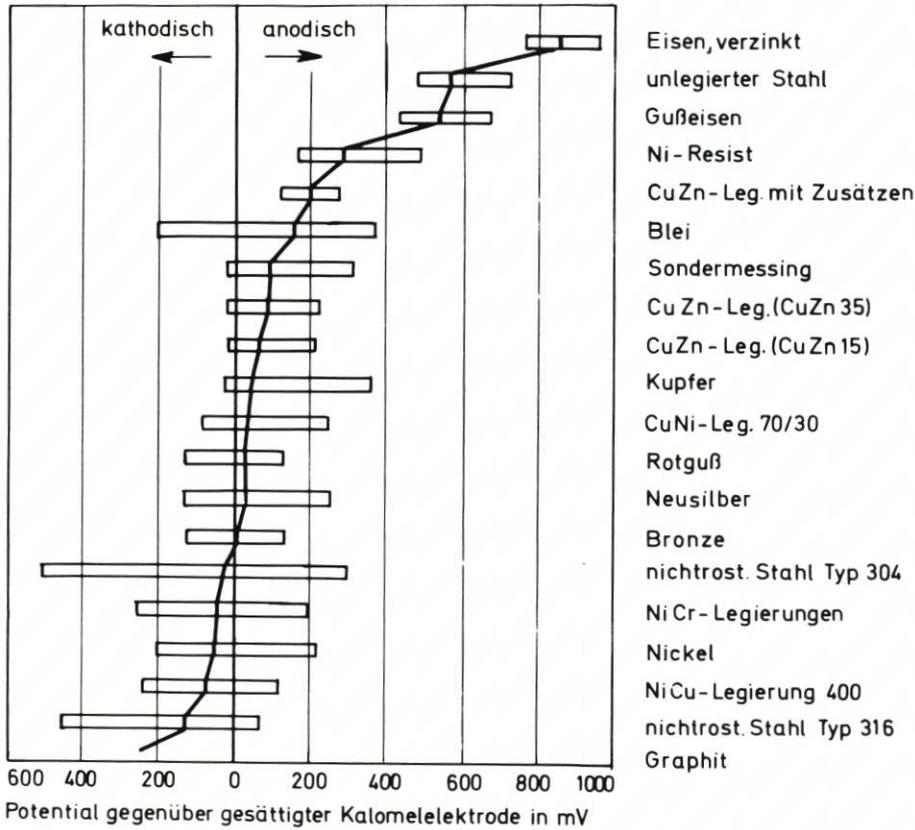


Abb. 7.4: Galvanische Reihe in Meerwasser (IND 1968)

- hochfeste Stähle in abgeschrecktem und vergütetem Zustand,
- martensitischhärtbare Stähle,
- Kupfer-Zink-Legierungen,
- austenitische, aushärtbare, nichtrostende Stähle.

Die relative Anfälligkeit gegenüber Spannungsrißkorrosion ist aus Abb. 7.5 zu ersehen.

Der Vollständigkeit halber sei noch die *K a v i t a t i o n* erwähnt, die durch Blasen- und Hohlraumbildung bei rasch rotierenden Teilen zu örtlichen, plastischen Verformungen (→ Risse, Ermüdungserscheinungen) führen kann. Korrosion und Kavitation beschleunigen sich besonders im Seewasser gegenseitig sehr stark. Eine Kavitationsbeständigkeit wird durch eine hohe Härte gegeben. In der Meßgerätetechnik ist diese Erscheinung jedoch von untergeordneter Bedeutung.

### 7.3.2 Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit

Mit wachsender Strömungsgeschwindigkeit wird der Schutzfilm aus passiven Korrosionsprodukten bei Stahl und Kupferlegierungen nach und nach abgetragen, während die nichtrostenden Stähle und viele Nickellegierungen unter diesen Bedingungen passiv bleiben

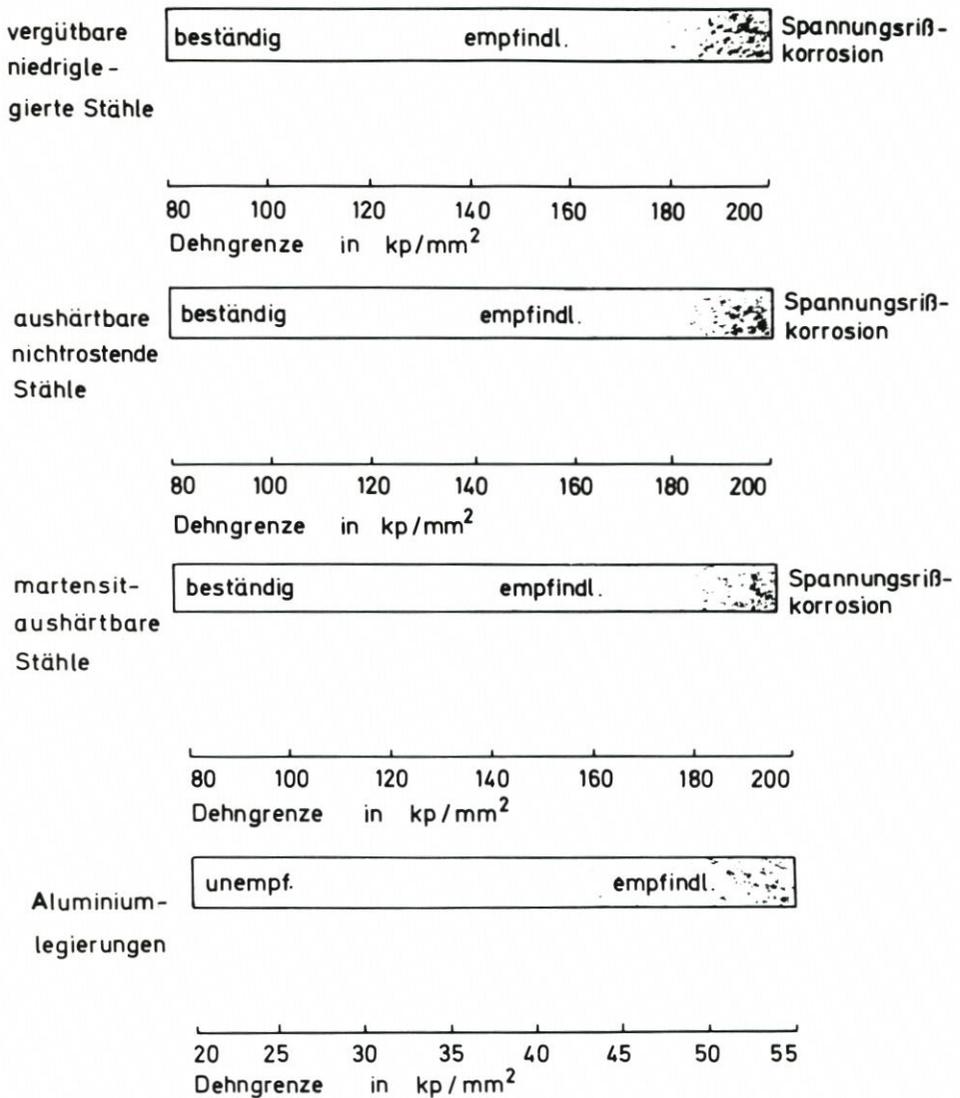


Abb. 7.5: Empfindlichkeit verschiedener Werkstoffe unterschiedlicher Festigkeit gegenüber Spannungsrißkorrosion (IND 1968)

und nicht angegriffen werden. Die Umkehr im Verhalten vieler Werkstoffe bei Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit ist meist die Ursache für die widersprechenden Angaben über die praktische Bewährung dieser Werkstoffe in Meerwasseranlagen sowie bei Druckkörpern und Gehäusen für Meßgeräte mit ihren Halterungen. Die auf Werkstoffen dieses Typs sich ausbildenden Schutzschichten brechen nur in schwach bewegtem oder stehendem Meerwasser zusammen, und Lochfraß setzt ein.

In Abb. 7.1 ist die relative Korrosionsbeständigkeit der üblicherweise für die Herstellung von Rohrleitungen verwendeten metallischen Werkstoffe aufgetragen, und zwar für eine häufig anzutreffende, typische Strömungsgeschwindigkeit.

## 7.4 Erfahrungen mit dem Verhalten einiger obengenannter Werkstoffe in der Meerestechnik

### 7.4.1 Unlegierte Stähle

Unlegierter Stahl ist das z.Z. am häufigsten im Schiffbau und für Meerwasseranlagen benutzte Material. Seine Korrosionsgeschwindigkeit wird sowohl in Meerwasser als auch in Süßwasser im wesentlichen durch die Sauerstoffkonzentration im Wasser bestimmt. Dieses geht auch aus Abb. 7.6 hervor, die die Korrosionsgeschwindigkeit von Spundwänden und Stahlpfeilern in Meerwasser in verschiedenen Bereichen über und unter dem Wasserspiegel wiedergibt. Die angegebenen Korrosionsgeschwindigkeiten zeigen deutlich die Abhängigkeit vom Grad der Belüftung.

An den dauernd unter Wasser befindlichen Teilen wird die Korrosion durch die Geschwindigkeit der Diffusion des Sauerstoffes durch die Ablagerungen aus Rost oder Meeresorganismen bestimmt. Die Abtragung liegt in der Größenordnung von 75 bis 150  $\mu\text{m}/\text{Jahr}$ .

Durch örtliche Verunreinigungen des Wassers können allerdings höhere Korrosionsgeschwindigkeiten auftreten. In Brackwassergebieten ist infolge des Bewuchses mit Meeresorganismen sowie von im Faulschlamm vorhandenen Schwefelverbindungen die Korrosion bei

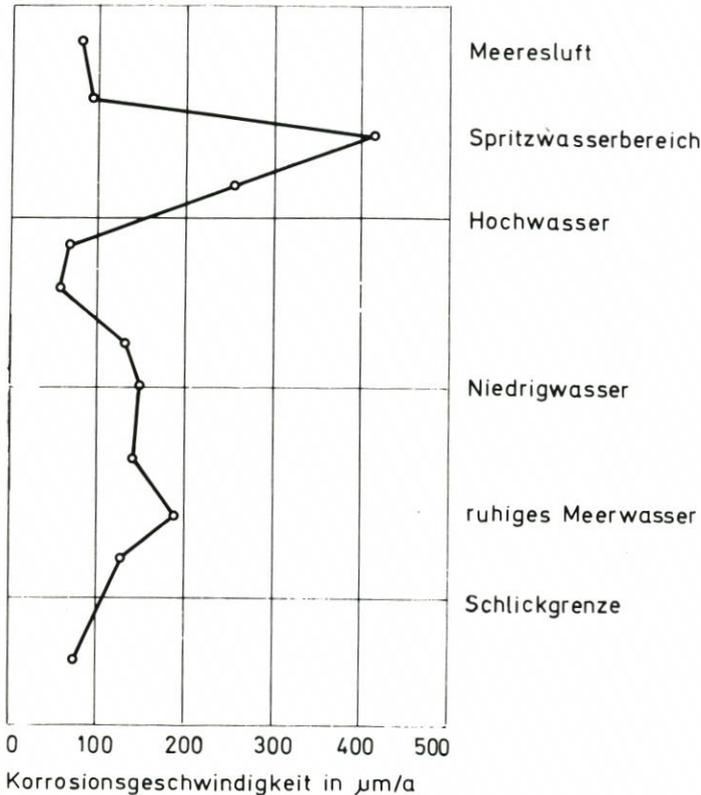


Abb. 7.6: Schema der Korrosion an Spundwänden und Stahlpfeilern in Meerwasser (MORTON, B. B., 1957)

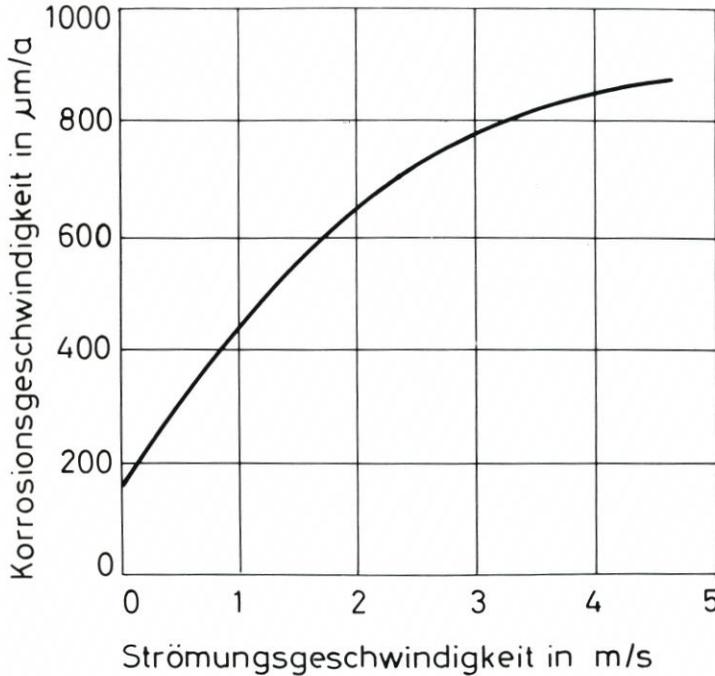


Abb. 7.7: Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit auf die Korrosionsgeschwindigkeit von Stahl bei Raumtemperatur (Versuchsdauer 38 Tage; IND 1968)

Stahl oberhalb der Schlickgrenze größer als in den benachbarten Bereichen. Im Schlick selbst ist die Korrosionsgeschwindigkeit gering, weil wenig gelöster Sauerstoff verfügbar ist.

Den Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit auf die Korrosion von Stahl in Seewasser zeigt Abb. 7.7. Schützend wirken hier Anstriche, Plattierungen oder thermische Spritzverfahren mit korrosionsbeständigen Legierungen und Opferanoden.

#### 7.4.2 Nichtrostende Stähle

Es ist wichtig, die Edelstahloberflächen wegen der o. a. Korrosionsgefahr von allen oxidischen Verunreinigungen zu befreien. Erst eine metallisch reine Oberfläche kann aufgrund der Legierungsbestandteile die sog. „Passivschicht“ ausbilden, die den Edelstahl so weitgehend korrosionsbeständig macht.

Besonders von nicht behandelten Schweißnähten, die von der Warmbehandlung her noch mit der Zunderschicht bedeckt sind, geht die gefürchtete Korrosion aus. Deshalb ist eine Nachbehandlung durch Sandstrahlung, auch Abbeizen der Zunderschicht in einem geeigneten Beizbad oder das Bestreichen der Schweißzone mit einer Beizpaste, die frei von Salzsäure und Chloriden sein muß, notwendig.

Besonders an Pumpen, Ventilen, Schiffsschrauben und an den Gleitflächen von Tragflügelbooten treten unter Betriebsbedingungen hohe Strömungsgeschwindigkeiten und starke Turbulenzen auf. Für den Einsatz bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten bieten sich daher die nichtrostenden Stähle an. Sie erleiden durch den Einfluß von Strömungsgeschwindigkeit

und Turbulenz praktisch keine Metallverluste, es sei denn, daß Kavitation oder Erosion durch Sandschliff auftritt. Selbst unter solchen Bedingungen haben diese Legierungen noch eine erhebliche Lebensdauer. Die auf Werkstoffen dieses Typs sich bildenden Schutzschichten scheinen bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten besonders dann wirksam zu sein, wenn die gesamte Oberfläche sauber und völlig dem Wasser ausgesetzt ist. Nur in Spalten oder unter Ablagerungen, die sich in schwach bewegtem oder stehendem Meerwasser bilden, kann der Schutzfilm zusammenbrechen und Lochfraß einsetzen.

Mit gutem Erfolg wird jetzt nichtrostender Stahl der Werkstoff-Nr. 1.4436 (X5 CrNiMo 1812) für die Herstellung von Schiffstanks verwendet. Dieser ist daher auch als Werkstoff für Behälter von Meßgeräten und Verbindungsteile zu anderen Bauwerken im küstennahen Bereich geeignet.

#### 7.4.3 Kupfer und seine Legierungen

Kupfer bzw. damit beschichtete andere Werkstoffe sollten im Gerätebau nur dort angewendet werden, wo es darauf ankommt, bestimmte Bereiche, wie Meßzonen von Sensoren, gegen Bewuchs zu schützen. Neben seinem giftigen Einfluß auf Organismen ist Kupfer auch als Legierung weitgehend unempfindlich gegen Lochfraß, wobei allerdings die Korrosionsbeständigkeit mit wachsender Strömungsgeschwindigkeit abnimmt (siehe Abb. 7.1).

#### 7.4.4 Aluminium und seine Legierungen

Konstruktionen aus Aluminium in Verbindung mit anderen Metallen finden innerhalb der Meßgerätetechnik besonders häufig Anwendung. Um die Gefahr von Korrosion weitgehend einschränken zu können, sind bereits bei der Konstruktion vorbeugende Abhilfen vorzusehen. Da die für den Einsatz im Seewasser günstigen Halbzeuge häufig nicht marktgängig sind, muß durch die Wahl des Schutzes eine optimale Korrosionsbeständigkeit erreicht werden. Es wurden chemische Oberflächenbehandlung (MBV-Verfahren), anodische Oxydation (Eloxieren), kathodisches Schutzverfahren (Schicht als Opferanode), Anstriche und Isolierungen angewandt. Dabei ist es kaum möglich, das eine oder andere Verfahren als das absolut wirkungsvollste zu bewerten, da bereits örtlich bestehende oder auch nur zeitweise auftretende, unterschiedliche Wasserzusammensetzungen durch Verunreinigungen verschiedenster Herkunft eine allgemeine Empfehlung nicht zulassen.

#### 7.4.5 Titan und seine Legierungen

Die besonders gute Korrosionsbeständigkeit von Titan gegenüber Seewasser und anderen aggressiven Medien, wie es besonders im Chemie- und Ölproduktbereich mit zusätzlicher Temperaturbeanspruchung bis ca. 300 °C eine häufige Verwendung findet, beruht auf der Bildung eines fest haftenden  $\text{TiO}_2$ -Films. Ein solcher Film bildet sich sofort, wenn die noch frische Oberfläche der Luft oder Feuchtigkeit ausgesetzt wird. Dieser Film wächst in seiner Dicke innerhalb von 70 Tagen auf 5 nm und erreicht nach ca. 4 Jahren immerhin 25 nm. Wegen seiner starken Affinität für Sauerstoff vermag Titan diesen Film, wenn er beschädigt wird, in jeder Umgebung in kürzester Zeit wieder zu heilen. Nur korrosive Medien wie HCl und  $\text{H}_2\text{SO}_4$  können den Schutzfilm auflösen.

Eine weitere Ursache für Schäden in Form von Spaltkorrosion, Grübchen- und Rißbildung stellen Stahlpartikel dar, die sich bei der Bearbeitung von Titan an der Oberfläche absetzen und die Bildung einer Schutzschicht verhindern, da Fe-Partikel von Chloridionen rasch angegriffen werden. Eine weitere Gefahr für Rißbildung von Titan-Bauteilen kann durch Vibration und damit einhergehender Ermüdung ausgelöst werden.

Titan ist anfällig gegen vibrationsbedingte Materialermüdung. Dagegen widersetzt es sich wegen seiner glatten Oberfläche in den meisten Umgebungen dem Bewuchs oder der Ablagerung von schädlichen Stoffen und besitzt so einen natürlichen Bewuchsschutz. Der Einsatz titanbeschichteter Stahlbleche ist möglich.

#### 7.4.6 Nichtmetallische Werkstoffe

Generell unterliegen Kunststoffe je nach Benutzungsdauer und Einsatztiefe einer mehr oder weniger großen Wasseraufnahme, was zu Formänderungen und damit zu Problemen bei der Übernahme von Aufgaben im mechanischen Bereich von Meßgeräten ohne entsprechende Berücksichtigung durch Toleranzen führen kann. Auch Temperaturänderungen beeinflussen die Eigenschaften. So neigen die meisten Kunststoffe bei niedrigeren Temperaturen zu einer größeren Sprödigkeit.

Aus der Reihe der nichtmetallischen Werkstoffe scheinen insbesondere die faserverstärkten Kunststoffe für den Bau von Druck- und Auftriebskörpern, Verkleidungen, ganzen Schiffsschalen und Formteilen eine zunehmende Alternative zu solchen Elementen aus Metall zu werden.

Im Schiffbau werden immer häufiger Kunststoffe als Konstruktionswerkstoffe für Maschinenelemente wie Wellenlager, Ruderlager, Blockrollenlager wegen der guten Gleiteigenschaften und der Wartungsfreiheit eingesetzt. Es handelt sich hierbei sowohl um Duroplaste wie Phenolharzpreßmassen als auch um Thermoplaste wie Polyamide und Polyacetate.

Auch für die Herstellung von Schiffsschrauben kleiner Abmessungen verwendet man Polyamide, da die hohe Zähigkeit sie sogar gegen Stoß- und Schlagbeanspruchung durch Grundberührung, Treibeis und sonstiges Treibgut unempfindlich sein läßt.

Den Vorteilen der hohen Festigkeit, des niedrigen spezifischen Gewichts, der hohen Elastizität, der geringen Wärmeleitfähigkeit und der Korrosionsbeständigkeit stehen nach den bisherigen Erfahrungen jedoch folgende Nachteile gegenüber:

- geringe Tragfähigkeit bei Schub- und Biegebelastung,
- eine gewisse Wasseraufnahme (insbesondere in großen Tauchtiefen),
- geringe Nutzungsdauer bei großer Beanspruchung durch Kurzzeitermüdung,
- eine relativ kleine, interlaminaire Scherspannung.

Einzelne dieser Werkstoffe sind daher besonders empfindlich gegen Schub, Biegung und Spannungskonzentration bis hin zur Spannungsrißbildung. Eine Schwierigkeit bereitet auch die Bemessung der Festigkeit bei der Konstruktion, da noch keine genügend einfachen, zerstörungsfreien Prüfverfahren vorhanden sind.

#### 7.4.7 Werkstoffe bei Mischbauweise

Obwohl zur Vermeidung von Kontaktkorrosion auf die Verbindung von verschiedenen Metallen insbesondere mit solchen, deren Potentialunterschiede (s. Tab. 7.6) sehr groß sind, nach Möglichkeit verzichtet werden sollte, läßt sich diese Grundforderung kaum jemals völlig einhalten.

Die wichtigsten Verbindungsverfahren im Mischbau sind Nieten und Schrauben. Gilt es, verschiedene Materialien untereinander zu verbinden, so sollten die Berührungsflächen durch eine Neopren-Zwischenlage isoliert werden. Die Schraubverbindung sollte so gestaltet sein, daß der Schraubenschaft in einer Kunststoffhülse steckt sowie Mutter und Schraubkopf durch Scheiben aus Kunststoff gegenüber beiden Metallflächen isoliert sind.

Das Verhalten von unterschiedlichen Metallen in Seewasser bei Mischbauweise ist in Tab. 7.8 dargestellt.

Tabelle 7.8  
Verhalten einiger Werkstoffe im Seewasser bei Mischbauweise (versch. Quellen)

Metall 1	mit	Metall 2	Spaltkorrosion/ Lochfraß- Beständigkeit	Mindest-Maßnahmen
Cu-freie Alu-Leg.		Cu-freie Alu-Leg.	weniger gut	1 und 2 streichen
Cu-freie Alu-Leg.		Rein-Alu	weniger gut	2 streichen
Cu-freie Alu-Leg.		Alu – elox.	weniger gut	2 streichen
Cu-freie Al-Leg.		verchr. Oberfläche	gut	
Cu-freie Alu-Leg.		Blei	weniger gut	1 streichen
Cu-freie Alu-Leg.		Bronze, Messing, Kupfer	sehr gering	gegeneinander isolieren durch Kunststoff-Zwischenlage
Cu-freie Alu-Leg.		Edelmetalle	sehr gering	gegeneinander isolieren durch Kunststoff-Zwischenlage
Cu-freie Alu-Leg.		Eisen und Stahl	sehr gering	2 streichen oder porenfreie Über- züge durch Alumieren, Kadmie- ren, Verzinken, Phosphatieren bei ausreichender Schichtdicke u. gelegentlicher Nachbehandlung
Cu-freie Alu-Leg.		Kadmium	sehr gut	
Cu-freie Alu-Leg.		Magnesium und seine Legierungen	sehr gering	gegeneinander isolieren durch Kunststoff-Zwischenlage
Cu-freie Alu-Leg.		Nickel	weniger gut	1 streichen
Cu-freie Alu-Leg.		Nickel-Leg.	gut	
Cu-freie Alu-Leg.		Chrom-Nickel-Stahl	Unterschied- lich: 2 bei ruhigem Seewasser sehr gering 2 bei stark ström. Seew. gut bis gering	gegeneinander isolieren durch Kunststoff-Zwischenlage
Bronze, Messing		Chrom-Nickel-Stahl	gut bis gering	1 streichen

## 7.5 Schutz vor Korrosion und Bewuchs

Bei den zu wählenden Verfahren muß je nach Funktion zwischen einem temporären und einem Dauerschutz unterschieden werden. Während der temporäre Schutz nur für einen genau definierten, kurzen Zeitraum wirksam zu sein braucht, wird bei einem Dauerschutz eine Wirksamkeit möglichst über die ganze Lebensdauer des Gerätes oder Bauwerkes angestrebt. Eine Sonderstellung nimmt darüber hinaus der Schutz vor organischem Bewuchs in Meerwasser ein. Das Bewuchsverhalten einiger Materialien ist in Tab. 7.9 dargestellt.

Tabelle 7.9  
Bewuchsverhalten einiger Materialien (KÖHLER/KÜHL, 1974)

Material	Werkst.-Nr.	Dichte g/cm <sup>2</sup>	Zugfest. kp/mm <sup>2</sup>	Abtrag mm/a	Bewuchsbeständigkeit
X2 Cr Ni Mo 1810	1.4404	7,9	45-70	< 0,11	unbeständig
X2 Cr Ni Mo 1812	1.4435	7,9	45-70	< 0,11	unbeständig
X3 Cr Ni Mo N. 17135	1.4439	7,9	60-80	< 0,11	unbeständig
Al Mn 3	3,3535	2,7	27	< 0,1	unbeständig
Kupfer (hart)		8,98	35	0,15 -0,3	sehr gut
Cu Ni 10 Fe	2.0872	8,89	32	0,025-0,13	sehr gut
Ms 85	2.0240	8,7	32-37	0,15 -0,3	gut
Cu Be 2 (halbhart)	1.1247	8,25	140	< 0,025	unbekannt
Natriumsilikat-Glas		2,45	7-9	kein Abtrag	unbeständig
Borsilikat-Glas (Tempax)		2,2-2,4	3-6	kein Abtrag	unbeständig
Glaskeramik Jena 2000		2,3-2,6	8-15	kein Abtrag	unbeständig

## 7.5.1 Temporärer Schutz

Ein kurzzeitiger Korrosionsschutz, der jederzeit entfernt werden kann, ist vorwiegend für Lagerhaltung und Transport anzuwenden. Neben der Forderung nach Verträglichkeit mit Schmiermitteln und Langzeitkorrosionsschutz müssen besonders geringe Kosten und leichte Handhabung gewährleistet sein.

**Rostschutzöl** (Schutzdauer bis zwei Jahre) soll selbst gute Schmiereigenschaften haben. Es wird durch Streichen, Spritzen oder Tauchen aufgebracht.

**Rostschutzfette** (Schutzdauer bis zwei Jahre) haben aufgrund höherer Schichtdicke gegenüber Rostschutzöl meist einen höheren Schutzwert. Wegen z.T. bedingter Schmierfähigkeit brauchen sie vor Inbetriebnahme nur teilweise entfernt zu werden (Drahtfette für Seile und Seilwinden).

**Rostschutzwachse** (Schutzdauer bis drei Jahre) müssen mit speziellen Lösungsmitteln entfernt werden und eignen sich vorwiegend für den Schutz von Außenhüllen (Transport).

**Rostschutzpapiere** mit Trockenmitteln (Schutzdauer bis zu zehn Jahren) erzeugen innerhalb der Verpackung eine Schutzgasatmosphäre. Bauteile bzw. auch ganze Geräte werden mit dem Spezialpapier umwickelt oder Transportkästen damit ausgekleidet. VCI-Verfahren (Volatik Corrosion Inhibitor) beinhalten auch Pulver, Öle und Lösungen. Das VCI-Konservierungsgel hat gleichzeitig eine gute Schmierwirkung.

**Trockenmittel** in Form von Kieselgel oder auf der Basis von Bentonit entziehen

ihrem Lagerbehälter (Gerät, Transportgefäß etc.) Feuchtigkeit und können auch beim Einsatz von Geräten z. B. Kondenswasserbildung unterbinden. Sie sind durch einfaches Trocknen wieder zu aktivieren.

## 7.5.2 Metallische Überzüge

### 7.5.2.1 Galvanische Verfahren

Galvanische Überzüge können auf die verschiedensten Metalle – unter bestimmten Voraussetzungen auch auf nichtmetallische Werkstoffe – hauptsächlich wegen des Korrosionsschutzes, der höheren Verschleißfähigkeit, der besseren elektrischen Leitfähigkeit (Leiterbahnen in elektronischen Schaltungen, Kontakte) sowie aus ästhetischen Gründen aufgebracht werden. Der Vorgang, bei dem das zu überziehende Werkstück als Kathode, das Überzugsmetall in reiner Form als Anode im Elektrolytbad unter Gleichstrom gesetzt wird, läßt sich genau steuern, so daß Schichten einheitlicher Dicke und hoher Dichtigkeit entstehen. Folgende Metalle werden für diesen Vorgang am häufigsten verwendet:

**Nickel** wird meist auf einer Cu-Schicht in einer Stärke von 75 µm als Basis für eine Cr-Schicht aufgebracht. Zur Aufbesserung abgenutzter Teile kann Ni bis zu 6 mm Stärke (Schmiernickelauflage) aufgetragen werden.

**Kupfer** wird als Basis für Ni- oder Cr-Auflagen in einer Stärke von 10–15 µm benutzt. Gedruckte Schaltungen (Verbesserung der Leitfähigkeit) und Meßsensoren (Schutz gegen Bewuchs) werden ebenfalls mit Cu beschichtet.

**Chrom / Hartchrom** bildet mit einer Verbundbasis aus Cu-Ni aufgrund der hohen Porendichte einen ausgezeichneten Korrosionsschutz. Diese Verbindung mit einer Schichtdicke von 2,5–500 µm zeichnet weiterhin hohe Härte, ein niedriger Reibungskoeffizient, hohe Wärmebeständigkeit und Verschleißfestigkeit aus (→ Meßinstrumente).

Galvanische **Zink-Überzüge** haben auf Stahlblech eine ausgezeichnete Haftfestigkeit und schützen trotz ihrer Porosität in begrenztem Maße vor maritimen Einflüssen. Eine Verbesserung ist durch zusätzliche Farbüberzüge zu erzielen; es genügt dann eine geringe Zn-Schichtdicke, die auch starken Biegebeanspruchungen standhält.

Galvanische **Kadmium-Überzüge** aus Eisenmetallen zeichnen sich durch hohe Korrosionsbeständigkeit aus. Wegen der hohen Herstellungskosten und weil Kadmium äußerst giftig ist, werden derartige Beschichtungen in Dicken von weniger als 25 µm nur in speziellen Fällen ausgeführt. Wie Zink wirkt Kadmium gegenüber Eisen als Opferanode.

**Silber-Beschichtungen** sind chemisch sehr beständig, von geringer Reibung, verformbar und ausgezeichnete Wärme- und Elektrizitätsleiter. Sie erfüllen in vielen Bereichen der Geräteindustrie wertvolle Aufgaben.

**Gold** in galvanisch abgeschiedener Form läßt sich vorzugsweise auf Messing, Kupfer, Nickel, Silber und Stahl aufbringen; es ist feinkörnig mit einem dichten Gefüge. In Legierungen mit Kobalt und anderen Metallen kann die Härte von Schichten bis 2,5 µm noch beträchtlich erhöht werden und bietet einen ausgezeichneten Korrosionsschutz.

Wie auch Ag-Überzüge werden An- und Überzüge vor allem bei gedruckten Schaltungen und in anderen elektronischen Bauteilen verwendet.

### 7.5.2 Chemische und elektrochemische Verfahren

Beim MBV-Verfahren (Modifiziertes Bauer-Vogel-Verfahren) werden Alu-Werkstoffe in eine mit Natriumkarbonat und Natriumchromat angereicherte, heiße Lauge getaucht. Die Schutzschicht aus Chromoxid wird mit einer weiteren Tauchbehandlung verdichtet und bildet einen ausgezeichneten Haftgrund für Farbanstriche.

Phosphatschichten auf Eisen oder Chromatschichten auf Eisen-, Zink- oder Magnesiumteilen werden ähnlich gebildet, sollten jedoch wegen ihres begrenzten Schutzes nicht direkt dem Seewasser ausgesetzt werden.

Kathodische Schutzverfahren finden häufig Anwendung im Schiffbau oder bei Spundwänden. Dabei wird das als Opferanode in Form von Anstrichen oder nach Lichtbogenspritzverfahren aufgebrachte, schützende (unedlere) Metall langsam aufgelöst und wandert im elektrolyten Seewasser als Schutzschicht zur schützenden Kathode.

Das Eloxalverfahren wird (als anodische Oxydation) für die Oberflächenversiegelung von Aluminium angewendet. Eine Endbehandlung in einer Nickel- oder Kobaltacetatlösung (mit der Möglichkeit der Einfärbung) verschließt die Poren und läßt guten Haftgrund für Anstriche entstehen.

### 7.5.3 Schmelzflüssige Verfahren, Plattierungen

Sind die vorgenannten Verfahren aus verschiedenen Gründen nicht anwendbar, so bietet sich die Möglichkeit der Feuerverzinkung oder -verbleiung von Stahl- und

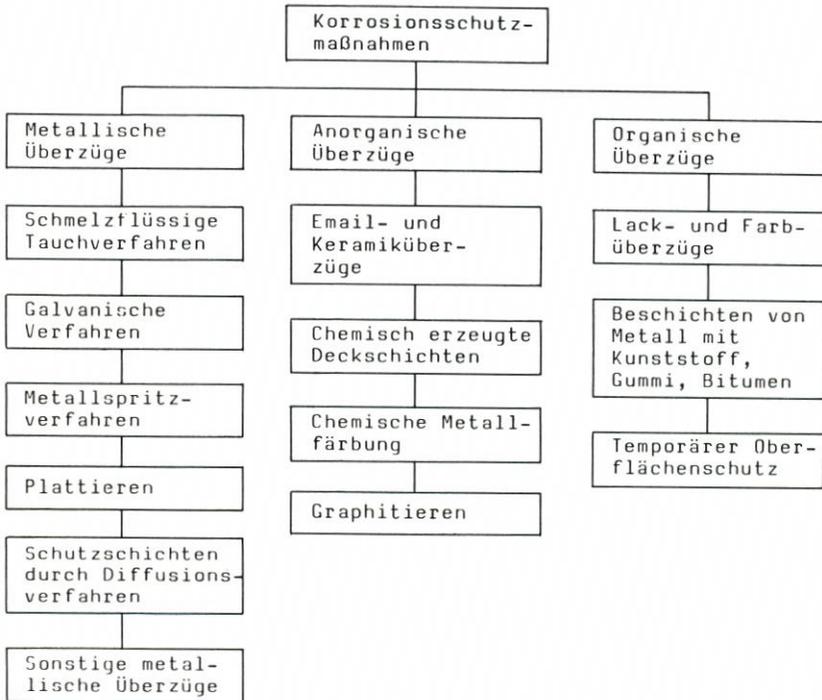


Abb. 7.8: Verfahren zur Bildung von schützenden Metalloberflächen (KOTTHAUS, H., 1967)

Eisenteilen. Durch Tauchen metallisch blanker Werkstücke in schmelzflüssiges Zink oder Blei entstehen schützende Schichten von 75–150 µm Dicke.

Bei hochfesten Konstruktionsteilen aus einer Al-Cu-Mg-Legierung wird wegen der Korrosionsanfälligkeit häufig das *Metallspritzverfahren* (Alucoating) angewendet. Dabei wird heißes Reinaluminium von 99,5% mit einer Spritzpistole aufgetragen. Auch Schichten aus (eingefärbtem) *Kunststoffpulver* lassen sich auf beliebigen Materialien aufbringen. Hierbei werden elektrostatisch aufgeladene Pulverteilchen in gleichmäßiger Dicke von 40–300 µm auch in schwerzugänglichen Bereichen abgeschieden. Eine anschließende Warmbehandlung, auch „Sintern“ genannt, im Ofen bei 140–200 °C sorgt für eine notwendige Aushärtung der Kunststoffschicht.

Durch *Plattierung* werden großflächige Teile, wie Bleche, mit beständigen Aluminiumlegierungen, Reinaluminium, Chrom-Nickel-Stählen oder Kunststofffolien beschichtet. Dabei wird die korrosionsbeständige Schicht unter Einwirkung von hohem Flächendruck auf das zu schützende Material gepreßt. Selbst lückenhafte Deckschichten, wie sie bei den oben beschriebenen Verfahren auftreten können, sind hier weniger gefährlich, weil diese Fehlstellen durch eine Fernschutzwirkung überbrückt werden, die um so stärker wirksam ist, je größer der Potentialunterschied zwischen Kernmaterial und Deckschicht ist. Es sollte jedoch wegen einer genügenden Wirksamkeit mindestens ein Lösungspotentialunterschied von 100–200 Millivolt vorhanden sein. Siehe dazu auch die Abbildungen 7.3, 7.4 und 7.8.

### 7.5.3 Farbüberzüge

Bei der vielseitigen Anwendung verschiedener Materialien im Seewasser ist neben der optischen Wirkung vor allen Dingen der zusätzliche Schutz gegen Korrosion durch Anstriche von großer Bedeutung.

Diese Anstrichmittel sind flüssige bis pastenförmige, trocknende Stoffgemische, die durch Streichen, Spritzen oder Tauchen auf die Oberfläche aufgetragen werden und einen Anstrich ergeben. Voraussetzung für eine gute Haftung ist eine genügende Entfettung und Aufräuhung der Oberfläche sowie eventuell die Anwendung der beschriebenen Schutzverfahren. Damit die Anstriche nicht durch Undichtigkeiten geradezu eine Korrosion, zumeist Lochfraß, fördern, haben sich die folgenden Oberflächenbehandlungen der Teile, die mit Seewasser in Berührung kommen, je nach Grundmetall bewährt:

- Beizen bzw. Sandstrahlen mit eisenfreiem Edelkorund bis zu einer Rauhtiefe von 50–70 µm
  - Aufbringen von Schutzschichten nach dem galvanischen, chemischen, schmelzflüssigen oder Beschichtungs-Verfahren
  - Grundierung mit Primern auf Epoxidharz-Basis
  - Mehrfachanstriche von 1-Komponenten-Farben auf der Basis von Bitumen-Asphalt oder Teer-Chlorkautschuk oder Teer-Vinyl
- Alternativ: Mehrfachanstriche von 2-Komponenten-Farben auf der Basis von Teer-Epoxidharz mit Zinkchromat-Anteil
- Antifouling-Anstrich bei Gefahr von Bewuchs

### 7.5.4 Schutz vor Bewuchs

Bildung und Wachstum des Bewuchses sind stark abhängig von der Klimazone und der Nähe zur Küste. So zeigt sich, daß Bewuchs in hiesigen Gewässern vorwiegend in Küstennähe bei Temperaturen über 10 °C, hauptsächlich während der Sommermonate, auftritt, in den

Tropen das ganze Jahr anhält und fernab der Küsten auf hoher See mit zunehmender Wassertiefe weniger in Erscheinung tritt.

Es muß nach den bis heute vorliegenden Erkenntnissen festgestellt werden, daß das Bewuchsproblem mit seinem Mechanismus der biologischen Korrosion noch nicht abschließend geklärt ist (Tab. 7.9). Es kann jedoch angenommen werden: Durch Bewuchs auf einer Materialoberfläche entstehen unterschiedliche Sauerstoff-Konzentrationszellen zwischen dieser und der Bewuchsschicht. Die sich dadurch bildende Potentialdifferenz führt dann zu Korrosionsströmen zwischen den Bewuchskolonien und ihrer Umgebung. Aber auch bestimmte Bakterien, die keinen Sauerstoff zum Leben brauchen, wie z. B. *Desulfovibrio*, depolarisieren die kathodischen Korrosionszellen durch Bildung wasserstoffarmer Zonen. Der so freigewordene Wasserstoff schlägt sich auf der Metalloberfläche nieder und fördert dadurch, besonders bei Eisen, die sog. Wasserstoff-Korrosion unter sauerstoffarmen Bedingungen.

Das Korrosionsbild reicht von der Spaltkorrosion, vorwiegend unter Seepocken, bis hin zu langen Furchen, die wegen ihres Aussehens auch als „Wurmfraß“ bezeichnet werden.

Langzeitversuche vor Helgoland bei einer Strömung von 0,2–0,9 m/sec haben gezeigt, daß sowohl AlMg 3 als auch Chrom-Nickel-Stähle unter Einwirkung von Bewuchs in besonderer Weise zu Spalt- und Flächenkorrosion mit unterschiedlichem Flächenabtrag neigen (Tab. 7.9).

Um die Funktion von Meßgeräten, Sensoren und Geräteträgern auch bei Langzeiteinsätzen zu gewährleisten, ist deren Schutz durch gezielte Abhilfen notwendig. Dieser Schutz besteht aus toxischen Wirkstoffen, die von Schwermetallen und deren Legierungen ausgehen, in einem ständigen Verbrauchsprozeß diffundierend auf die Oberfläche einwirken müssen und daher in Zeitabständen zu erneuern sind. Neben dem Kupfer und seinen Legierungen, die selbst giftig wirken, müssen alle anderen Materialien bei Langzeiteinsätzen durch sog. Bewuchsschutzfarben (Antifoulingfarben) weitgehend abgedeckt werden.

Eine interessante Variante bilden die Versuche mit Glasplatten, die wegen ihrer optischen Anforderungen, z. B. für Trübungsmesser, frei von Bewuchs gehalten werden müssen. So konnte durch ein Kupfernetz mit 10 mm Maschenweite – entsprechend einer anteiligen Kupferoberfläche von ca. 65 % – durch die Fernwirkung des Kupfers über einen Zeitraum von 5 Monaten in der Sommerzeit ein ausgezeichneter Schutz erzielt werden, während bei 20 mm Maschenweite die effektive Fernwirkung nicht mehr ausreichend war und die Glasplatten völlig von Bewuchs überdeckt wurden.

Die Anwendung von Antifoulingfarben mit ihren giftigen metallorganischen Verbindungen auf der Basis von Zinn, Blei, Quecksilber und Zink als Wirksubstanzen machen jedoch nach den bisher vorliegenden Ergebnissen spätestens nach einem halben Jahr eine Wiederholung notwendig, da über diese Zeit hinaus ihr Schutz erschöpft ist.

## 8. Schlußwort

Die außerordentliche Vielfalt von Meßgeräten des Küsteningenieurwesens industrieller oder auch institutseigener Fertigung ist kaum noch zu übersehen. Aus diesem Grunde wurde das Schwergewicht auf die Darstellung der Meßprinzipien gelegt, und es wurden jene Geräte herausgestellt, mit welchen im Wirkungskreis des Ausschusses hinreichende Erfahrungen gewonnen werden konnten. Das Erfordernis, dem messenden Ingenieur Orientierungshilfen zu geben, wurde in den vielfältigen Diskussionen des Ausschusses besonders deutlich.

Während die Meßprinzipien im wesentlichen über lange Zeiten gültig bleiben, ist die

apparative Gestaltung der Meßgeräte einem ständigen Wechsel unterworfen, der sich in jüngerer Zeit vor allem aus dem Wunsch nach rechnerkompatibler Datenaufzeichnung ergibt. Insofern werden manche der hier dargestellten Geräte schon bald überholt sein, während andere nicht mehr verbesserungsfähig erscheinen.

Empfehlungen für das eine oder andere Meßgerät sind hier nicht ausgesprochen worden, weil im konkreten Falle dessen Auswahl stark durch die Meßaufgabe mitbestimmt ist. Stattdessen sind im Anhang einige Meßprogramme dargestellt, in welchen Meßgeräte unterschiedlicher Wirkungsweisen eingesetzt waren. Die in diesem Zusammenhang gewonnenen und hier mitgeteilten Erfahrungen können bei der Wahl von Meßgeräten in anderen Programmen hilfreich sein.

## 9. Schriftenverzeichnis

- AANDERAA, J. R.: Operating Manual for Recording Currentmeter. Nestun, Norway, 1967.
- ABRAHAM, G. u. OHLMEYER, F.: Tidemodelle für Ausbreitungsvorgänge von Wasserinhaltsstoffen und Wärme. Mitt.-Heft DVWK, Nr. 39, 1978.
- ALPERS, W., HASSELMANN, K. u. SCHIELER, M.: Fernerkundung der Meeresoberfläche von Satelliten aus. Raumfahrtforschung, H. 1, 1975.
- BARTHEL, V.: Die Hydrographie der Außenweser. 1979, unveröffentlicht.
- BARTHEL, V.: Sturmflutseeang in einem Ästuar. Die Küste, H. 34, 1979.
- BARTHEL, V.: Seegang in einem Ästuar am Beispiel der Außenweser. Die Küste, H. 35, 1980.
- BATTJES, J. A.: Surf Similarity. Proceedings 14th Intern. Conf. on Coastal Engineering, Vol. I, Copenhagen, 1974.
- BECKMANN, H.: Geologische Kartierung des Meeresbodens mit geophysikalischen Methoden. Mineralische Rohstoffe aus dem Meer, I. Seminar Clausthal/Kiel 1971, Bd. 1, Clausthal-Zellerfeld, 1971.
- BECKMANN, H.: „In situ“-Bestimmung von Formationswiderstandsfaktoren mit Bodenschleppsonden. Erdöl-Erdgas-Z., Jg. 89, Hamburg, 1973.
- BECKMANN, H.: Erforschung des Meeresbodens mit radioaktiven Meßmethoden. Berichte Inter-ocean 73, Bd. 2, Düsseldorf, 1973.
- BÜSCHING, F.: Über Orbitalgeschwindigkeiten irregulärer Brandungswellen. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 42, 1974.
- CARTWRIGHT, D. E. u. LONGUETT-HIGGINS, M. S.: The Statistical Distribution of the Maximum of a Random Function. Proc. Roy. Soc., A 230, 1956.
- CERC: U. S. Army Coastal Engineering Research Center. Shore Protection Manual, 1973.
- CHRISTIANSEN, H.: Über den Transport suspendierter Feststoffe in Ästuaren am Beispiel der Elbmündung bei Neuwerk. Hamburger Küstenforschung, H. 28, 1974.
- DAEMRICH, K. F.: Diffraction gebeugter Wellen. – Ein Beitrag zur Berechnung der Wellenruhe in Häfen. Mitt. des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 47, 1978.
- DAEMRICH, K. F., HILLEBRAND, W., KOHLHASE, S. u. TAUTENHAIN, E.: Versuchseinrichtung Wellenbecken für dreidimensionale vergleichende Untersuchungen mit regelmäßigen Wellen und Wellenspektren. Mitt. des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 47, 1978.
- DEMIRAY, G.: Geologische Erforschung küstennaher Sedimente mit geoelektrischen Methoden. Dissertation, Clausthal-Zellerfeld, 1978.
- DETTE, H. H.: Wellenmessungen und Brandungsuntersuchungen vor Westerland/Sylt. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 40, 1974a.
- DETTE, H. H.: Über Brandungsströmungen im Bereich hoher REYNOLDS-Zahlen. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 41, 1974b.
- DETTE, H. H. u. STEPHAN, H. J.: Über den Seegang und Seegangswirkungen im Küstenvorfeld der Ostsee. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 65, 1979.
- DIN-Taschenbuch 4: „Stahl und Eisen“, Gütenormen. Beuth-Verlag, 1970.
- DIN-Taschenbuch 26: „Nichteisenmetalle“, Normen über Schwermetalle. Beuth-Verlag, 1969.
- DRESKE, G.: Der Wellenschreiber WES-63 der Forschungsstelle Norderney. Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz Norderney, Jahresbericht 1963, Band XV, 1964.
- EIBEN, H. u. MÖLLER, M.: Erfahrungen beim Aufbau und Betrieb der Wellenmeßanlage vor der Probstei. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 65, 1979.

- FAHRENTHOLZ, S. R.: Wellen- und Wasserstandsmessungen in freier See mit Hilfe des Echolotverfahrens. 2. Intern. Kongreß Interocean, Düsseldorf, 1973.
- FLÜGGE, G. u. SCHWARZE, H.: Ähnlichkeitsbedingungen für Untersuchungen in hydraulisch-thermischen Tidemodellen. In „Wärmeeinleitungen in Strömungen“ SFB 80, Karlsruhe, 1977.
- FÜHRBÖTER, A.: Einige Ergebnisse aus Naturuntersuchungen in Brandungszonen. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 40, 1974.
- GIESE, E., HARTEN, H. u. VOLLMERS, H. J.: Erfahrungen mit dem Betrieb von Tidemodellen mit beweglicher Sohle. Die Küste, H. 27, 1975.
- GIESE, E. u. VOLLMERS, H. J.: Tidemodelle mit beweglicher Sohle. Mitt.-Heft DVWK, Nr. 39, 1978.
- GLAZIK, G.: Neuere Forschungsergebnisse über die wellendämpfende Wirkung und die Wellenkräfte bei aufgelösten Wellenbrecherkonstruktionen. Mitt. der Forschungsanst. für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, Berlin, H. 34, 1975.
- GÖHREN, H.: Die Tideströmungen der Außenweser. Unveröffentl. Bericht des WSA Bremerhaven, 1962.
- GÖHREN, H.: Ein neues Schöpfgerät für Schwebstoffuntersuchungen im Watt. Die Küste, Jg. 13, 1965.
- GÖHREN, H.: Triftströmungen im Wattenmeer. Mitt. des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 30, 1968.
- GÖHREN, H.: Die Strömungsverhältnisse im Elbmündungsgebiet. Hmb. Küstenforschung, H. 6, 1969.
- GÖHREN, H.: Entwicklung eines integrierenden Wellenmeßgerätes. Hmb. Küstenforschung, H. 13, 1970.
- GRASSHOFF, G.: Meteo/ozeanographisches Bojenmeßsystem OMDER mit Funkdatenübertragung zur Forschungsplattform NORDSEE. 3. Intern. Kongreß Interocean '76, Bd. 2, 1976.
- HAMPTON, L.: Physics of sound in marine sediments. Plenum Press, New York, 1974.
- HASSELMANN, K.: The energy balance of wind waves and the remote sensing problem. Conf. Proc. Sea Surface, Topography from Space, Vol. 2, No. AA, Techn. Report ERL 228 - AOML 7, 1972.
- HASSELMANN, K. et al.: Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Erg. Heft DHZ, (A), Nr. 12, 1973.
- HORIKAWA, K.: Coastal Engineering. An Introduction to Ocean Engineering. University of Tokyo Press, 1978.
- HOVERS, G.: Der Einfluß von Strombauwerken auf die morphologische Entwicklung von Stromrinnen im Mündungsgebiet eines Tideflusses, untersucht am Beispiel der Außenweser. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 34, Karlsruhe, 1973.
- International Nickel Deutschland GmbH (IND): Werkstoffe für Meerwasseranlagen, 1968.
- JONES, D. B.: Transportable Breakwaters - A Survey of Concepts. Naval Civil Engineering, California, 1971.
- KIRBY, R.: The UCS Vibrocoring 1972. With evaluations of the Marex, Zenkovich, Geodoff & IGS Vibrocorers. Natural Environment Res. Council, Taunton, 1972.
- KÖHLER, W. u. KÜHL, H.: Bewuchs- und Korrosionsuntersuchungen bei Helgoland. Schiff und Hafen, H. 9, 1974.
- KOHLHASE, S. u. DETTE, H. H.: Modelle für wellenerzeugte Vorgänge. Wasserbauliches Versuchswesen, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft, Mitt.-Heft Nr. 4, 1978.
- KOHLHASE, S. u. DAEMRICH, K. F.: Seegangsforschungsprogramm im Franzius-Institut innerhalb des Sonderforschungsbereiches 79. Mitt. des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 50, 1980.
- KOTTHAUS, H.: Betriebstechnisches Taschenbuch, Band II. C. Hauser-Verlag, München, 1967.
- LONGUETT-HIGGINS, M. S.: On the Statistical Distribution of the Heights of Sea Waves. Journal of Marine Research, Vol. XI, Nr. 3, 1953.
- LUCK, G. u. NIEMEYER, H. D.: Seegangsmessungen im Bereich der Ostfriesischen Inseln und Watten. Meerestechnik (mt), Bd. 7, Nr. 4, 1976.
- LUCK, G. u. NIEMEYER, H. D.: Das Seegangmeßprogramm Ostfriesische Inseln und Küste. Deutsche Gewässerkundl. Mitteilungen, Jg. 21, H. 6, 1977.
- LUCK, G.: Untersuchungen zur Sedimentbewegung mit Hilfe einer Unterwasserfernsehanlage. Deutsche Forschungsgemeinschaft: Sandbewegung im Küstenraum; Rückschau, Ergebnisse und Ausblick, Boppard, 1979.

- LÜDERS, K. et al.: Bilanzbericht der Arbeitsgruppe „Wasserbauliche Hydrometrie“ (Stand 1951). Küstenausschuß Nord- und Ostsee, 1952, unveröffentlicht.
- MATTIE, M. G. u. HARRIS, D. L.: The Use of Imaging Radar in Studying Ocean Waves. Proc. 10th Coastal Engineering Conference, Vol. 1, Hamburg, 1978.
- MEYERS LEXIKON: Technik und exakte Wissenschaften. Bibliographisches Institut Mannheim, Wien, Zürich, 1969.
- MORTON, B. B.: Splash Zone Protection for Offshore Structures. World Oil, 1957.
- MÜLLER, G.: Methoden der Sedimentuntersuchung. Stuttgart (Schweizerbart), 1964.
- NIEMEYER, H. D.: Der Verlauf der Sturmtiden vom Januar 1976 im Bereich der Ostfriesischen Inseln. Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz Norderney, Jahresbericht 1975, Band XXVII, 1976.
- NIEMEYER, H. D.: Seegangsmessungen auf Deichvorländern. Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz Norderney, Jahresbericht 1976, Band XXVIII, 1977.
- NIEMEYER, H. D.: Naturmessungen der Seegangs- und Brandungsbeanspruchungen von Insel-schutzwerken und Inselstränden. Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz Norderney, Jahresbericht 1978, Band XXX, 1979.
- NIEMEYER, H. D.: Untersuchungen zum Seegangsklima im Bereich der Ostfriesischen Inseln. Die Küste, H. 34, 1979b.
- PARTENSKY, H. W.: Auswirkungen der Naturvorgänge im Meer auf die Küste – Seebauprobleme und Seebautechniken. Interocan 1970, Bd. 1.
- PLATE, L.: Forschung als Grundlage für den Ausbau der Außenweser. Deutsche Wasserwirtschaft, H. 4, 1935.
- PRICE, W. A.: Modelle – Können wir aus der Vergangenheit lernen? Jahrbuch HTG, 36. Bd., 1979.
- RAGUTZKI, G.: Untersuchungen zur Ermittlung suspendierter Feststoffe durch Trübungsmessungen. Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz Norderney, Jahresbericht, Band XXVI, 1974.
- REINECK, H. E.: Der Kastengreifer. Die Entwicklung eines Gerätes zur Entnahme ungestörter, orientierter Grundproben vom Meeresboden. Natur und Museum, 93, Frankfurt/M., 1963.
- REINECK, H. E.: Vergleich von Schlämm-Analysen mit der Pipette nach Köhn und dem Aräometer nach Casagrande. Senckenberg. leth., 48, Frankfurt/Main, 1967.
- RUCK, G., BARRICK, T. u. KALISVEWSKI: Bistatic radar sea state monitoring. Batelle Techn. Rep. Columbia Lab., Ohio, 1972.
- RYE, H.: The Stability of some currently used Wave Parameters. Coastal Engineering, Vol. 1, No. 1, 1977.
- SACHS, L.: Statistische Methoden. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2. Aufl., 1972.
- SCHÄFER, V.: Wellenmeßanlage vor der Probstei – Meßeinrichtung. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 65, 1979.
- SCHRADER, J. P.: Kennzeichnende Seegangsrößen für drei Meßpunkte in der Elbmündung. Hamburger Küstenforschung, H. 4, 1968.
- SCHUHMACHER, M.: Seawater Corrosion Handbook. Noyes Data Corporation, Park Ridge, N. J., USA, 1979.
- SCHÜTTRUMPF, R.: Über die Bestimmung von Bemessungswellen für den Seebau am Beispiel der südlichen Nordsee. Mitt. des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 39, 1973.
- SCHWARZE, H. u. VOLLMERS, H. J.: Tidemodelle mit fester Sohle. Mitteilungsheft DVWK, Nr. 39, 1978.
- SIEFERT, W.: Die Seegangsverhältnisse im Elbmündungsgebiet. Hamburger Küstenforschung, H. 18, 1971.
- SIEFERT, W.: Über Formen, Längen und Fortschrittsrichtungen von Wellen in küstennahen Flachwassergebieten. Hamburger Küstenforschung, H. 24, 1972.
- SIEFERT, W.: Über den Seegang in Flachwassergebieten. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 40, 1974.
- SIEFERT, W.: Einfluß verschiedener Dammvarianten (Plan 19) auf Hydrologie und Morphologie im küstennahen Watt. Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk, Planungsst. 33, 1975 (unveröffentlicht).
- SILVESTER, R.: Coastal Engineering. Elsevier Scientific Publishing Comp., 1974.

- SOULSBY, R. L.: The effect of an Axial Component of Current on the output of an EM-Log. University College of N-Wales, Marine Science Lab Report Nr. 70-1, 1970.
- TUCKER, M. J.: EM-Current Meters, an Assessment of their Problems and Potentialities. Current measuring techniques, National Institut of Oceanography, Wormley, U. K., 1965.
- UNESCO Technical Papers in Marine Science: An Intercomparison of some Currentmeters I. Vol. 11, 1969.
- UNESCO Technical Papers in Marine Science: An Intercomparison of some Currentmeters II. Vol. 17, 1974.
- VOLLMERS, H. J.: Zur Problematik von hydraulischen Modellen mit beweglicher Sohle. Institut für Wasserwesen, HWBw München, Mitt. Nr. 2, 1979.
- WALGER, E.: Zur Darstellung von Korngrößenverteilungen. Geol. Rundschau, 54, Stuttgart, 1964.
- WEISSMANN, D. E.: Two frequency radar interferometry applied to the measurement of ocean wave height. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. AP-21, 1973.
- WEMELSFELDER, P. J.: De integrator als golf-metapparatur. De ingenieur, H. 10, 1954.
- WENZEL, D.: Ultraschall-Wellenschreibenanlage vor Sylt. Wasserwirtschaft, 64. Jg., Berlin, 1974.
- WIEGEL, R. L.: Oceanographical Engineering. Prentice-Hall International Series in Theoretical and Applied Mechanics, 1964.
- WOHLENBERG, E.: Der horizontale Wasserschöpfer. DHZ, Nr. 3, 1950.
- YSKER, J. S.: Seegangsmessungen in der Jade. Die Küste, H. 34, 1979.

## Anhang

### 1. Vorbemerkung

Zur Ergänzung des eher theoretischen Hauptteils sollen im Anhang Meßprogramme aus der täglichen Praxis des Küsteningenieurwesens bzw. der Küstenforschung in Kurzform dargestellt werden. Hierbei handelt es sich vornehmlich um Strömungs- und Seegangmeßprogramme mit unterschiedlicher Zielsetzung. Im übrigen wird für vertiefende Arbeiten auf die großenteils veröffentlichten Untersuchungsprogramme der Fachdienststellen verwiesen. Auf die Darstellung bodenkundlicher u. a. Programme wurde verzichtet, da diese bereits in der Aufgabenstellung sehr speziell ausgerichtet und die hieraus gewonnenen Erfahrungen nicht übertragbar sind. Die gerätemäßigen Aspekte sind im Hauptteil behandelt.

Den Programmen vorangestellt wurden tabellarische Zusammenstellungen von Strömungs- bzw. Seegangmeßgeräten mit ihren wesentlichen Daten. Dies schien insofern erforderlich, als im Hauptteil nur die Meßprinzipien behandelt worden sind. Die Vorstellung einzelner Geräte in diesem Zusammenhang, wie es anfangs geplant war, würde der Übersichtlichkeit geschadet haben.

### 2. Tabellarische Zusammenstellung ausgewählter Strömungsmeßgeräte

In den Tabellen A 1 bis A 13 und in den Abb. A 1 bis A 7 sind einige Strömungsmeßgeräte dargestellt, wie sie insbesondere im deutschen Küsteningenieurwesen angewendet werden. Insofern ist diese Zusammenstellung nicht vollständig. Die ursprüngliche Absicht, einen – auch international – breiteren Überblick zu geben, scheiterte daran, daß Rückfragen bei Herstellern und Anwendern entweder gar nicht oder nur unzureichend beantwortet wurden. Schließlich wurde angestrebt, vor allem diejenigen Geräte herauszustellen, mit welchen bereits umfangreiche Erfahrungen gewonnen werden konnten.

### 3. Strömungsmessungen an der deutschen Nordseeküste

Aus der Vielzahl von Strömungsmessungen, die in den letzten Jahren an der deutschen Nordseeküste vorgenommen worden sind, wurden drei Programme unterschiedlicher Aufgabenstellung ausgewählt, die hier nachfolgend vorgestellt werden.

#### 3.1 Meßprogramm Dithmarscher Bucht

**Aufgabe:** Infolge von Vordeichungsvorhaben sind insgesamt 4800 ha Watt, Vorland und Sommerköge dem Flutraum der Dithmarscher Bucht entzogen worden. Zur Abschätzung der Folgen dieses Eingriffes auf die hydrologischen und morphologischen Vorgänge des betroffenen Gebietes wurde in Erst- und Wiederholungsmessungen insbesondere das Strömungsgeschehen untersucht, um hieraus eine kausale Deutung geänderter Erosions- und Sedimentationsbedingungen, Rück- und Neubildung von Prielen u. ä. herbeiführen zu können. Ausführende Dienststelle war das Amt für Land- und Wasserwirtschaft Heide, Dezernat Gewässerkunde, Büsum.

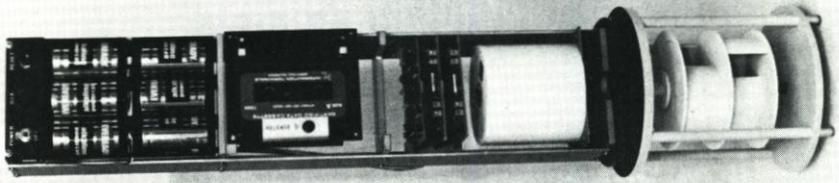


Abb. A 1: Strommesser mit Savonius-Rotor (Tab. A 2)

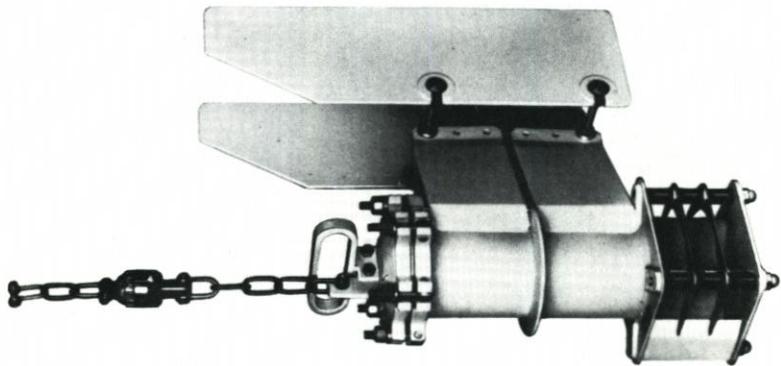


Abb. A 2: Strommesser mit Savonius-Rotor (Tab. A 3)

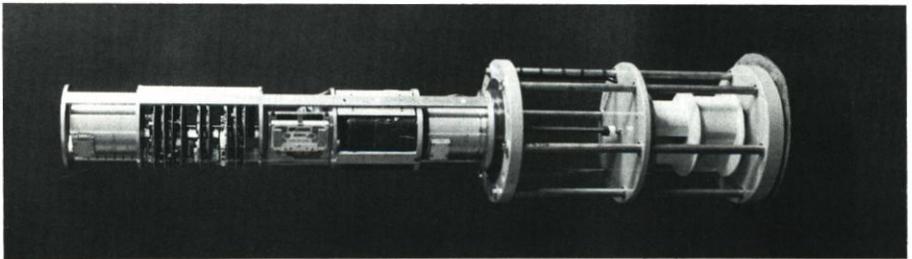


Abb. A 3: Strommesser mit Savonius-Rotor (Tab. A 4)

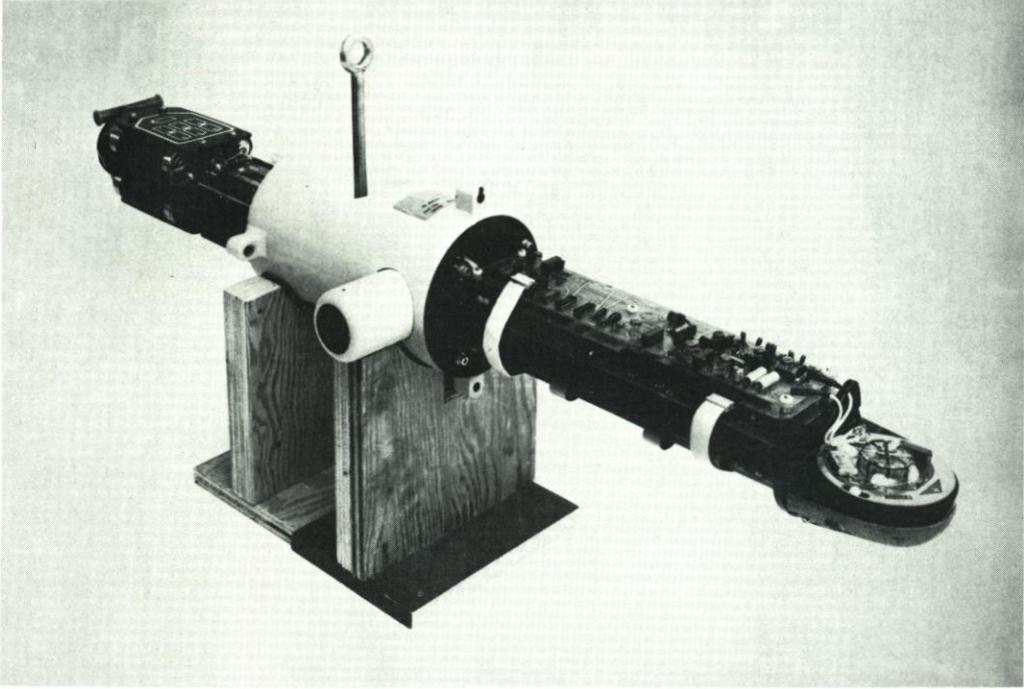


Abb. A 4: Elektromagnetischer Strommesser (Tab. A 6)

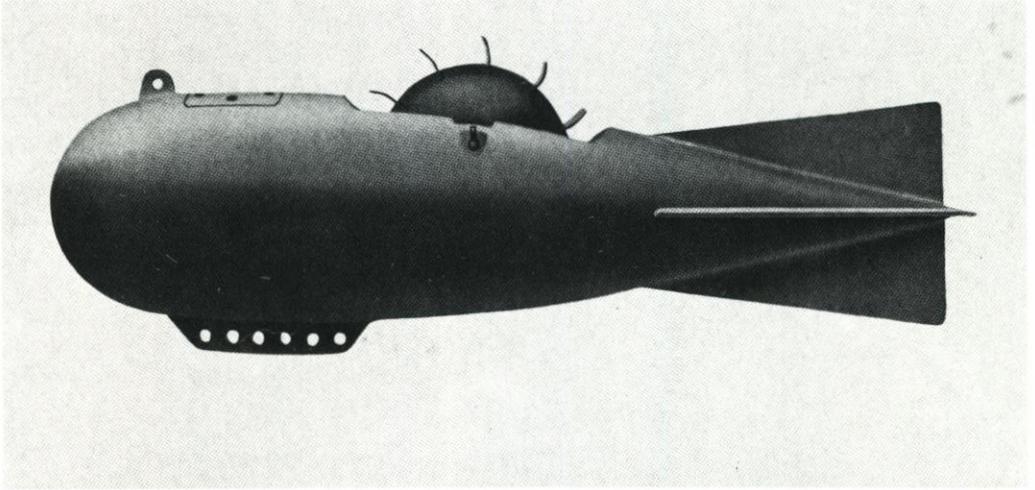


Abb. A 5: Schaufelradstrommesser (Tab. A 8)

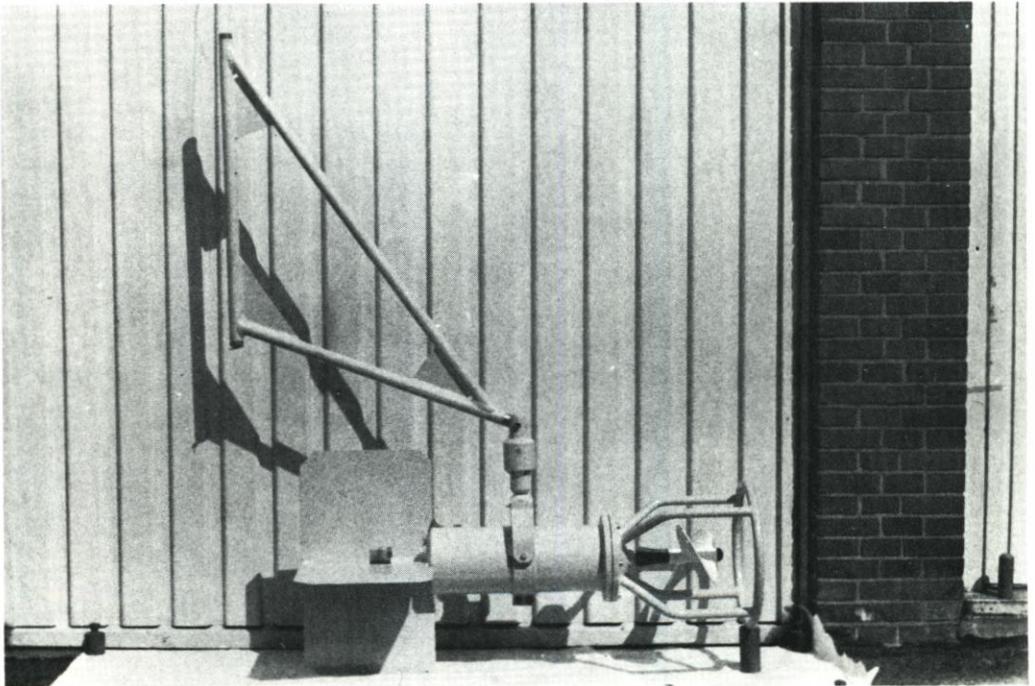


Abb. A 6: Wattstrommesser (Tab. A 10)

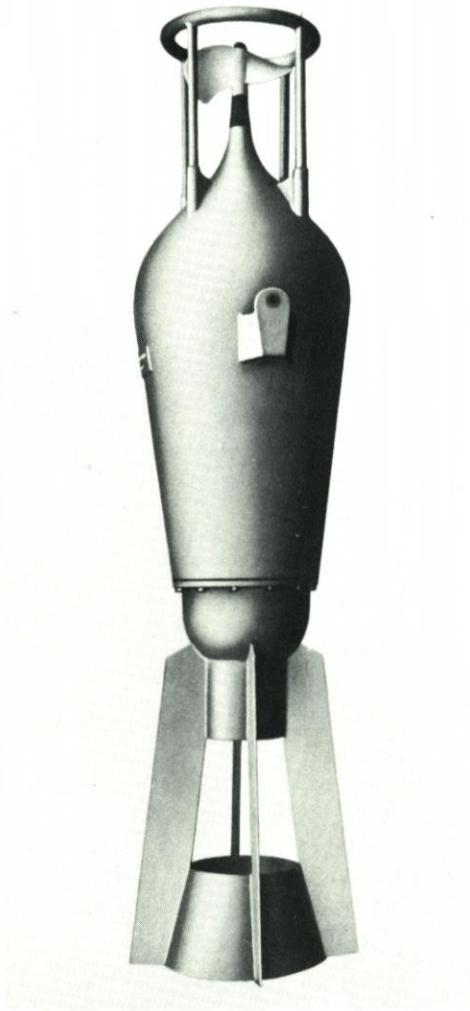


Abb. A 7: Flachseestrommesser (Tab. A 11)

**Strommesser mit Savonius-Rotor**

Gerätehersteller  
(Name und Sitz der Firma)

Aanderaa Instruments  
5050 Nesttun  
Bergen – Norwegen

<b>Gerätedaten</b>	Strommesser Modell 4 u. 5 (RCM 4 u. RCM 5)
<b>Gemessene Parameter</b>	Geschwindigkeit, Richtung, Temperatur Bei Bedarf zusätzlich: Leitfähigkeit, Druck
<b>Meßbereich</b>	Geschw.: 2,5–250 cm/s, Richtung: 0–357°, Temp.: –2,46° bis 21,4 °C
<b>Genauigkeit</b>	Geschw.: ± 1 cm/s o. 2 %, Richtung: ± 5°, Temp.: ± 0,15 °C
<b>Auflösung</b>	Geschw.: 0,1 % F.S., Richtung: 0,35°, Temp.: 0,1 % F.S.
<b>Ansprechempfindlichkeit</b>	Geschw.: 2 cm/s
<b>Abmessungen des Sensors (Meßwertaufnehmer)</b>	Rotor: 105 mm Ø, 75 mm Höhe
<b>Meßverfahren (Prinzip)</b>	Umdrehungszählung, Magnetkompaß mit Potentiometer, Thermistor. Meßgerät stellt sich in Stromrichtung ein. Meßwertwandlung über selbstabgleichende Meßbrücke
<b>Fehlermöglichkeit</b>	Bewuchs, zu große Neigung, Verankerungsbewegungen rel. zum Wasser
<b>Langzeitdrift</b>	nicht feststellbar
<b>Einsatzdauer des Gerätes</b>	10-min-Meßintervall: 69 Tage    Meßintervall einstellbar: 60-min-Meßintervall: 416 Tage    0,5; 1; 2; 5; 10; 15; 20; 60 min
<b>Energieversorgung/Bedarf</b>	A-magnetische Batterie; 9V, 4 Ah (63 × 50 × 80 mm)
<b>Eichmöglichkeit</b>	im Schlepptank oder beim Hersteller (aufwendig)
<b>Wartung/Service</b>	Austausch von Verschleißteilen (Lager etc.) und Modulen durch versierten Labor-Techniker
<b>Geräteabmessungen</b>	Länge: 1370 mm, Höhe: 750 mm, Registriereinheit: 128 mm Ø
<b>Gerätgewicht (Luft/Wasser)</b>	in Luft: 25,4 kg, in Wasser: 17,7 kg
<b>Art der Verankerung/Auslegung</b>	Verankerungssystem mit Ankerstein und Auftriebskörper
<b>Meßwertregistrierung</b>	Magnetbandregistrierung, 10-bit Binärwort je Meßwert Speicherkapazität: 60 000 Worte
<b>Meßdatenauswertung</b>	automatische Datenauswertung über Auswertegerät mit Computer (Mikroprozessor)
<b>Empfohlener Anwendungsbereich</b>	RCM 4: bis 2000 m Wassertiefe RCM 5: bis 6000 m Wassertiefe
<b>Referenzen, Literatur- hinweise, Erfahrungen, Bemerkungen</b>	Bisher sind mehr als 2400 Strommesser verkauft worden. Leichtes und handliches Gerät. Für Wartung ist geschultes Personal erforderlich

**Strommesser mit Savonius-Rotor**

Gerätehersteller  
(Name und Sitz der Firma)

Inter Ocean Systems  
3510 Kurtz Street  
San Diego, CA 92110

<b>Gerätedaten</b>	Strommesser Modell 135 N
<b>Gemessene Parameter</b>	Geschwindigkeit, Richtung Bei Bedarf zusätzlich: Temperatur, Druck, Salzgehalt
<b>Meßbereich</b>	Geschw.: 5–300 cm/s, Richtung: 0–360°
<b>Genauigkeit</b>	Geschw.: $\pm 3$ cm/s, Richtung: $\pm 4^\circ$
<b>Auflösung</b>	Geschw.: 1,5 cm/s, Richtung: 1°
<b>Ansprechempfindlichkeit</b>	Geschw.: 1,5 cm/s
<b>Abmessungen des Sensors (Meßwertaufnehmer)</b>	Rotor: 100 mm $\varnothing$ , 100 mm Höhe
<b>Meßverfahren (Prinzip)</b>	Umdrehungszählung, Magnetkompaß Meßgerät stellt sich in Stromrichtung ein
<b>Fehlermöglichkeit</b>	Durch Antifouling weitgehend gegen Bewuchs geschützt, Neigung $> 30^\circ$ , Verankerungsbewegung rel. z. Wasser
<b>Langzeitdrift</b>	nicht feststellbar
<b>Einsatzdauer des Gerätes</b>	abhängig vom Meßintervall bis 180 Tage
<b>Energieversorgung/Bedarf</b>	Trockenbatterien $9 \times 1,5$ V, 10 Ah
<b>Eichmöglichkeit</b>	im Schlepptank oder beim Hersteller (aufwendig)
<b>Wartung/Service</b>	Austausch von Verschleißteilen (Lager etc.) und Modulen durch versierten Labor-Techniker
<b>Geräteabmessungen</b>	Länge: 600 mm, Höhe: 660 mm, Registriereinheit: 152 mm $\varnothing$
<b>Gerätegewicht (Luft/Wasser)</b>	in Luft: 16 kg, in Wasser: 5 kg
<b>Art der Verankerung/Auslegung</b>	Verankerungssystem mit Ankerstein und Auftriebskörper
<b>Meßwertregistrierung</b>	Magnetbandregistrierung, 8-bit Binärwort je Meßwert Speicherkapazität: 210 000 Worte, Philips-Kassette
<b>Meßdatenauswertung</b>	automatische Datenauswertung über Auswertegerät mit Computer (Mikroprozessor)
<b>Empfohlener Anwendungsbereich</b>	bis 1000 m Wassertiefe
<b>Referenzen, Literatur- hinweise, Erfahrungen, Bemerkungen</b>	Gerät ist mit Modifikationen auch als direkt anzeigender Strömungs- messer oder mit Analogregistrierung auf Schreiber erhältlich. Für Wartung ist geschultes Personal erforderlich

**Strommesser mit Savonius-Rotor**

Gerätehersteller  
(Name und Sitz der Firma)

Vertrieb: Hydro-Bios  
Am Jägersberg 5  
2300 Kiel-Holtenau

<b>Gerätedaten</b>	Strommesser Alexejew, Modell DCR	
<b>Gemessene Parameter</b>	Geschwindigkeit, Richtung	
<b>Meßbereich</b>	Geschw.: 2,5–148 cm/s, Richtung: 0–360°	
<b>Genauigkeit</b>	Geschw.: 4 % F.S., Richtung: $\pm 5^\circ$	
<b>Auflösung</b>	Geschw.: 2 cm/s, Richtung: 5°	
<b>Ansprechempfindlichkeit</b>	Geschw.: 2,5 cm/s	
<b>Abmessungen des Sensors (Meßwertaufnehmer)</b>	Rotor: 150 mm $\varnothing$ , Höhe: 130 mm	
<b>Meßverfahren (Prinzip)</b>	Umdrehungszählung auf mechanisch arbeitendes Druckwerk. Magnetkompaß mit Druckziffern. Meßgerät stellt sich in Stromrichtung ein	
<b>Fehlermöglichkeit</b>	Bewuchs, Neigung $> 15^\circ$ Verankerungsbewegungen rel. zum Wasser	
<b>Langzeitdrift</b>	Laufzeitfehler im mechanischen Uhrwerk	
<b>Einsatzdauer des Gerätes</b>	5-min-Meßintervall: 5 Tage	Meßintervall einstellbar: 60-min-Meßintervall: 60 Tage 5, 10, 15, 20, 30, 60 min
<b>Energieversorgung/Bedarf</b>	Federwerk	
<b>Eichmöglichkeit</b>	im Schlepptank	
<b>Wartung/Service</b>	Austausch von Verschleißteilen (Lager etc.) durch Labor-Techniker	
<b>Geräteabmessungen</b>	Länge: 560 mm, Höhe: 800 mm, Registriereinheit: 280 mm $\varnothing$	
<b>Gerätegewicht (Luft/Wasser)</b>	29–49 kg in Luft (abhängig von zulässiger Einsatzwassertiefe)	
<b>Art der Verankerung/Auslegung</b>	Verankerungssystem mit Ankerstein und Auftriebskörper	
<b>Meßwertregistrierung</b>	Ausdruck der Meßwerte mittels Gummidruckziffern auf Papierstreifen	
<b>Meßdatenauswertung</b>	direkt ablesbare Meßwerte auf Papierstreifen, Handauswertung	
<b>Empfohlener Anwendungsbereich</b>	250–1200 m, besonders für Messungen mit sofortiger Auswertung	
<b>Referenzen, Literaturhinweise, Erfahrungen, Bemerkungen</b>	„Der neue Strömungsmesser nach Alexejew“ in Wasser u. Boden Heft 4/76	

**Strommesser mit Savonius-Rotor**

Gerätehersteller  
(Name und Sitz der Firma)

AMF-Sea-Link Systems  
3061 Centreville Road  
Herndon, Virginia

<b>Gerätedaten</b>	Vektormittelnder Strommesser, VACM 610 A
<b>Gemessene Parameter</b>	Geschwindigkeit, Richtung (automatisch gemittelt über ein Zeitintervall von 15 min) Bei Bedarf zusätzlich: Temperatur, Druck
<b>Meßbereich</b>	Geschw.: 2,5–300 cm/s, Richtung: 0–360°
<b>Genauigkeit</b>	Geschw.: $\pm 2$ cm/s, Richtung: $\pm 2,8^\circ$
<b>Auflösung</b>	Geschw.: 1,25 cm/s, Richtung: $2,8^\circ$
<b>Ansprechempfindlichkeit</b>	Geschw.: 2,5 cm/s
<b>Abmessungen des Sensors (Meßwertaufnehmer)</b>	Rotor: 160 mm $\varnothing$ , 200 mm Höhe; Fahne: 100 $\times$ 200 mm
<b>Meßverfahren (Prinzip)</b>	Umdrehungszählung, Richtungsfahne wird mit Nordreferenz (Magnetkompaß) verglichen
<b>Fehlermöglichkeit</b>	Bewuchs, Neigung $> 15^\circ$ Verankerungsbewegungen rel. zum Wasser
<b>Langzeitdrift</b>	nicht feststellbar
<b>Einsatzdauer des Gerätes</b>	bei Stromgeschwindigkeit $\sim 150$ cm/s: 9 Monate $< 150$ cm/s: 1 Jahr
<b>Energieversorgung/Bedarf</b>	Quecksilber-Batterie, keine weiteren Angaben des Herstellers
<b>Eichmöglichkeit</b>	im Schlepptank oder beim Hersteller (aufwendig)
<b>Wartung/Service</b>	Austausch von Verschleißteilen (Lager etc.) durch versierten Labor-Techniker
<b>Geräteabmessungen</b>	Länge: 1970 mm; Durchmesser: 190 mm
<b>Gerätgewicht (Luft/Wasser)</b>	in Luft: 73 kg, in Wasser: 35 kg
<b>Art der Verankerung/Auslegung</b>	Verankerungssystem mit Ankerstein und Auftriebskörper
<b>Meßwertregistrierung</b>	Magnetbandregistrierung (Philips-Kassette) Speicherkapazität: $11,5 \times 10^6$ bits
<b>Meßdatenauswertung</b>	automatische Datenauswertung über Auswertegerät mit Computer (Microprozessor)
<b>Empfohlener Anwendungsbereich</b>	bis 6000 m Wassertiefe
<b>Referenzen, Literatur- hinweise, Erfahrungen, Bemerkungen</b>	Einsatz Erfahrungen liegen vor: IfM der Universität Kiel, DHI, Hamburg. Für Wartung ist geschultes Personal erforderlich

<b>Akustischer Strömungsmesser</b>	
Gerätehersteller (Name und Sitz der Firma)	Neil Brown Instrument Systems, Inc. Cataumet, MA 02534, USA
<b>Gerätedaten</b>	Strömungsmesser ACM-2
<b>Gemessene Parameter</b>	Geschwindigkeit, Richtung, Temperatur (8-bit), Zeit Auf Wunsch: Druck, Vector-gemittelt
<b>Meßbereich</b>	Geschw.: $\pm 250$ cm/s, Richtung: 0–360° Temperatur: –2,4 bis 35,85 °C
<b>Genauigkeit</b>	Geschw.: $\pm 1$ cm/s o. 5 %, Richtung: $\pm 2^\circ$ Temperatur: $\pm 0,5^\circ$ C
<b>Auflösung</b>	Geschw.: 1,5 mm/s, Richtung: 0,1°, Temp.: 0,15 °C
<b>Ansprechempfindlichkeit</b>	Geschw.: 0,5 mm/s, Richtung 0,2 s
<b>Abmessungen des Sensors (Meßwertaufnehmer)</b>	Geschw.: 10 cm <sup>3</sup>
<b>Meßverfahren (Prinzip)</b>	akustische Phasenverschiebung, Spannung proportional zur Wasserströmung, Kompass 2-Achsen Flux-Gate. Kardanisch aufgehängtes Magnetometer, Thermistor
<b>Fehlermöglichkeit</b>	keine, da keine mechanisch bewegten Teile
<b>Langzeitdrift</b>	Geschw.: besser als 1 cm/s, Uhr 0,002 %
<b>Einsatzdauer des Gerätes</b>	mit Memodyne-Recorder: Standard 180 Tage, Option 360 Tage mit Sea Data Recorder: Standard 100 Tage, Option 200 Tage
<b>Energieversorgung/Bedarf</b>	Alkaline-Batteriesatz, Bedarf weniger als 0,05 Watt
<b>Eichmöglichkeit</b>	Eichkurve wird mitgeliefert. Werte können vor dem Einsatz mit Kalibriereinheit TSDR geprüft werden
<b>Wartung/Service</b>	Batterie- und Kassettenwechsel durch Labortechniker
<b>Geräteabmessungen</b>	Länge: 1400 mm, Durchmesser 230 mm
<b>Gerätegewicht (Luft/Wasser)</b>	Gewicht in Luft 43 kg, in Wasser 22 kg
<b>Art der Verankerung/Auslegung</b>	Verankerungssystem mit Auftriebskörper
<b>Meßwertregistrierung</b>	Magnetbandkassette Memodyne 201 mit 105 000 gemittelten Werten oder Sea Data 610 mit 500 000 gemittelten Werten
<b>Meßdatenauswertung</b>	Memodyne oder Sea Data Magnetband-Lesegeräte Interface für alle bekannten Computer lieferbar
<b>Empfohlener Anwendungsbereich</b>	bis 6000 m Wassertiefe
<b>Referenzen, Literatur- hinweise, Erfahrungen, Bemerkungen</b>	Erfahrungsbericht veröffentlicht vom NORDA-Workshop

**Elektromagnetischer Strommesser**

Gerätehersteller  
(Name und Sitz der Firma)

EG u. C  
151 Bear Hill Poad  
Waltham, Mass.

<b>Gerätedaten</b>	Strommesser Modell CT/3
<b>Gemessene Parameter</b>	Geschwindigkeit, Richtung, Temperatur
<b>Meßbereich</b>	Geschw.: 3–300 cm/s, Richtung: 0–360° Temperatur: –2° bis 36,4 °C
<b>Genauigkeit</b>	Geschw.: $\pm 1,5$ cm/s, o. 3 %, Richtung: $\pm 5^\circ$ Temperatur: $\pm 0,15^\circ\text{C}$
<b>Auflösung</b>	Geschw.: 1,17 cm/s, Richtung: 2,8°, Temp.: 0,15 °C
<b>Ansprechempfindlichkeit</b>	Geschw.: 3 cm/s
<b>Abmessungen des Sensors (Meßwertaufnehmer)</b>	Durchmesser: 60 mm, Länge: 75 mm
<b>Meßverfahren (Prinzip)</b>	elektromagnetische Induktion nach dem Faradayschen Prinzip. Magnetkompaß mit indukt. Abtastung, Thermistor. Meßgerät stellt sich in Stromrichtung ein
<b>Fehlermöglichkeit</b>	Neigung $> 35^\circ$
<b>Langzeitdrift</b>	nicht feststellbar
<b>Einsatzdauer des Gerätes</b>	5-min-Meßintervall: 6 Monate
<b>Energieversorgung/Bedarf</b>	Trockenbatterien $14 \times 1,5$ V
<b>Eichmöglichkeit</b>	beim Gerätehersteller, Nachkalibrierung mittels lieferbarem Kalibriergerät FC/1
<b>Wartung/Service</b>	Austausch von Dichtungen
<b>Geräteabmessungen</b>	Durchmesser: 140 mm, Länge: 1070 mm, Höhe: 610 mm
<b>Gerätegewicht (Luft/Wasser)</b>	in Luft: 22,7 kg, in Wasser: 6,8 kg
<b>Art der Verankerung/Auslegung</b>	Verankerungssystem mit Ankerstein und Auftriebskörper
<b>Meßwertregistrierung</b>	Magnetbandregistrierung (Philips-Kassette)
<b>Meßdatenauswertung</b>	automatische Datenauswertung über Auswertegerät TR/Z wahlweise in analoge Meßwerte für Schreiberanschluß oder Umformung der Daten in computergerechtes Format
<b>Empfohlener Anwendungsbereich</b>	bis 500 m Wassertiefe
<b>Referenzen, Literatur- hinweise, Erfahrungen, Bemerkungen</b>	Einsatzerfahrungen liegen vor bei der Fa. Preussag, Hannover, und Fachbereich Geowissenschaften der FU Berlin.

**Elektromagnetischer Strommesser**

Gerätehersteller  
(Name und Sitz der Firma)

Colnbrook Instrument  
Poyle Road  
Colnbrook, Bucks. England

<b>Gerätearten</b>	2-Komponenten-EM-Strommesser
<b>Gemessene Parameter</b>	Geschwindigkeit in zwei orthogonalen Richtungen
<b>Meßbereich</b>	Geschw.: $\pm 0-5$ m/s
<b>Genauigkeit</b>	$\pm 1\%$ F.S.
<b>Auflösung</b>	0,5 cm/s
<b>Ansprechempfindlichkeit</b>	keine Angabe
<b>Abmessungen des Sensors (Meßwertaufnehmer)</b>	a) 110 mm $\varnothing$ b) 53 mm $\varnothing$ c) 22 mm $\varnothing$
<b>Meßverfahren (Prinzip)</b>	elektromagnetische Induktion nach dem Faradayschen Prinzip. Sensor und Meßelektronik sind über Kabel miteinander verbunden
<b>Fehlermöglichkeit</b>	Bewuchs, Neigung $> 30^\circ$ , Drift der Elektronik
<b>Langzeitdrift</b>	$\pm 3$ cm/s für a)
<b>Einsatzdauer des Gerätes</b>	keine Angabe
<b>Energieversorgung/Bedarf</b>	$\pm 12$ V über Netzteil
<b>Eichmöglichkeit</b>	im Schlepptank oder mit Kalibriereinheit
<b>Wartung/Service</b>	durch Hersteller
<b>Geräteabmessungen</b>	Meßelektronik $220 \times 105 \times 170$ mm
<b>Gerätengewicht (Luft/Wasser)</b>	in Luft: 2 kg
<b>Art der Verankerung/Auslegung</b>	Sensor muß auf Grundgestell montiert werden
<b>Meßwertregistrierung</b>	Analogsignal je Achse für Anzeigeinstrument und Schreiber. Direkte Ablesung der Geschwindigkeit nicht möglich
<b>Meßdatenauswertung</b>	Handauswertung der beiden Komponenten (aufwendig)
<b>Empfohlener Anwendungsbereich</b>	küstennaher Bereich maximale Kabellänge zwischen Sensor und Meßelektronik: 200 m
<b>Referenzen, Literaturhinweise, Erfahrungen, Bemerkungen</b>	

<b>Schaufelradstrommesser</b>	
<b>Gerätehersteller</b> (Name und Sitz der Firma)	Hydrowerkstätten 2300 Kiel-Hassee
<b>Gerätedaten</b>	Schaufelradstrommesser 202
<b>Gemessene Parameter</b>	Geschwindigkeit, Richtung
<b>Meßbereich</b>	Geschw.: 20–300 cm/s, Richtung: 0–360°
<b>Genauigkeit</b>	Geschw.: $\pm 7,5$ cm/s, Richtung: $\pm 5^\circ$
<b>Auflösung</b>	Geschw.: 2,5 cm/s, Richtung: 2,8°
<b>Ansprechempfindlichkeit</b>	Geschw.: 15 cm/s
<b>Abmessungen des Sensors (Meßwertaufnehmer)</b>	Durchmesser des Schaufelrades: 640 mm
<b>Meßverfahren (Prinzip)</b>	Umdrehungszählung, Magnetkompaß Meßgerät stellt sich in Stromrichtung ein
<b>Fehlermöglichkeit</b>	Bewuchs, Lagerverschmutzung, Neigungswinkel $> 5^\circ$
<b>Langzeitdrift</b>	keine Angaben
<b>Einsatzdauer des Gerätes</b>	5-min-Meßintervall: 28 Tage
<b>Energieversorgung/Bedarf</b>	Federwerk für Filmtransport, 4 Monozellen 1,5 V
<b>Eichmöglichkeit</b>	im Schlepptank
<b>Wartung/Service</b>	Austausch von Verschleißteilen (Lager etc.) durch versierten Labor-Techniker
<b>Geräteabmessungen</b>	Länge: 2400 mm, Durchmesser: 600 mm
<b>Gerätegewicht (Luft/Wasser)</b>	in Luft: 150 kg, in Wasser: 125 kg Auftrieb
<b>Art der Verankerung/Auslegung</b>	Verankerung mit Ankerstein
<b>Meßwertregistrierung</b>	Filmregistrierung auf 16-mm-Film im Gray-Code mit 2 <sup>8</sup> -Variablen
<b>Meßdatenauswertung</b>	halbautomatische Auswertung mit Auswertegerät u. Übertragung der Meßwerte auf Lochstreifen für Computerauswertung
<b>Empfohlener Anwendungsbereich</b>	bis 50 m Wassertiefe
<b>Referenzen, Literatur- hinweise, Erfahrungen, Bemerkungen</b>	Geräte werden im küstennahen Bereich eingesetzt, Wartung und Handhabung erfordern geschultes Personal

**Strommesser mit Impeller**

Gerätehersteller  
(Name und Sitz der Firma)

ENDECO  
Tower Building  
Marion, MA 02738

<b>Gerätedaten</b>	Strommesser Typ 174
<b>Gemessene Parameter</b>	Geschwindigkeit, Richtung Bei Bedarf zusätzlich: Temperatur
<b>Meßbereich</b>	Geschw.: 3–273 cm/s, Richtung: 0–360°
<b>Genauigkeit</b>	Geschw.: $\pm 8$ cm/s, Richtung: $\pm 7^\circ$
<b>Auflösung</b>	Geschw.: 2,4 cm/s, Richtung: 1,4°
<b>Ansprechempfindlichkeit</b>	Geschw.: 2,5 cm/s, Richtung: 2,5 cm/s
<b>Abmessungen des Sensors (Meßwertaufnehmer)</b>	Impellerdurchmesser: 350 mm
<b>Meßverfahren (Prinzip)</b>	Umdrehungszählung mittels Untersetzungsgetriebe, Abtastung einer Gray-Code-Scheibe mit Phototransistoren. Magnetkompaß mit Gray-Code-Scheibe. Gerät stellt sich in Stromrichtung ein
<b>Fehlermöglichkeit</b>	Bewuchs, Neigung, Verankerungsbewegung rel. zum Wasser
<b>Langzeitdrift</b>	keine Angabe
<b>Einsatzdauer des Gerätes</b>	3,75-min-Meßintervall: 70 Tage 7,5-min-Meßintervall: 110 Tage
<b>Energieversorgung/Bedarf</b>	Trockenbatterien 8 $\times$ 1,5 V (Eveready Nr. 1150)
<b>Eichmöglichkeit</b>	im Schlepptank oder beim Hersteller, Eichkurve wird mitgeliefert. Richtungseichung im Labor. Deviation wird b. Datenauswertung berücksichtigt
<b>Wartung/Service</b>	Austausch von Verschleißteilen (Lager etc.) durch versierten Labor-Techniker
<b>Geräteabmessungen</b>	Länge: 762 mm, Durchmesser: 406 mm
<b>Gerätgewicht (Luft/Wasser)</b>	in Luft: 12,3 kg, in Wasser: gewichtslos
<b>Art der Verankerung/Auslegung</b>	Verankerungssystem mit Ankerstein und Auftriebskörper
<b>Meßwertregistrierung</b>	Magnetbandregistrierung, 8-bit-Binärwort je Meßwert
<b>Meßdatenauswertung</b>	automatische Datenauswertung über Auswertegerät mit Computer (Mikroprozessor)
<b>Empfohlener Anwendungsbereich</b>	küstennaher Bereich, weiter keine Angabe
<b>Referenzen, Literaturhinweise, Erfahrungen, Bemerkungen</b>	Strommesser ist besonders für den Einsatz im Flachwasser konstruiert, wo Orbitalbewegung und Bodenströme bei Savonius-Rotoren erhebliche Fehler verursachen

**Strommesser mit Impeller**

Gerätehersteller  
(Name und Sitz der Firma)

Hydrowerkstätten  
2300 Kiel-Hassee

<b>Gerätedaten</b>	Wattstrommesser 432
<b>Gemessene Parameter</b>	Geschwindigkeit, Richtung
<b>Meßbereich</b>	Geschw.: 3–300 cm/s, Richtung: 0–360°
<b>Genauigkeit</b>	Geschw.: $\pm 3$ cm/s, Richtung: $\pm 5^\circ$
<b>Auflösung</b>	Geschw.: 2,5 cm/s, Richtung: 2,8°
<b>Ansprechempfindlichkeit</b>	Geschw.: 3 cm/s
<b>Abmessungen des Sensors (Meßwertaufnehmer)</b>	Impellerdurchmesser: 300 mm, Höhe: 250 mm
<b>Meßverfahren (Prinzip)</b>	Umdrehungszählung mittels Untersetzungsgetriebe auf eine Zählscheibe. Integration der Umdrehungszahl im Abstand von 5 min. Magnetkompaß mit Gray-Code-Scheibe
<b>Fehlermöglichkeit</b>	Bewuchs, Verschmutzung der Lager, Neigung $> 5^\circ$
<b>Langzeitdrift</b>	keine Angabe
<b>Einsatzdauer des Gerätes</b>	5-min-Meßintervall: 20 Tage 10-min-Meßintervall: 40 Tage
<b>Energieversorgung/Bedarf</b>	Trockenbatterien $4 \times 1,5$ V (JEC R20)
<b>Eichmöglichkeit</b>	im Schleppkanal, Eichkurve wird auf Wunsch mitgeliefert
<b>Wartung/Service</b>	Austausch von Verschleißteilen (Lager etc.) durch versierten Labor-Techniker
<b>Geräteabmessungen</b>	Gesamtlänge: 1400 mm, Durchmesser: 180 mm, über Propellerschutz und Leitflosse Durchmesser: 400 mm
<b>Gerätegewicht (Luft/Wasser)</b>	in Luft: 30 kg, in Wasser: 13 kg
<b>Art der Verankerung/Auslegung</b>	mit Dreibeinigeßtel im Watt
<b>Meßwertregistrierung</b>	Filmregistrierung auf 16-mm-Film
<b>Meßdatenauswertung</b>	halbautomatische Auswertung mit Auswertegerät und Übertragung der Meßwerte auf Lochstreifen für Computerauswertung
<b>Empfohlener Anwendungsbereich</b>	bis 100 m Wassertiefe in Watt und Prielen
<b>Referenzen, Literaturhinweise, Erfahrungen, Bemerkungen</b>	Einsatzerfahrungen liegen bei allen deutschen Wasser- und Schifffahrtsämtern vor. Wartung und Handhabung erfordern geschultes Personal

Tab.: A10

<b>Strommesser mit Impeller</b>	
<b>Gerätehersteller</b> (Name und Sitz der Firma)	Hydrowerkstätten 2300 Kiel-Hassee
<b>Gerätedaten</b>	Flachseestrommesser 333
<b>Gemessene Parameter</b>	Geschwindigkeit, Richtung
<b>Meßbereich</b>	Geschw.: 3–300 cm/s, Richtung: 0–360°
<b>Genauigkeit</b>	Geschw.: $\pm 3$ cm/s, Richtung: $\pm 5^\circ$
<b>Auflösung</b>	Geschw.: 2,5 cm/s, Richtung: 2,8°
<b>Ansprechempfindlichkeit</b>	Geschw.: 3 cm/s, Richtung: 5 cm/s
<b>Abmessungen des Sensors (Meßwertaufnehmer)</b>	Impellerdurchmesser: 300 mm, Höhe: 250 mm
<b>Meßverfahren (Prinzip)</b>	Umdrehungszählung mittels Untersetzungsgetriebe auf eine Zählscheibe. Magnetkompaß mit Gray-Code-Scheibe. Integration der Umdrehungszahl im Abstand von 5 min.
<b>Fehlermöglichkeit</b>	Bewuchs, Verschmutzung d. Lager, Neigung $> 5^\circ$ , Trimmfehler
<b>Langzeitdrift</b>	keine Angabe
<b>Einsatzdauer des Gerätes</b>	5-min-Meßintervall: 20 Tage 10-min-Meßintervall: 40 Tage
<b>Energieversorgung/Bedarf</b>	Trockenbatterien $4 \times 1,5$ V (IEC R20)
<b>Eichmöglichkeit</b>	im Schleppkanal, Eichkurve wird auf Wunsch mitgeliefert
<b>Wartung/Service</b>	Austausch von Verschleißteilen (Lager etc.) durch versierten Labor-Techniker
<b>Geräteabmessungen</b>	Durchmesser: 560 mm, Länge: 2450 mm
<b>Gerätgewicht (Luft/Wasser)</b>	in Luft: 75 kg, in Wasser: 120 kg Auftrieb!
<b>Art der Verankerung/Auslegung</b>	mit Ankerstein (spezieller Ankerstuhl)
<b>Meßwertregistrierung</b>	Filmregistrierung auf 16-mm-Film
<b>Meßdatenauswertung</b>	halbautomatische Auswertung mit Auswertegerät und Übertragung der Meßwerte auf Lochstreifen f. Computerauswertung
<b>Empfohlener Anwendungsbereich</b>	bis 50 m Wassertiefe
<b>Referenzen, Literaturhinweise, Erfahrungen, Bemerkungen</b>	Einsatzerfahrungen liegen bei allen deutschen Wasser- und Schifffahrtsämtern vor. Wartung und Handhabung erfordern geschultes Personal

Tab.: A11

**Strommesser mit Impeller**

Gerätehersteller  
(Name und Sitz der Firma)

Ott  
Kempten/Allgäu

<b>Gerätedaten</b>	Ott-Flügel-V
<b>Gemessene Parameter</b>	Geschwindigkeit, Richtung
<b>Meßbereich</b>	Geschw.: 3–500 cm/s, Richtung: 0–360°
<b>Genauigkeit</b>	Geschw.: $\pm 2$ cm/s, Richtung: $\pm 2^\circ$
<b>Auflösung</b>	Geschw.: 2 cm/s, Richtung: 2°
<b>Ansprechempfindlichkeit</b>	Geschw.: 3 cm/s
<b>Abmessungen des Sensors (Meßwertaufnehmer)</b>	Impellerdurchmesser: 130 mm
<b>Meßverfahren (Prinzip)</b>	Umdrehungszählung, direktanzeigendes Gerät, Meßdauer mind. 60 s. Richtungsanzeige durch schrittweise Messung des Winkels zwischen Instrumentenachse und magn. Nord.
<b>Fehlermöglichkeit</b>	Eventuell auftretende Fehler werden schnell bemerkt. Bewegung des Schiffes
<b>Langzeitdrift</b>	keine Angabe
<b>Einsatzdauer des Gerätes</b>	praktisch unbegrenzt, da Einsatz von Bord
<b>Energieversorgung/Bedarf</b>	Trockenbatterie 2 $\times$ 1,5 V und Akku 6 V
<b>Eichmöglichkeit</b>	im Schleppkanal, Geschw.-Eichkurve und Deviations-Eichkurve werden mitgeliefert
<b>Wartung/Service</b>	Austausch von Verschleißteilen (Lager etc.) sehr einfach
<b>Geräteabmessungen</b>	Länge: 1730 mm, Durchmesser: 150 mm
<b>Gerätgewicht (Luft/Wasser)</b>	in Luft: 23 kg
<b>Art der Verankerung/Auslegung</b>	über Handwinde mit Tiefenanzeige von Bord oder Brücken
<b>Meßwertregistrierung</b>	Direktanzeige, Ablesen der Meßwerte für Richtung und Geschwindigkeit
<b>Meßdatenauswertung</b>	Handauswertung der abgelesenen Meßwerte
<b>Empfohlener Anwendungsbereich</b>	Flachwasserbereich bis 25 m, in Prielen und Flüssen
<b>Referenzen, Literaturhinweise, Erfahrungen, Bemerkungen</b>	zuverlässig arbeitendes Gerät, Meßstörungen werden gleich erkannt

Tab.: A12

**Strommesser mit Impeller**

Gerätehersteller  
(Name und Sitz der Firma)

Plessey  
Surrey  
England

<b>Gerätedaten</b>	Strommesser MO 27
<b>Gemessene Parameter</b>	Geschwindigkeit, Richtung
<b>Meßbereich</b>	Geschw.: 4,3–457 cm/s, Richtung: 0–360°
<b>Genauigkeit</b>	Geschw.: $\pm 3$ cm/s o. 3 %, Richtung: $\pm 5^\circ$
<b>Auflösung</b>	Geschw.: 1 cm/s, Richtung: 3°
<b>Ansprechempfindlichkeit</b>	Geschw.: 3 cm/s
<b>Abmessungen des Sensors (Meßwertaufnehmer)</b>	Impellerdurchmesser: 120 mm, Höhe: 90 mm
<b>Meßverfahren (Prinzip)</b>	Umdrehungszählung, direktanzeigendes Gerät Magnetkompaß mit Potentiometer
<b>Fehlermöglichkeit</b>	Eventuell auftretende Fehler werden schnell bemerkt. Bewegung des Schiffes
<b>Langzeitdrift</b>	keine Angabe
<b>Einsatzdauer des Gerätes</b>	praktisch unbegrenzt, da Einsatz von Bord
<b>Energieversorgung/Bedarf</b>	Akku 31 V
<b>Eichmöglichkeit</b>	im Schleppkanal
<b>Wartung/Service</b>	Austausch von Verschleißteilen (Lager etc.) durch Labor-Techniker. Größere Reparaturen beim Hersteller
<b>Geräteabmessungen</b>	Unterwassereinheit: 508 × 254 × 204 mm
<b>Gerätegewicht (Luft/Wasser)</b>	in Luft: 5 kg
<b>Art der Verankerung/Auslegung</b>	über Handwinde mit Tiefenanzeige von Bord oder Brücken
<b>Meßwertregistrierung</b>	Direktanzeige, Ablesen der Meßwerte für Richtung und Geschwindigkeit, Dauer einer Messung: 17,2 s
<b>Meßdatenauswertung</b>	Handauswertung der abgelesenen Meßwerte
<b>Empfohlener Anwendungsbereich</b>	bis 183 m Wassertiefe, in Prielen und Flüssen
<b>Referenzen, Literatur- hinweise, Erfahrungen, Bemerkungen</b>	Zuverlässig arbeitendes Gerät, Meßstörungen werden gleich erkannt

**Meßnetz und Geräteeinsatz:** Anzahl, lagemäßige Verteilung und Stationierung der Meßgeräte sowie die Wahl des Gerätetyps erfolgte mit Rücksicht auf das vorgegebene morphologische Formeninventar des zu untersuchenden Wattgebietes. Es wurde ein geschwungenes Meßprofil vom Büsumer Watt durch den Wattstrom Piep über den Watrückken Bielshövensand bis Friedrichskoog-Spitze im Süden angeordnet. Weiter landwärts gelegene Positionen zur Messung der Veränderung der Strömung zur Küste hin wurden in die drei Hauptpriele eingebracht (Abb. A 8).

Der jeweilige Gerätetyp nebst Verankerung oder Aufhängung mußte folgenden Standortbedingungen genügen:

- Priele mit 4 bis 27 m Wassertiefe bei  $T_{nw}$ ,
- flache Priele mit 3,5 bis 1,0 m Wassertiefe bei  $T_{nw}$ ,
- hohe (bis + 0,7 m NN) und niedrige Watten,
- deichnahe Watten, die stark von Wattwanderern begangen werden.

Eigene Dauerstrommesser standen nicht zur Verfügung. Sie wurden von benachbarten Dienststellen ausgeliehen (WSA Tönning, Vorarbeiten- und Forschungsstelle Neuwerk, Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz Norderney). Folgende Geräte wurden eingesetzt:

- Schaufelrad-Strommesser für die tiefen Priele,
- Wattstrommesser mit korbartigem Traggerüst,
- Wattstrommesser System Hydrowerkstätten mit Dreibock-Traggerüst für die bei Ebbe trockenfallenden Stationen,
- Wattstrommesser, aber im korbartigen Traggerüst, mit Maschendraht ummantelt zum Schutz gegen Gerätebeschädigungen durch Wattwanderer,
- Schwimmflügel Fa. Ott, mit denen von jeweils mehreren Schiffen aus die Vertikalverteilung der Strömung zu messen war. Hier wurden auch Sink- und Schwebstoffmessungen sowie Salzgehalts- und Temperaturmessungen ausgeführt.

Die Messungen werden alle drei Jahre wiederholt.

**Meßergebnisse:** Die Messungen werden zeitlich in die Sommermonate gelegt, um das lange Tageslicht nutzen zu können und wegen der witterungsmäßig günstigen Voraussetzungen für die Eintrittswahrscheinlichkeit von Normaltiden. Die Dauermessungen werden so geplant, daß jeweils eine gesamte Mondphase erfaßt werden kann (Spring- und Nipptiden).

Die Querschnittsmessungen mit Flügeln vom Schiff aus erfolgen zur Zeit der Springtide und werden in den Dauermeßzeiten ausgeführt. Die Ergebnisse der ersten Messung aus dem Jahre 1970 sind in den Abb. A 8 und A 9 dargestellt. Es sind für den jeweils gesamten Meßzeitraum von 15 bis 20 Tagen folgende Werte ermittelt worden:

$$\begin{aligned} V_{f_{\max}}, V_{e_{\max}} &= \text{maximale Flut- und Ebbstromgeschwindigkeit} \\ V_{f_{\max m}}, V_{e_{\max m}} &= \text{mittlere maximale Flut- und Ebbstromgeschwindigkeit} \\ V_{f_m}, V_{e_m} &= \text{mittlere Flut- und Ebbstromgeschwindigkeit} \\ \overline{SV}_m &= \text{mittlerer Reststromvektor} \end{aligned}$$

Die mittleren Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten wurden den stark windbeeinflussten Tiden (= 6Bft) und solchen ohne Windeinfluß (= 3 Bft) zugeordnet. Die Ganglinie der Dauerstrommessung in Pos.  $W_5$  (Abb. A 10) zeigt z. B. bei Windeinfluß vom 2. bis 4. 7. 1970 (6-7 Bft) einen gegenüber Ruhigwetterlagen stark ausgeprägten Ebbstrom. Die Darstellungen in Abb. A 11 lassen das typische Strömungsgeschehen auf einem Watrückken (Pos.  $W_5$ ) und in einem Wattstrom (Pos.  $S_2$ ) sichtbar werden. Bei letzterem sind Flut- und Ebbstrom klar ausgebildet, und es treten insgesamt höhere Strömungsgeschwindigkeiten auf. Sie erreichen in



Profil A - A (siehe A8)

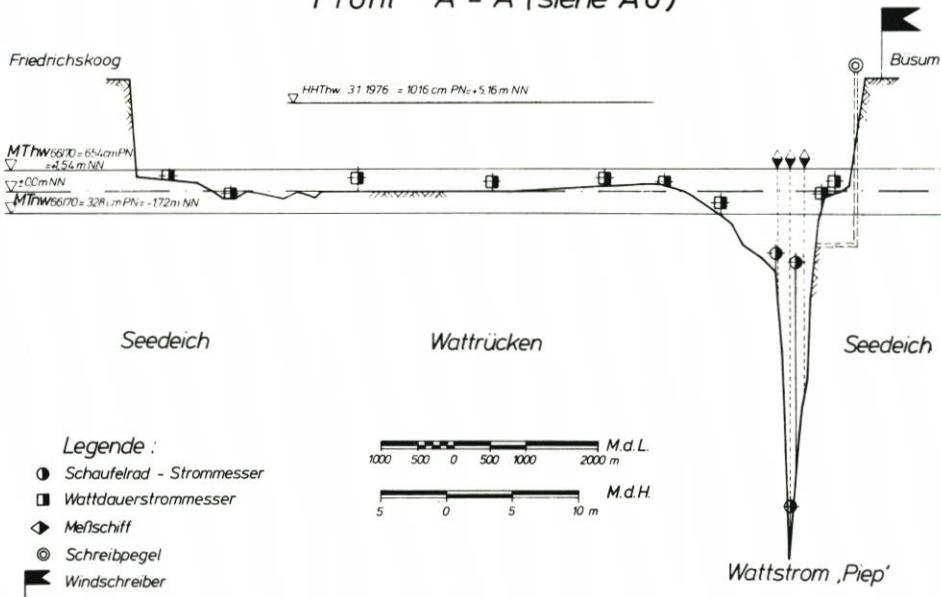


Abb. A 9: Profil A-A

der Piep bei Ebbe maximal 168 cm/s (Flut 148 cm/s). In der Meßstation S<sub>3</sub> beträgt die mittlere Flutstromgeschwindigkeit ohne Windeinfluß 112 cm/s und diejenige des Ebbstromes 146 cm/s. In den Prielen überwiegt fast ausnahmslos der Ebbstrom.

Der Reststrom auf den Watt (maximal 3,8 km/Tide) ist insgesamt seawärts gerichtet. In der Piep wurde der maximale Reststrom mit 5,2 km/Tide ermittelt. Für die Querschnittsmessung mit Flügeln von drei Meßschiffen in der Piep bei Büsum ist die Ermittlung der Stromquerschnittsflächen für je eine Messung etwa 2 Std. vor und nach Tidehochwasser in fünf verschiedenen Tiefen (5-minütige Meßdauer) in Abb. A 12 dargestellt.

Da das Programm noch laufend fortgeführt wird und das morphologische Formeninventar sich noch nicht voll auf die neuen Randbedingungen eingestellt hat, können weitere Ergebnisse noch nicht mitgeteilt werden.

### 3.2 Auswertung von Strömungsdaten einer Wattwasserscheiden-Messung bei Neuwerk

**Aufgabe:** Als Grundlage zu Planungen für einen Tiefwasserhafen bei Scharhörn dienen u. a. umfangreiche Strömungsmessungen (GÖHREN, 1968 u. 1969). In diesem Rahmen wurden auch zwei Meßreihen auf der Wattwasserscheide des Neuwerker Wattes (1966) und südlich davon (1970/71) ausgeführt, deren Ergebnisse in einem Anwendungsbeispiel vorgestellt werden (s. a. SIEFERT, 1975). Verantwortlich für die Untersuchungen war die Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk der Strom- und Hafenbauverwaltung der Hansestadt Hamburg.

**Reststrom bei mittleren Tiden:** Nach Strömungsmessungen in einem Profil

Meß-Pos.	Meßzeit	Daten aus der ganzen Meßzeit										Normaltiden ohne Windeinfluß (±3 Bft)						Tiden mit Wind (±3 Bft)		Bem.					
		VFmax cm/s	VFmax rw*	VFmax cm/s	VFmax in cm/s	VFm cm/s	SVFm km/ftid.	SVFm rw*	SVEm km/ftid.	SVEm rw*	SVm km/ftid.	VFmax cm/s	VFmax in cm/s	VFm cm/s	VFm rw*	VFm cm/s	VFm rw*	VFm cm/s	VFm cm/s						
W 1	25.6.-10.7. 31.7.-7.8.	28,6	115	35,0	19,5	27,3	11,4	16,4	1,0	109	1,6	305	0,7	331	18,3	26,8	10,3	103	16,8	305	29,1	13,6			
W 2	29.6.-10.7. 31.7.-7.8.	88,6	127	53,7	55,9	41,9	14,1	4,3	123	3,2	299	1,1	133	52,0	38,7	21,2	124	18,1	296	15,6	12,2				
W 3	26.6.-9.7. 31.7.-7.8.	111,3	142	34,8	78,7	61,6	13,9	11,0	6,0	153	5,6	349	2,7	78	66,8	66,3	13,3	144	17,1	24,2	14,4	11,0			
W 4	23.6.-9.7. 31.7.-7.8.	--	--	47,7	330	--	33,4	(4,4)	8,6	--	3,2	327	3,2	327	--	39,4	(6,0)	--	9,8	323	(3,2)	6,3		275/ 337	
W 5	26.6.-9.7. 14.7.-5.8.	--	--	47,7	306	--	34,5	--	17,7	--	2,6	304	2,6	304	--	36,5	--	--	18,6	300	--	13,4		260/ 304	
W 6	15.7.-5.8.	--	--	41,3	320	--	30,6	--	17,6	--	2,1	305	2,1	305	--	30,8	--	--	15,0	303	--	12,9		233/ 320	
W 7	17.7.-5.8.	--	--	41,3	254	--	32,0	--	18,7	--	2,6	249	2,6	249	--	36,7	--	--	25,1	243	--	9,3		307/ 351	
W 8	17.7.-30.7.	--	--	95,4	251	--	67,0	(6,9)	11,6	--	3,8	256	3,8	256	--	38,2	(8,1)	--	11,5	255	(8,6)	8,5		1,7 26,0	
W 9	17.7.-30.7.	--	--	31,8	241	--	20,1	--	11,3	--	1,6	249	1,6	249	--	21,0	--	--	14,4	239	--	4,9		207	
S 1	23.7.-14.7. 31.7.-7.8.	118,9	126	131,0	293	102,3	110,7	56,5	122,3	13,0	124	124,9	288	3,7	205	102,9	111,0	55,1	123	70,3	270	59,9	67,7		207
S 2	23.7.-14.7. 14.7.-6.8.	142,0	113	148,0	291	106,8	123,8	60,4	69,3	12,7	121	14,2	289	5,2	268	103,3	125,4	59,0	119	69,2	288	60,0	73,6		207
S 3	23.7.-14.7. 14.7.-6.8.	148,2	102	166,6	293	117,6	145,0	82,7	97,7	13,1	103	12,0	290	2,0	57	112,3	146,8	55,4	103	51,6	292	.	.		207
S 4	13.7.-11.8.	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--		
S 5	20.7.-5.8.-11.11.	143	100,1	324	98,1	91,4	53,2	51,8	10,6	144	9,0	23	1,6	153	94,5	89,2	52,6	144	32,3	322	.	.			
S 6	10.8.-5.8.-9.7.	60	113,2	249	76,5	91,6	14,6	18,7	8,3	61	9,8	247	1,8	277	68,7	78,6	13,1	68	16,8	243	16,3	20,7			
S 7	11.7.-23.7.-13.7.	125	112,0	294	90,7	84,9	52,3	48,6	8,2	294	9,7	127	2,8	174	90,2	94,7	51,3	127	52,5	294	52,4	46,1			
S 8	11.7.-29.7.-7.10.	156	129,0	310	55,9	100,4	33,2	55,0	5,9	150	10,5	312	5,1	292	61,6	116,3	37,6	156	64,2	311	35,5	54,7			
S 9	ausgefallen	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--		
S 10	17.7.-20.7.-19.5.	104	161,6	286	92,3	112,4	53,2	88,6	11,2	109	10,8	286	0,8	159	92,9	134,4	52,1	114	59,7	286	56,7	53,1			

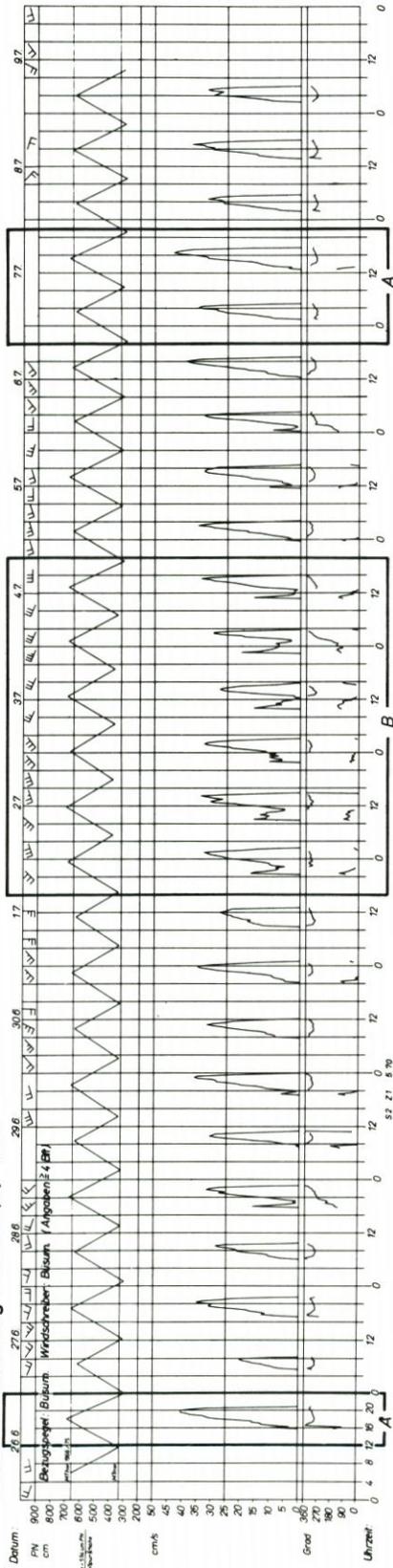
Lage der Meßstationen siehe Lageplan (A8) und Ganglinien (A11)

amt für Land- und Wasserwirtschaft Heide  
Dezernat Gewässerkunde Büsum

Tideströmungen in der  
Dithmarscher Bucht  
1. Dauerstrommessung 1970

Abb. A 10: Dauerstrommessung 1970

Dauerstrommessung Pos. W5 (5) 1970



Legende:  
 A = windunbeeinflusst  
 B = windbeeinflusst  
 Tidesromgang-Charakteristik:  
 Pos. W5 = Watten-Typ  
 Pos. S2 = Priel-Typ

Amf für Land- und Wasserwirtschaft Heide  
 Dezernat Gewässer-kunde Büsum

Tidesromungen in der  
 Dithmarscher Bucht 1970

Dauerstrommessung Pos. S2 (12) 1970

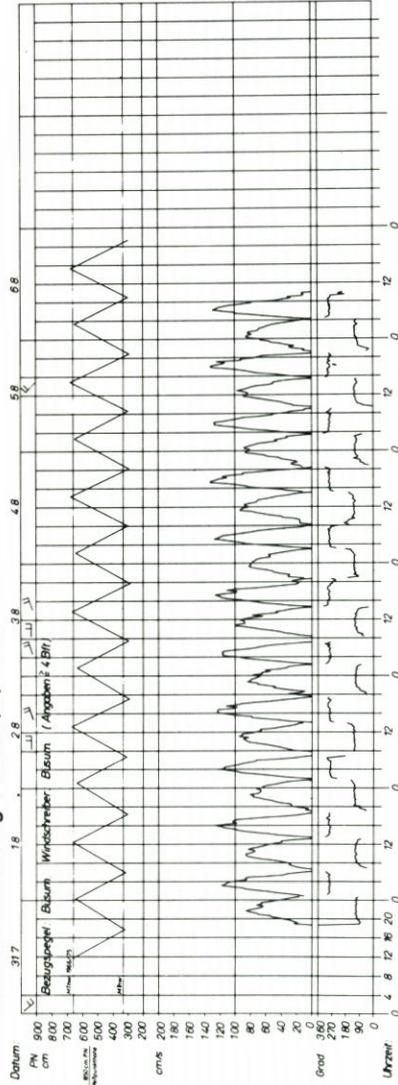


Abb. A 11: Strömungsganglinien, Wasserstände, Windverhältnisse

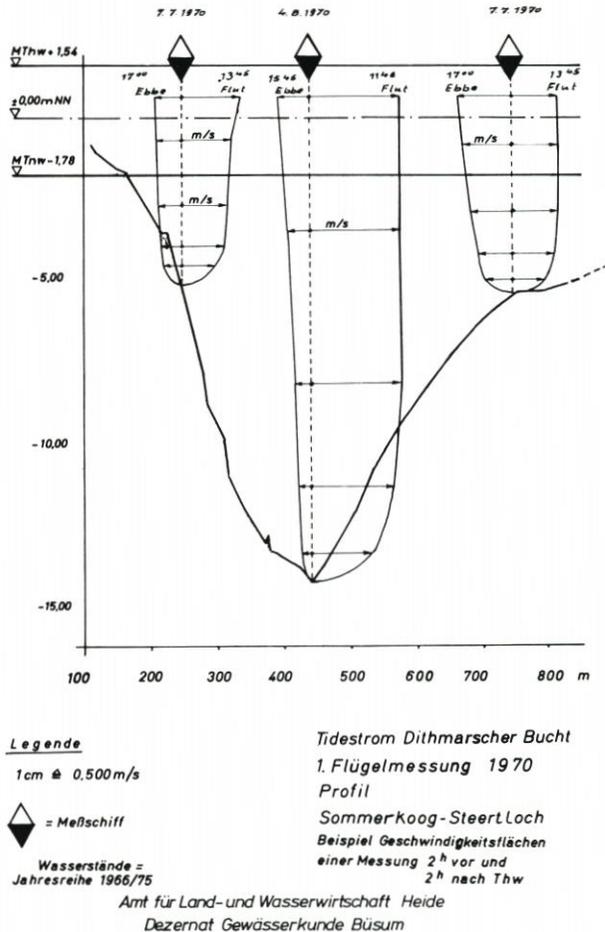


Abb. A 12: Profilmessung 1970 mit Ottflügel

auf der Wattwasserscheide (Abb. A 13) wurde 1966 festgestellt, daß in einer durch Wind nicht gestörten Tide

- rd. 1,88 Mio m<sup>3</sup> nach Norden und
- rd. 20,34 Mio m<sup>3</sup> nach Süden

strömten. Die Differenz ergibt die nach Süden versetzte Wassermenge von 18,5 Mio m<sup>3</sup>.

Ein ausgedehntes Meßprogramm in einem Profil auf dem südlichen Wattrand brachte 1970/71 – wiederum für eine windfreie Tide – eine Wasserversetzung von

- rd. 25,12 Mio m<sup>3</sup> nach Norden und
- rd. 30,86 Mio m<sup>3</sup> nach Süden,

woraus sich eine Differenz von

$$5,7 \text{ Mio m}^3$$

errechnet. Bei der Beurteilung der Differenz dieser beiden Werte ist zunächst zu berücksichtigen, daß zur Berechnung der Wassermengen erhebliche Vereinfachungen vorgenommen werden müssen. So ist die Wahl der Breite der jedem Meßpunkt zuzuordnenden Teilquerschnitte weitgehend willkürlich. Außerdem wird die Strömungsgeschwindigkeit über die Tiefe

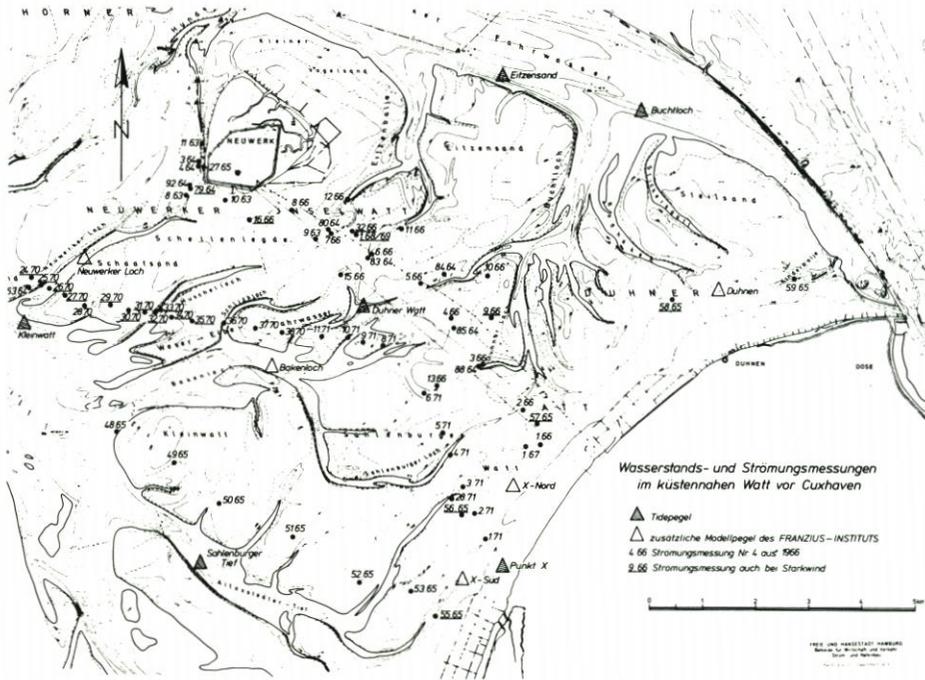


Abb. A 13: Wasserstands- und Strömungsmessungen im küstennahen Watt von Cuxhaven

als konstant angenommen. Das ist besonders in Prielen (die nur im Querschnitt 1970/71 vorhanden sind) unsicher. Es ist weiterhin zu bedenken: Der Flächeninhalt zwischen den beiden Profilen beträgt etwa  $15 \text{ km}^2$ . Mit  $1,5 \text{ m}$  mittlerer Wassertiefe bei MThw errechnet sich das Tidevolumen zu rd.  $22,5 \text{ Mio m}^3$ . Während der Flut fließen nach den Profilmessungen durch den südlichen Querschnitt (Profil 70/71)  $25,12 \text{ Mio m}^3$ , durch den nördlichen (Profil 66)  $1,88 \text{ Mio m}^3$  nach Norden. Die Differenz von  $25,12 - 1,88 = 23,24 \text{ Mio m}^3$  entspricht dem dazwischen zu füllenden Tideraum. Bei Ebbe müßten nach Süden durch den südlichen Querschnitt  $20,34 + 22,5 = 42,8 \text{ Mio m}^3$  abfließen. Tatsächlich sind nur  $30,86 \text{ Mio m}^3$  „gemessen“ worden. Die Differenz von rd.  $12 \text{ Mio m}^3$  ist z. T. zu erklären durch og. Unsicherheiten bei der Mengenermittlung. Sie kann aber auch auf morphologische Veränderungen im Neuwerker Fahrwasser zwischen den Meßzeiten zurückgeführt werden.

Die Ergebnisse zeigen, mit welchen Ungenauigkeiten solche Berechnungen behaftet sein können. Für eine bessere Übersichtlichkeit sind in Abb. A 14 Prozentwerte angegeben. Ferner wurden die Daten aus beiden Profilen so ausgeglichen, daß sie genau zueinander passen: Die in beiden Profilen nach N setzenden Wassermengen werden berücksichtigt, wie sie gemessen wurden. Für die in beiden Profilen nach S setzenden Wassermengen werden die ausgeglichenen Zahlen  $14$  und  $37 \text{ Mio m}^3$  verwendet, wobei die Teilmengen im Querschnitt nach den gemessenen Prozentzahlen berechnet werden.

Strömungen bei Sturmfluten: Aus dem Gebiet zwischen Neuwerk und der Küste liegt eine Reihe von Strömungsmessungen bei Starkwindlagen und Sturmfluten vor (Abb. A 13). Da diese jedoch bei unterschiedlichen Windrichtungen, -stärken und vor allem -dauern und damit auch bei sehr verschiedenen Wasserständen erfolgten, sind allgemeine Aussagen schwierig. Gewissen Aufschluß gibt jedoch Abb. A 15. Bei mittleren Tiden liegen

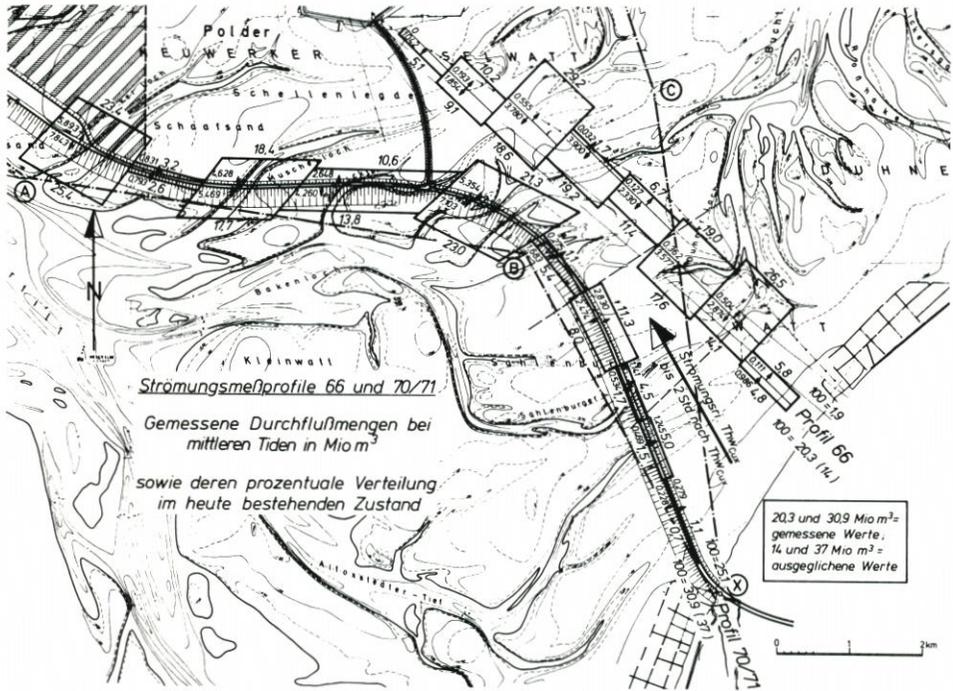


Abb. A 14: Durchflußmengen zwischen Neuwerk und Küste

die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten im höheren Watt (SKN + 0,5 und höher) zwischen 10 und 80 cm/s mit Schwergewicht bei etwa 40 cm/s, in den Prielen und Prielausläufern dagegen zwischen 80 und 110 cm/s mit Schwergewicht bei etwa 90 cm/s, also deutlich höher. Unter Windeinfluß nehmen die Strömungen im Watt stark zu. Sie liegen in dem betrachteten Gebiet zwischen 60 und 100 cm/s. In den Prielen ist dagegen teilweise eine Abnahme der  $v_{\max}$  auf Werte zwischen ebenfalls 60 und 100 cm/s festzustellen.

Wenn diese Ergebnisse auch nur mäßig belegt sind, so lassen sie doch den Schluß zu, daß bei Sturmfluten die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten in den Prielen und im hohen Watt etwa gleich sind.

Über die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten ist eine ähnliche allgemeine Aussage schwer zu treffen. Beispiele deuten für eine mittlere Sturmflut auf rd. 0,5 m/s als Mittel über die gesamte Sturmflutdauer hin. Dieser Wert wird im folgenden weiter verwendet.

**Wassermengen bei Sturmfluten:** Die bei einer mittleren Sturmflut, wie am 2. 11. 1965 oder am 1. 12. 1966, über die Wattwasserscheide zwischen Neuwerk und der Küste setzende Tidewassermenge wurde nach Messungen an drei Positionen zu rd. 700 Mio m<sup>3</sup> ermittelt (GÖHREN, 1969).

Eine zweite Berechnung über die Querschnitte auf dem südlichen Watrand zwischen Oberem Wittsand und Arensch wurde unter folgenden Annahmen ausgeführt:

- Wind aus WSW mit Strömungsrichtungen senkrecht zur Trasse (in Übereinstimmung mit obiger Berechnung),
- Strömungsgeschwindigkeit über Breite und Tiefe des Querschnittes konstant (in Übereinstimmung mit vorstehendem Beispiel),
- mittlere Strömungsgeschwindigkeit 0,5 m/s (in Übereinstimmung mit Messungen),

Max. Strömungsgeschwindigkeiten  
zwischen Neuwerk und der Küste

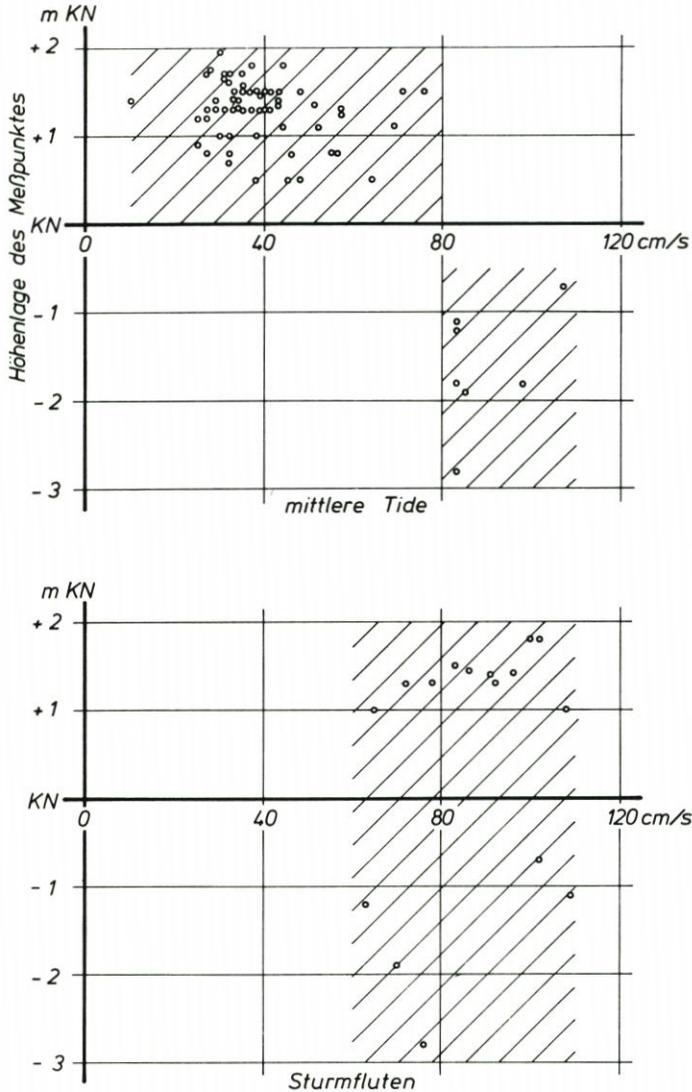


Abb. A 15: Max. Strömungsgeschwindigkeiten zwischen Neuwerk und der Küste

- Dauer der Überströmung 24 Std. (Messungen während der og. Sturmfluten: 20,5 bis 26 Std.),
- mittlerer Wasserstand für die gesamte Sturmflutdauer, MThw + 1,0 m = 730 cm PN (wie bei den og. Sturmfluten).

Die Berechnungen führten zu einer Tidewassermenge von rd. 1 Million m<sup>3</sup> in diesem südlicheren Querschnitt.

3.3 Meßprogramm Westerästuar

Aufgabe: Im Rahmen des 12-m-Ausbaues der Außenweser werden zur Erfassung der Veränderung hydrologisch/morphologischer Verhältnisse (Rinnenentwicklungen, Plattenverlagerungen), die sich nachteilig auf die Stabilität der Schifffahrtsrinne auswirken können,

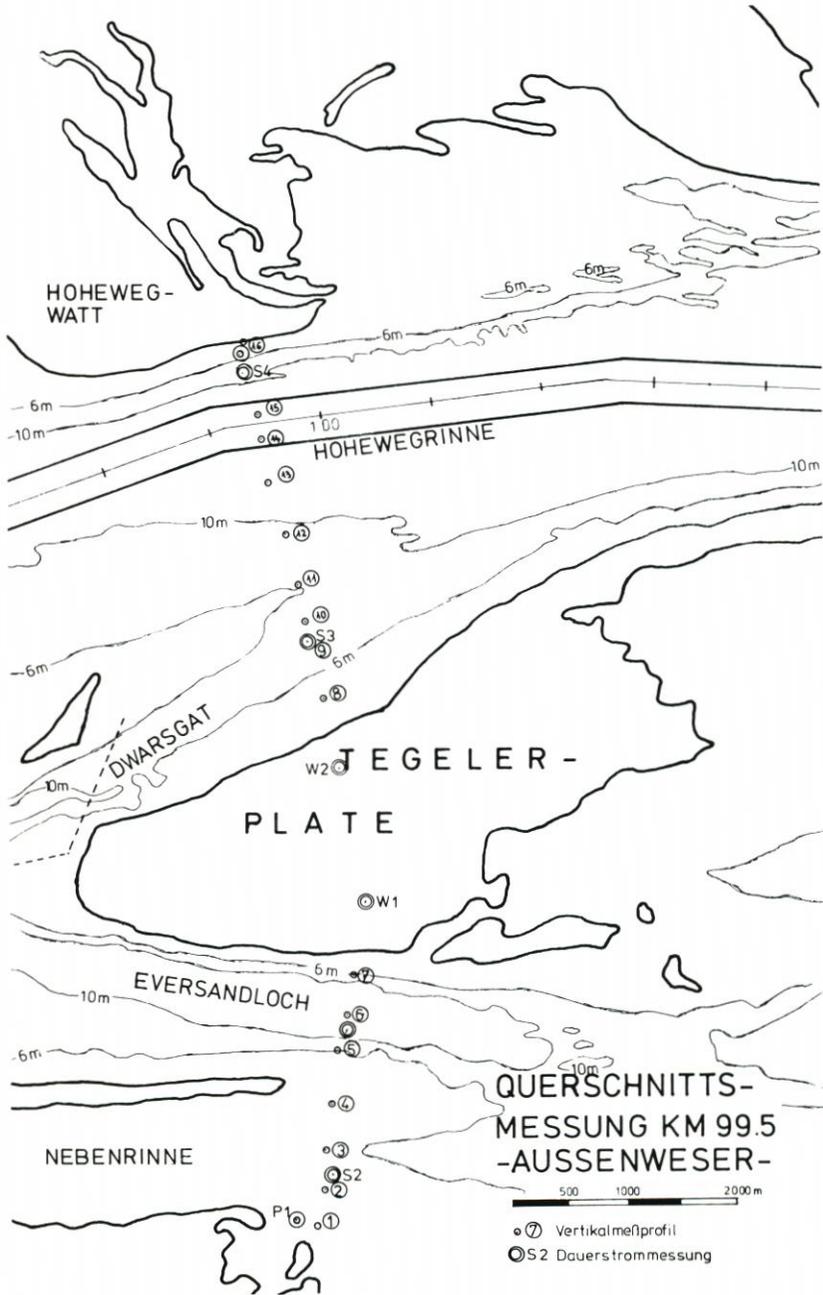


Abb. A 16: Meßprofil Außenweser

gewässerkundliche Untersuchungen vorgenommen. Besondere Bedeutung kommt dabei der quasisyntoptischen Erfassung der Strömung in bestimmten Querschnitten des Ästuars zu.

Die negative Entwicklung eines Stromdurchbruchs im Osten der Tegeler Plate (Abb. A 16), die ab 1890 zu erkennen war, führte zu einer dauernd erforderlichen Beobachtung der Strömungen und Querschnittsgrößen.

Die Querschnittsveränderung in der Nebenrinne (Eversandloch) ist dabei in starkem Maße vom Einfluß der Alten Weser auf die Tegeler Rinne abhängig (GÖHREN, 1962). Mit zunehmender Bedeutung des Eversandloches nimmt die Querschnittsgröße im Hauptfahrwasser (Hohewegrinne) ab (BARTHEL, 1979).

Verantwortlich für die Untersuchungen ist das Wasser- und Schiffsamt Bremerhaven.

WASSER-UND SCHIFFFAHRTSAMT  
BREMERHAVEN  
GEWÄSSERKUNDL

BLATT NR.: 10  
DATUM: 17.11.1979  
ARCHIV-NR.: 6779  
KENNZIFFER: 966  
GERÄT NR.: 4530  
SPOLE : 3

DAUERSTROMMESSUNG

Ed. Std/Uhr.	M I N U T E N											
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
73.08	v 64	64	66	63	66	65	55	57	55	55	54	50
	R 142	145	149	152	152	151	150	155	146	144	149	144
	C 5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
	L 25.9	25.9	25.8	25.7	25.7	25.7	25.7	25.7	25.7	25.6	25.6	25.5
	S 26.4	26.4	26.3	26.2	26.2	26.2	26.2	26.2	26.2	26.1	26.1	25.9
74.09	v 48	54	63	53	49	41	39	39	42	46	41	42
	R 145	149	142	145	151	146	161	151	147	147	152	151
	C 5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
	L 25.7	25.7	26.0	26.0	25.9	25.9	26.3	26.1	26.2	26.2	26.3	26.3
	S 26.2	26.2	26.5	26.5	26.4	26.4	26.8	26.6	26.7	26.7	26.8	26.8
75.10	v 43	40	42	40	35	31	28	24	23	19	17	15
	R 152	151	171	167	164	163	166	164	159	161	164	169
	C 5.2	5.2	5.2	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3
	L 26.3	26.4	27.1	27.4	27.4	27.4	27.4	27.4	27.3	27.4	27.4	27.4
	S 26.8	26.9	27.7	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	27.9	28.0	28.0	28.0
76.11	v 13	10	6	7	7	6	8	8	11	14	17	20
	R 168	180	215	201	192	230	287	318	323	328	324	326
	C 5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3
	L 27.4	27.4	27.4	27.4	27.4	27.4	27.4	27.4	27.4	27.4	27.4	27.4
	S 28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0
77.12	v 25	28	31	33	35	36	41	42	41	41	46	49
	R 330	328	331	337	332	331	331	330	334	332	333	334
	C 5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.2
	L 27.3	27.3	27.3	27.2	27.2	27.2	27.2	27.1	27.0	27.0	26.9	26.9
	S 27.9	27.9	27.9	27.7	27.7	27.7	27.7	27.6	27.5	27.5	27.4	27.5
78.13	v 48	52	52	53	59	63	64	64	62	57	53	56
	R 336	335	335	335	335	338	337	333	339	338	334	335
	C 5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
	L 26.7	26.6	26.6	26.3	26.2	26.1	26.1	26.1	26.0	26.0	26.0	26.0
	S 27.3	27.2	27.2	26.6	26.7	26.6	26.6	26.6	26.5	26.5	26.5	26.5
79.14	v 54	57	57	68	65	56	45	45	46	48	44	42
	R 338	340	337	341	338	343	345	349	344	342	338	337
	C 5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
	L 26.0	26.1	26.3	26.6	26.6	26.7	26.7	26.6	26.6	26.5	26.3	26.2
	S 26.5	26.6	26.6	27.2	27.2	27.3	27.2	27.2	27.2	27.1	26.8	26.7
80.15	v 41	38	38	39	39	39	37	37	35	33	33	29
	R 338	344	348	343	336	334	336	339	339	344	348	345
	C 5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.1	5.1	5.1	5.1	5.0	5.0
	L 26.2	26.0	25.9	26.0	25.8	25.6	25.4	25.1	24.9	24.5	24.2	24.4
	S 26.7	26.5	26.4	26.5	26.3	26.1	25.9	25.6	25.4	24.9	24.7	24.9

Abb. A 17: Meßwerte einer Dauerstrommessung

### 3.4 Geräteeinsatz und Erfahrungen

Bei den Querschnittsmessungen werden folgende Geräte eingesetzt:

- Ott-Flügel: Einsatz vom verankerten Schiff aus, Messung alle 15 Minuten in Tiefenstufen von 2 m, Feststellung der Richtung nach Schiffskompaß bzw. im Gerät eingebautem Kompaß; Auflistung der Meßwerte an Bord; personalintensiv bei Einsatz und Auswertung.
- Aanderaa-Strömungsmesser: Einsatz entweder vom verankerten Schiff aus oder, je nach Tiefe, zwei bis vier Geräte mit Auftriebskörper am Grund verankert; Aufzeichnung der Meßwerte (Strömungsgeschwindigkeit und -richtung, Temperatur, Salzgehalt, Druck) auf Magnetband, Auswertung auf einer Kleinrechenanlage, Erfassung der Meßwerte alle 5 Minuten (Abb. A 17 u. A 18), Zeitintervalle sind wählbar.
- Wattstrommesser: (Aanderaa bzw. Hydrowerkstätten) selbstregistrierend, zur Erfassung der Platenüberströmung bzw. der Seitenräume. Auswertung der auf Magnetband bzw. Film aufgezeichneten Meßergebnisse über eine Rechenanlage.

Wasser- u. Schiffsamt Bremerhaven  
 Gewässerkunde  
 Blatt: 3  
 Archiv - Nr.: 6779  
 Weser - km: 92.5  
 D A U E R S T R O M M E S S U N G im Tidegebiet der Weser  
 Messtelle: 32 (RNST) Pos.: 53 43 42 N; 8 19 14 P;  
 Messdauer von 14.11.79 bis 29.11.79  
 Bezugspegel: ..... Messhöhe: 1.5 m ueber Grund  
 Berechnungen mit PP 9830B/1AK  
 Aufgestellt: Bremerhaven, den 18.1.80  
 .....

Mittlerer Stromungsverlauf

\* = Geschwindigkeiten in cm/s                      x = Temperaturen in Grad C  
 . = Richtungen in Grad                              + = Salzgehalt in 10‰

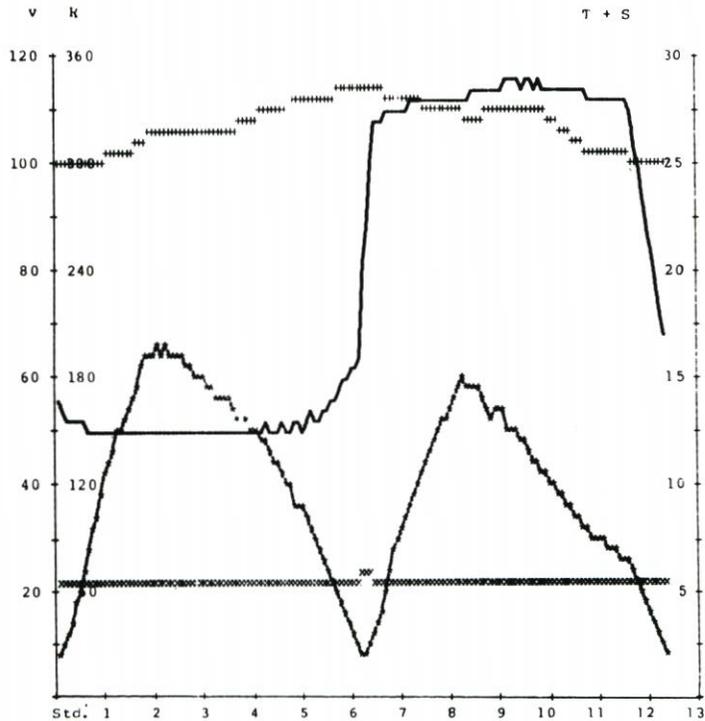


Abb. A 18: Ganglinien von Strömungsrichtung und -geschwindigkeit

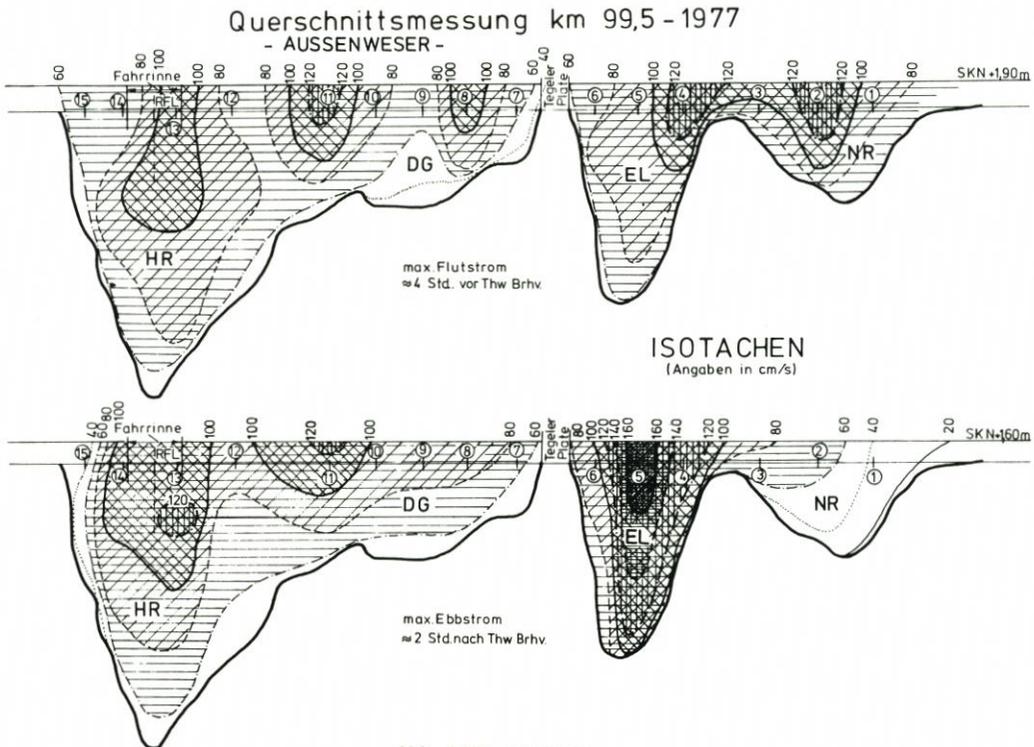
- Mindestens ein Tidepegel zur Erfassung der Wasserstände während der Messungen.

Bei den Querschnittsmessungen haben sich in den letzten Jahren zunehmend die selbstregistrierenden Aanderaa-Geräte bewährt. Obwohl die Einsatzmöglichkeiten durch Wetter und andere Bedingungen (Beeinträchtigung der Meßergebnisse z. B. durch Seegang und Bewuchs der Geräte) beschränkt sind, bietet die unkomplizierte Handhabung und schnelle Auswertbarkeit der gewonnenen Daten große Vorteile. Die Magnetbänder werden von einem Lesegerät der Firma Aanderaa aufbereitet und die Daten einem Tischrechner HP 9830 zugeführt. Sämtliche Auswertungen sind je nach Komfort des Rechenprogramms möglich.

Die Einzelmesspunkte werden entsprechend der Form des Querschnittes bzw. der Teilquerschnitte angeordnet (Abb. A 16). Da die Querschnittsbreiten im äußeren Ästuar eine Vielzahl von Meßpunkten erfordern, kann eine Messung häufig nicht in einer Tide ausgeführt werden. In diesem Fall muß die Verteilung der Meßpunkte auf mehrere Meßtage so erfolgen, daß wichtige Teilquerschnitte, die gegebenenfalls verglichen werden sollten, an jedem Tag miterfaßt werden. Für den Vergleich ist die Umrechnung der Meßwerte auf eine mittlere Tide erforderlich. Diese Umrechnung ermöglicht weiterhin die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mehrerer Querschnitts- und Dauerstrommessungen.

### 3.5 Ergebnisdarstellung

Für den Vergleich mehrerer Querschnittsmessungen hat sich in den letzten Jahren ein bestimmtes Auswerte- und Darstellungsschema ergeben, das hier in zwei Beispielen vorgeführt wird:



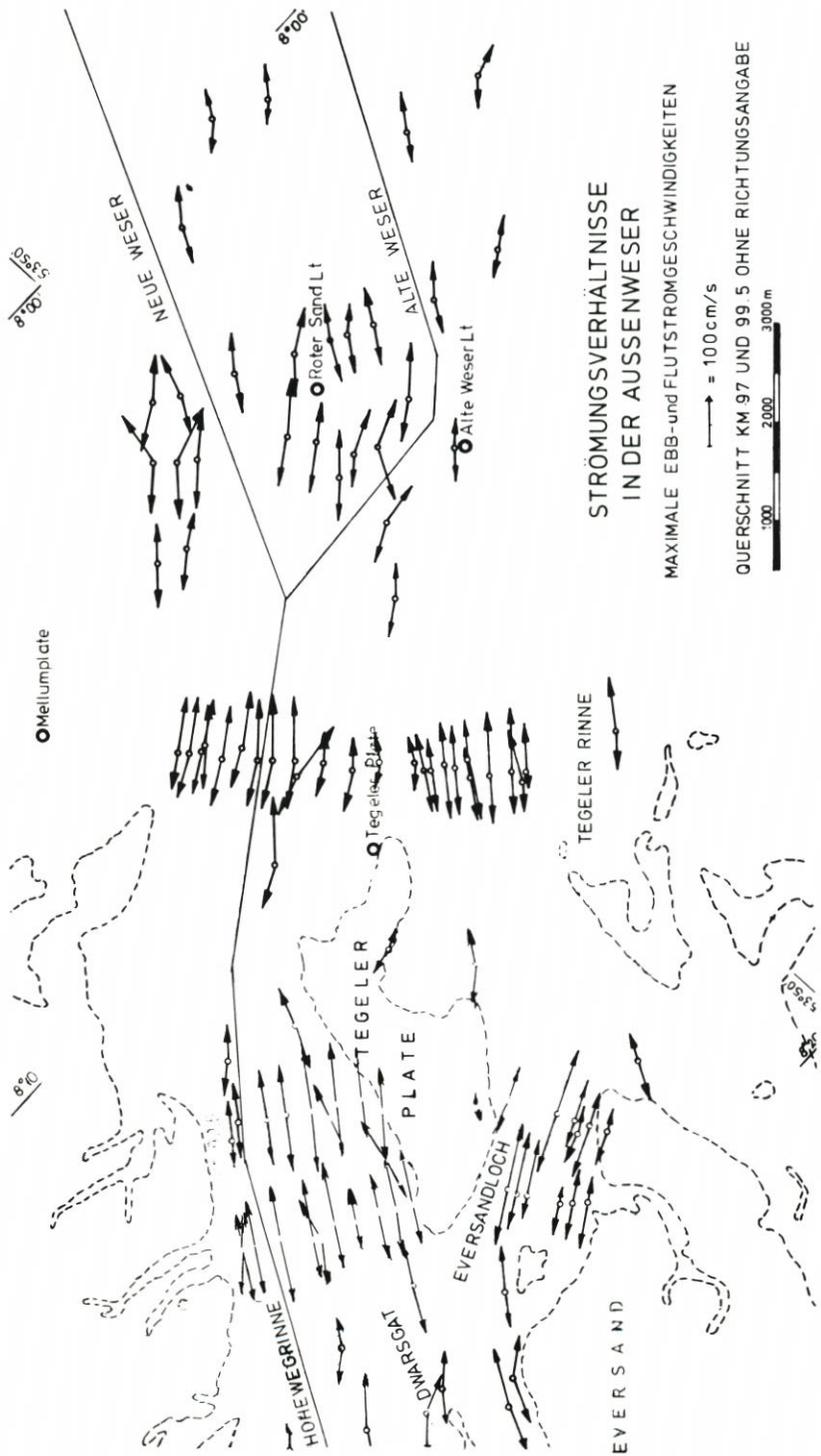


Abb. A 20: Strömungsvektoren

Die Darstellung der Linien gleicher maximaler (oder mittlerer) Strömungsgeschwindigkeiten bei Flut- und Ebbstrom (Isotachen) gibt ein charakteristisches Bild der Verhältnisse und läßt auf Erosions- und Sedimentationsbereiche und damit Querschnittsveränderungen schließen (Abb. A 19). Über den zeitlichen Verlauf der Strömungsintensitäten gibt Abb. A 20 Aufschluß. Hier kann aus der Dauer verschiedener Strömungsgeschwindigkeiten ebenfalls auf Bereiche und Intensität von Erosion oder Sedimentation geschlossen werden. Dazu kommen Darstellungen der Verteilung maximaler und mittlerer Geschwindigkeiten und -richtungen sowie der Kenterpunktsunterschiede.

Die weitere Auswertung der Strömungsmessungen und die Betrachtung der Querschnittsänderungen führt schließlich auch zur Ermittlung der Wassermengen im Gesamtquerschnitt und in den Teilquerschnitten. Hier muß der Vergleich mit älteren Messungen eine Aussage über Tendenzen geben. Schließlich gibt Abb. A 21 ein Beispiel der Darstellung zusammengefaßter Ergebnisse eines großräumigen Meßprogrammes.

### 3.6 Meßergebnisse

Messungen im Querschnitt km 99,5 wurden 1973 und 1977 ausgeführt. Die Strömungsverteilungen und -intensitäten im Querschnitt haben sich in diesem Zeitraum erheblich geändert. Ebb- und Flutströmungen in der Hohewegrinne liegen nicht mehr konzentriert im Fahrwasser, sondern haben sich mit auf die Seitenräume verteilt, so daß die Selbstströmung, besonders bei Ebbstrom, schwächer geworden ist. Wenngleich eine allgemeine Erhöhung der

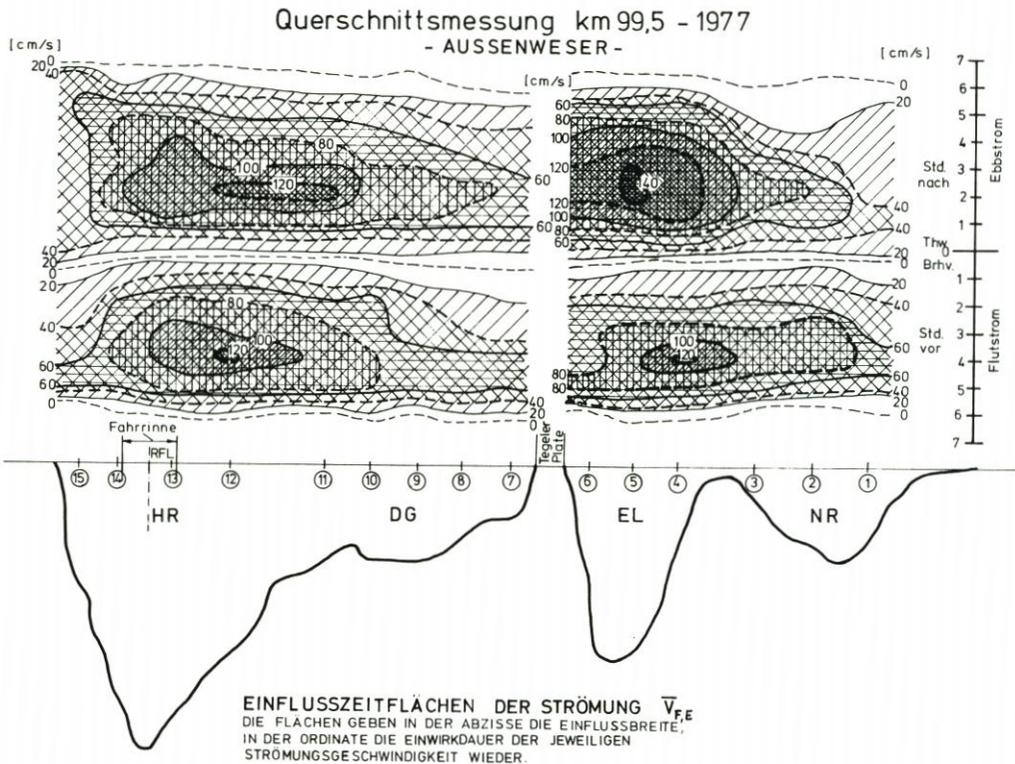


Abb. A 21: Einflußbreite und Wirkdauer der Strömungsgeschwindigkeiten

Geschwindigkeiten festzustellen ist, so zeigen doch die folgenden Zahlen, daß die Verteilung auf eine weitere Zunahme der Bedeutung des Eversandlochs hinweist.

**Mittlere Durchflußgeschwindigkeiten**  
Vergleich 1973-1977

	Flutstrom	Ebbstrom
östliche Nebenrinne	+ 28 %	+ 22 %
Eversandloch	+ 13 %	+ 20 %
Dwarsgatt + Hohewegrinne	-	+ 8 %

Maximale Strömungsgeschwindigkeiten (Isotachendarstellung) erreichen jetzt im Eversandloch (frühere Werte in Klammern)

$$V_{fmx} = 120 \text{ cm/s (80 cm/s)}$$

$$V_{emax} = 100 \text{ cm/s (80 cm/s)}$$

während in der Hohewegrinne eine Abnahme festzustellen ist

$$V_{fmx} = 100 \text{ cm/s (160 cm/s)}$$

$$V_{emx} = 120 \text{ cm/s (180 cm/s)}$$

Der Vergleich der Querschnittsmessungen zeigt, daß die Nebenrinnenentwicklung (Eversandloch) weiter zunimmt und sich früher und später nachteilig auf die Fahrwasserverhältnisse in der Hohewegrinne auswirken wird. Diese Gefahr wurde bereits sehr frühzeitig erkannt (PLATE, 1935) und bleibt weiterhin bedeutsam (HOVERS, 1973; BARTHEL, 1979).

Wenn diese Entwicklung weiter fortschreitet, hat das Eversandloch im Jahre 2040 die gleiche Größe wie die Hohewegrinne, die entsprechend geschrumpft sein wird. Strombauvorhaben zur Dämpfung bzw. Absperrung dieser Nebenrinne scheiterten bereits um 1920. Daher ist hier auf die Bedeutung kontinuierlicher Beobachtungen und Messungen in problematischen Querschnitten hinzuweisen, damit rechtzeitig eine Anpassung an die morphologisch/hydrologischen Verhältnisse dort erfolgen kann, wo wirtschaftliche und technische Überlegungen künstliche Abhilfen (z. B. strombaulicher Art) ausschließen.

#### 4. Tabellarische Zusammenstellung ausgewählter Seegangmeßgeräte

In den Tabellen A 14 bis A 28 sind – ähnlich wie bei den Strömungsmessgeräten – einige Seegangmeßgeräte mit ihren wesentlichen technischen Daten und Merkmalen dargestellt. Auch hier kann nur eine Auswahl gegeben werden, da ein Gesamtüberblick kaum zu erhalten war. Es wurde Wert darauf gelegt, auch hier vor allem solche Geräte zu erfassen, mit welchen bereits im deutschen Küstengebiet Erfahrungen gewonnen werden konnten.

#### 5. Seegangmeßprogramme im Bereich der deutschen Nord- und Ostseeküste

Es wird ein kurzer Überblick bereits abgeschlossener bzw. laufender Seegangmeßprogramme im Bereich der deutschen Nord- und Ostseeküste gegeben. Die einzelnen Untersuchungsgebiete sind in Abb. A 22 mit einer durchlaufenden Numerierung von 5.1 bis 5.8 eingetragen.

<b>Gerätehersteller</b> (Name und Sitz der Firma)	Datawell b v, laboratory for instrumentation Zomerluststraat 4 Haarlem The Netherlands
<b>Gerätedaten</b>	WAVERIDER
<b>Gemessene Parameter</b>	Vertikale Beschleunigung bis 6 m/sec Einfluß der horizontalen Beschleunigung ca. 3 %
<b>Meßbereich</b>	2 × 20 m
<b>Genauigkeit</b>	1,5 % für Wellenperioden von 0,3 s bis 10 s 10 % für Wellenperioden von 0,2 s bis 20 s
<b>Auflösung</b>	ca. $2 \times 10^{-3}$ m/sec <sup>2</sup> = ca. 0,05 m
<b>Ansprechempfindlichkeit</b>	ca. $2 \times 10^{-3}$ m/sec <sup>2</sup>
<b>Abmessungen des Sensors (Meßwertaufnehmer)</b>	A) Kugelschalendurchmesser: 0,7 m; Höhe: 1,1 m B) Kugelschalendurchmesser: 0,9 m; Höhe: 1,3 m
<b>Meßverfahren (Prinzip)</b>	Messung der vertikalen Beschleunigung zweimalige Integration zur Bestimmung der Wellenhöhe Übertragung dieser Werte zur Landstation per Funk
<b>Fehlermöglichkeit</b>	Starke horizontale Beschleunigungen, starke Rollbewegung, vorge-spannte Verankerung durch Strömung
<b>Langzeitdrift</b>	Empfindlichkeit: 4 %, Nullpunkt: 1,5 m
<b>Einsatzdauer des Sensors</b>	Batterielebensdauer: A) 9 Monate, B) 16 Monate
<b>Energieversorgung/Bedarf</b>	A) Batterie: 26 No. 6 – Zellen B) Batterie: 52 No. 6 – Zellen
<b>Eichmöglichkeit</b>	Beim Hersteller, Überwachung der Funkverbindung Testmöglichkeiten der Empfangsstation
<b>Wartung/Service</b>	Kontrolle des Waveriders auf Bewuchs Kontrolle der Verankerung auf Abnutzung
<b>Geräteabmessungen</b>	19''-Gehäuse – 6 Höheneinheiten
<b>Gerätengewicht (Luft/Wasser)</b>	A) 100 kg m. Stabilisierungsrahmen 142 kg/Auftr. 900 bzw. 480 N B) 160 kg m. Stabilisierungsrahmen 205 kg/Auftr. 2350 bzw. 1900 N
<b>Art der Verankerung/Auslegung</b>	elastisches Verankerungssystem aus Stahl- und Gummiseilen
<b>Meßwertregistrierung</b>	Analog auf Schreiber oder auf Magnetband
<b>Meßdatenauswertung</b>	Manuell oder durch Rechner
<b>Empfohlener Anwendungsbereich</b>	Im Watt, und auf hoher See bei Wassertiefen größer 8 m, Reichweite der Funkübertragung bei Wellenhöhen bis 10 m ca. 50 km, bei größeren Wellenhöhen ca. 30 km. – Gefährdung durch Schifffahrt, Eis, Treibgut, Diebstahl. Bei Einsätzen über 2 Monate sehr hohe Verlust-rate
<b>Referenzen, Literaturhinweise, Erfahrungen, Bemerkungen</b>	DHI, Rijkswaterstaat – Holland, Franzius-Institut – Hannover, Leichtweiß-Institut – Braunschweig, WSA Bremerhaven, WSA Wilhelmshaven, SFB 79 – Hannover

Tab.: A14

Gerätehersteller  
(Name und Sitz der Firma)

Dr. Fahrentholz, Echolote und Elektronik  
Grasweg 4-6, 2300 Kiel 1, BRD

<b>Gerätedaten</b>	Wellenschreiber W 2001/5 C bzw. W 6301/5C W 2001/5 D W 6301/5D
<b>Gemessene Parameter</b>	Abstand der Wasseroberfläche vom Meeresboden
<b>Meßbereich</b>	Maßstab 1: 100: 0-120 m bzw. 0-180 m Maßstab 1: 50: 0- 60 m 0- 90 m o. 3 Meßstellen gleichzeitig
<b>Genauigkeit</b>	± 0,5 %
<b>Auflösung</b>	Maßstab 1:100: 0,05 m Maßstab 1: 50: 0,025 m
<b>Ansprechempfindlichkeit</b>	----- Sensorgehäuse aus Edelstahl DIN 1.4571
<b>Abmessungen des Sensors (Meßwertaufnehmer)</b>	Seestation C: ca. 204 Ø × 750 mm ohne Befestigungen Seestation D: ca. 700 Ø × 700 mm ohne Befestigungen, Bojenform
<b>Meßverfahren (Prinzip)</b>	Echolotung vom Meeresboden zur Wasseroberfläche, Datenübertragung von der Seestation zur Landstation per Seekabel, Ultraschallfrequenz: 100 kHz, kann bei problematischen Reflektionsverhältnissen anders gewählt werden
<b>Fehlermöglichkeit</b>	Störechos durch Reflektoren im Wasser wie Treibgut, Sand, Luftblasen
<b>Langzeitdrift</b>	keine, Schallgeschwindigkeit abhängig von Temperatur und Salzgehalt des Wassers
<b>Einsatzdauer des Sensors</b>	10 Jahre
<b>Energieversorgung/Bedarf</b>	Seestation über Meßkabel Landstation aus 220-V-Netz mit Notstrombetrieb aus Pufferbatterie
<b>Eichmöglichkeit</b>	Kontrollmessung der Wassersäule mit einem Schiff und Einstellung des Registriermaßstabes des Schreibgerätes
<b>Wartung/Service</b>	Seestation: Kontrolle auf Bewuchs bei mehrjährigen Einsätzen Landstation: übl. Wartungsarb. an Batter., Schreibern u. Elektr.
<b>Geräteabmessungen</b>	Landstation: 800 bzw. 1200 × 800 × 250 mm, Gewicht ca. 100 bzw. 150 kg Grundgestell: sechseckig 2550 Ø × 1000 mm, Gewicht 620 kg
<b>Gerätengewicht (Luft/Wasser)</b>	Seestation C: 30/6 kg Grundgestell: 620/550 kg Seestation D: ca. 90 kg/ca. 900 N Auftrieb Seekabel: ca. 1,3/1,1 kg pro m
<b>Art der Verankerung/Auslegung</b>	Seestation C: Absetzen auf dem Meeresboden Seestation D: selbstschwimmend, daher Verankerung m. 500-kg-Gewicht
<b>Meßwertregistrierung</b>	1) auf 200 bzw. 630 mm breitem Registrierpapier, Papiertransport: 120 mm/min. 2) EDV-Ausgänge, 16 bit digital oder analog 3) Datenspeicherung auf 3M-Cartridge-Magnetbandkassetten, ASCII-Code
<b>Meßdatenauswertung</b>	1) manuell bzw. Übertragung auf Datenträger mit Pencilfollower 2) + 3) automatisch im Rechenzentrum
<b>Empfohlener Anwendungsbereich</b>	vor der Küste oder festen Bauwerken (Leuchttürmen, Plattformen, Hubinseln, verankerten Schiffen etc.) mit Kabellängen bis 20 km Seestation D: Wasserdruck bis 10 bar Gefährdung durch Schleppnetzfischerei
<b>Referenzen, Literaturhinweise, Erfahrungen, Bemerkungen</b>	BMFT - Bonn, Franzius-Institut - Hannover, Leichtweiß-Institut - Braunschweig, WSD Nord - Kiel, WSA Lübeck, WSA Tönning, Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten - Kiel, ALW Husum, ALW Kiel, ALW Lübeck, Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz - Norderney, Bauamt für Küstenschutz - Norden. LUCK, G. und NIE-MEYER, H. D.: Das Seegangsmessprogramm Ostfriesische Inseln und Küste. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 21. Jahrgang, Heft 6, 1977 FAHRENTHOLZ, S. R.: Wellen- und Wasserstandsmessungen in freier See mit Hilfe des akustischen Echolotverfahrens, Interoccean '73, Vortrag IO 73-657, Kongreß-Berichtswerk, Band 2, 1973

<b>Gerätehersteller</b> (Name und Sitz der Firma)	Dr. Fahrentholz, Echolote und Elektronik Grasweg 4-6 2300 Kiel 1 BRD
<b>Gerätedaten</b>	Wellenschreiber Type 161
<b>Gemessene Parameter</b>	Abstand der Wasseroberfläche von einem festen Punkt über dem Wasserspiegel
<b>Meßbereich</b>	0-25 m
<b>Genauigkeit</b>	± 1 %
<b>Auflösung</b>	0,05 m
<b>Ansprechempfindlichkeit</b>	-----
<b>Abmessungen des Sensors (Meßwertaufnehmer)</b>	290 Ø × 90 mm ohne Befestigungen
<b>Meßverfahren (Prinzip)</b>	Echolotung von einem Punkt über der Wasseroberfläche nach unten zur Wasseroberfläche Datenübertragung zur Landstation über Kabel
<b>Fehlermöglichkeit</b>	Schwankungen des Haltegerüsts
<b>Langzeitdrift</b>	keine, Schallgeschwindigkeitsänderungen in der Luft
<b>Einsatzdauer des Sensors</b>	5 Jahre und länger
<b>Energieversorgung/Bedarf</b>	Luftschall-Sende-Empfangs-System über Kabel Landstation aus 220-V-Netz mit Notstrombetrieb aus Pufferbatterie
<b>Eichmöglichkeit</b>	Nivellement der Höhe des Sensors und anschließender Kalibrierung der Landstation
<b>Wartung/Service</b>	übliche Wartungsarbeiten an Batterien, Schreibern, Elektronik
<b>Geräteabmessungen</b>	Landstation: 800 × 800 × 250 mm, Gewicht ca. 100 kg
<b>Gerätegewicht (Luft/Wasser)</b>	Luftschallsystem: 6 kg ohne Haltegerüst
<b>Art der Verankerung/Auslegung</b>	Befestigung an Bauwerken
<b>Meßwertregistrierung</b>	1) auf 200 mm breitem Registrierpapier, Papiertransp.: 120 mm/min 2) EDV-Ausgänge, 16 bit digital oder analog 3) Datenspeicherung auf 3M-Cartridge-Magnetbandkassetten ASCII-Code
<b>Meßdatenauswertung</b>	1) manuell bzw. Übertragung auf Datenträger mit Pencilfollower 2) + 3) automatisch im Rechenzentrum
<b>Empfohlener Anwendungsbereich</b>	vor der Küste, in der Brandungszone auf Stränden, an Bauwerken (Leuchttürmen, Plattformen, Hubinseln, Schiffen etc.) mit Kabellängen bis 20 km
<b>Referenzen, Literaturhinweise, Erfahrungen Bemerkungen</b>	Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten – Kiel, ALW Heide/Gewässerkunde – Büsum, ALW Kiel, ALW Lübeck, Bauamt für Küstenschutz – Norden, Leichtweiß-Institut – Braunschweig

Gerätehersteller  
(Name und Sitz der Firma)

Dr. Fahrentholz, Echolote und Elektronik  
Grasweg 4-6  
2300 Kiel 1  
BRD

<b>Gerätedaten</b>	Wellenaufschreiber Type 162
<b>Gemessene Parameter</b>	Überflutung durch Wasserdruck
<b>Meßbereich</b>	bis 10 m Wassersäule
<b>Genauigkeit</b>	0,05 m Wassersäule
<b>Auflösung</b>	0,1 m Wassersäule
<b>Ansprechempfindlichkeit</b>	0,03 m Wassersäule
<b>Abmessungen des Sensors (Meßwertaufnehmer)</b>	Länge der Meßstrecke: bis 100 m Breite: 150/200 mm; Höhe: 50/65 mm
<b>Meßverfahren (Prinzip)</b>	Bei Überflutung gelangt Wasser in ein Meßrohr, wo der Wasserdruck in Luftdruck umgewandelt und an den Drucksensor weitergeleitet wird, der auf der Deichkrone steht. Die Sensoren steuern Relaiskontakte
<b>Fehlermöglichkeit</b>	Verkleben des Meßrohres durch Treibgut, Sand
<b>Langzeitdrift</b>	--- Sensor-system aus Edelstahl DIN 1.4571
<b>Einsatzdauer des Sensors</b>	5 Jahre und länger
<b>Energieversorgung/Bedarf</b>	Sensorsystem über Kabel – Landstation aus 220-V-Netz mit Notstromversorgung aus Pufferbatterie
<b>Eichmöglichkeit</b>	Überflutung wird an genau eingemessenen Punkten angezeigt
<b>Wartung/Service</b>	Sensorsystem: Reinigung und Überprüfung 1mal jährlich Landstation: übliche Wartungsarbeiten an Schreibern, Batterien, Elektronik
<b>Geräteabmessungen</b>	Landstation: 800 × 800 × 250 mm, Gewicht ca. 100 kg
<b>Gerätegewicht (Luft)</b>	Profil 1: ca. 3,5 kg/m; Profil 2: ca. 4,5 kg/m
<b>Art der Verankerung/Auslegung</b>	Befestigung an Spurbahnplatten auf Deichen und anderen Bauwerken
<b>Meßwertregistrierung</b>	1) auf 200 mm breitem Registrierpapier, Papiertransp.: 120 mm/min 2) EDV-Ausgänge, 16 bit digital oder analog 3) Datenspeicher. auf 3M-Cartridge-Magnetbandkass., ASCII-Code
<b>Meßdatenauswertung</b>	1) manuell bzw. Übertragung auf Datenträger mit Pencilfollower 2) + 3) automatisch im Rechenzentrum
<b>Empfohlener Anwendungsbereich</b>	An Küstenschutzbauwerken und Inseln zur Registrierung des Wellenaufbaus mit Kabellängen bis 10 km. Gefährdung: teeriges Treibgut
<b>Referenzen, Literaturhinweise, Erfahrungen, Bemerkungen</b>	ALW Heide / Gewässerkunde – Büsum, Bauamt für Küstenschutz – Norden, Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz – Norderney, LUCK, G. und NIEMEYER, H. D.: Das Seegangsmessprogramm Ostfriesische Inseln und Küste. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 21. Jahrgang, Heft 6, 1977

<b>Gerätehersteller</b> (Name und Sitz der Firma)	Dr. Fahrentholz, Echolote und Elektronik Grasweg 4-6 2300 Kiel 1 BRD	
<b>Gerätedaten</b>	Drucksensor Type 4025	
<b>Gemessene Parameter</b>	Wasserdruck	
<b>Meßbereich</b>	1-6 bar	
<b>Genauigkeit</b>	± 0,25 %	
<b>Auflösung</b>	abhängig von der Auswerteelektronik	
<b>Ansprechempfindlichkeit</b>	Sensor: 100 mV/bar	
<b>Abmessungen des Sensors (Meßwertaufnehmer)</b>	druckfestes Gehäuse aus Edelstahl DIN 1.4571 90 Ø (Flansch 140 Ø) × 140 mm	
<b>Meßverfahren (Prinzip)</b>	piezoresistiver Druckaufnehmer – Widerstandsbrücke – am Meeresboden in einem druckfesten Gehäuse an einem Grundgestell befestigt. Datenübertragung zur Landstation per Seekabel	
<b>Fehlermöglichkeit</b>	Ablagerungen, Bewuchs	Druckschwankungen infolge der Wellenbewegung werden mit zunehmender Wassertiefe gedämpft!
<b>Langzeitdrift</b>	± 0,02 m Wassersäule	
<b>Einsatzdauer des Sensors</b>	ca. 5 Jahre	
<b>Energieversorgung/Bedarf</b>	Seestation über Meßkabel – Landstation aus 220-V-Netz mit Notstrombetrieb aus Pufferbatterie	
<b>Eichmöglichkeit</b>	vorhanden	
<b>Wartung/Service</b>	Seestation:	Kontrolle auf Bewuchs bei mehrjährigen Einsätzen
	Landstation:	übl. Service an Batterien, Schreibern, Elektronik
<b>Geräteabmessungen</b>	Landstation:	19"-Gehäuse
	Seestation:	sechseckiges Grundgestell 2550 Ø × 1000 mm, Gewicht 620 kg
<b>Gerätegewicht (Luft/Wasser)</b>	Sensor:	ca. 10/8 kg
	Grundgestell:	620/550 kg
<b>Art der Verankerung/Auslegung</b>	Absetzen auf dem Meeresboden	
<b>Meßwertregistrierung</b>	1) auf Analog-Schreibgeräten 2) EDV-Ausgänge, analog oder 8 bit digital 3) Datenspeicherung auf Magnetbändern oder Magnetbandkassetten	
<b>Meßdatenauswertung</b>	1) manuell bzw. Übertragung auf Datenträger mit Pencilfollower 2) + 3) automatisch im Rechenzentrum	
<b>Empfohlener Anwendungsbereich</b>	vor der Küste, vor oder an festen Bauwerken (Leuchttürmen, Plattformen, Hubinseln, Schiffen etc.) mit Kabellängen bis 20 km, Wasserdruck max. bis 12 bar	
	Gefährdung durch Schleppnetzfisherei	
<b>Referenzen, Literaturhinweise, Erfahrungen, Bemerkungen</b>	BMFT – Bonn, Leichtweiß-Institut – Braunschweig, Forschungsstelle für Insel- u. Küstenschutz – Norderney	

Gerätehersteller  
(Name und Sitz der Firma)

Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz  
An der Mühle 5  
2982 Norderney

<b>Gerätedaten</b>	WES - 63
<b>Gemessene Parameter</b>	Wellenhöhe und -periode etc.
<b>Meßbereich</b>	prinzipiell unbegrenzt
<b>Genauigkeit</b>	Höhe $\leq 5\%$ ; Zeit $\leq 1\%$
<b>Auflösung</b>	-.-.-.-.-
<b>Ansprechempfindlichkeit</b>	-.-.-.-.-
<b>Abmessungen des Sensors (Meßwertaufnehmer)</b>	Schwimmerdurchmesser: 170 mm; Schwimmerhöhe: 320 mm
<b>Meßverfahren (Prinzip)</b>	Auftriebskörper
<b>Fehlermöglichkeit</b>	Bewuchs
<b>Langzeitdrift</b>	-.-.-.-.-
<b>Einsatzdauer des Gerätes</b>	Einsatzzeit ca. 4 Monate, Meßdauer: 16 Std.
<b>Energieversorgung/Bedarf</b>	Akkus
<b>Eichmöglichkeit</b>	durch Filmregistrierung von Welle und Schwimmer an Eichlatte (vergl. DRESKE, 1964)
<b>Wartung/Service</b>	Akkuwechsel: 2 pro Jahr
<b>Geräteabmessungen</b>	Registriergerät: Höhe: 330 mm, Breite: 580 mm, Tiefe: 500 mm
<b>Gerätgewicht (Luft/Wasser)</b>	ca. 30 kg
<b>Art der Verankerung/Auslegung</b>	Tragpfahl
<b>Meßwertregistrierung</b>	Analogschrieb, Zahlendrucker, Zählwerk
<b>Meßdatenauswertung</b>	Digitalisierung und EDV-Auswertung
<b>Empfohlener Anwendungsbereich</b>	Flachwasserbereich, insbesondere schwer zugängliche Wattgebiete. Gefährdung durch Schifffahrt, Eis, Treibgut
<b>Referenzen, Literaturhinweise, Erfahrungen, Bemerkungen</b>	Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz – Norderney, Franzius-Institut – Hannover. DRESKE, G.: Der Wellenschreiber WES - 63 der Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz Norderney. Jahresbericht 1963, Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz – Norderney, Band 15, 1964

Gerätehersteller (Name und Sitz der Firma)	Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH Im Tiefen See 45 6100 Darmstadt 1 BRD
<b>Gerätedaten</b>	Überdruckaufnehmer P 11
<b>Gemessene Parameter</b>	Wasserdruck
<b>Meßbereich</b>	0 bis 0,1 bar, bis 0 bis 200 bar
<b>Genauigkeit</b>	± 0,5 % vom Endwert
<b>Auflösung</b>	ca. 1 % vom Endwert (abhängig vom angeschlossenen Meßverstärker)
<b>Ansprechempfindlichkeit</b>	abhängig vom Meßverstärker
<b>Abmessungen des Sensors (Meßwertaufnehmer)</b>	29 Ø × 70 mm bzw. 34 Ø × 76 mm muß in ein wasserdichtes Gehäuse eingebaut werden
<b>Meßverfahren (Prinzip)</b>	induktiver Wegaufnehmer für Betrieb mit 5 kHz Trägerfrequenz
<b>Fehlermöglichkeit</b>	Ablagerungen, Bewuchs. Die Druckschwankungen infolge der Wellenbewegung werden mit zunehmender Wassertiefe gedämpft!
<b>Langzeitdrift</b>	unbekannt
<b>Einsatzdauer des Sensors</b>	unbekannt
<b>Energieversorgung/Bedarf</b>	2 bis 6 V/5 kHz Trägerfrequenz durch Meßverstärker
<b>Eichmöglichkeit</b>	Druckprüfung
<b>Wartung/Service</b>	Kontrolle auf Bewuchs
<b>Geräteabmessungen</b>	-.-.-.-.-
<b>Gerätegewicht (Luft/Wasser)</b>	-.-.-.-.-
<b>Art der Verankerung/Auslegung</b>	abhängig vom Geräteträger
<b>Meßwertregistrierung</b>	abhängig vom verwendeten Meßverstärker analog auf Schreiber oder Magnetband digital auf Magnetband bzw. im Rechner
<b>Meßdatenauswertung</b>	manuell oder durch Rechner
<b>Empfohlener Anwendungsbereich</b>	küstennah oder an festen Bauwerken mit Kabellängen bis 500 m, Kabelanschluß muß druckwasserdicht am Sensorgehäuse sein, Gefährdung durch Schleppnetzfischerei
<b>Referenzen, Literatur- hinweise, Erfahrungen, Bemerkungen</b>	Franzius-Institut – Hannover, Leichtweiß-Institut – Braunschweig, Sonderforschungsbereich 79 der Universität Hannover

Gerätehersteller  
(Name und Sitz der Firma)

Hydrowerkstätten GmbH  
Uhlenkrog 38  
2300 Kiel-Hassee  
BRD

Gerätedaten	Wellenpegel No 361
<b>Gemessene Parameter</b>	Wellenhöhe
<b>Meßbereich</b>	0–10 m
<b>Genauigkeit</b>	± 5 cm
<b>Auflösung</b>	10 cm
<b>Ansprechempfindlichkeit</b>	ab 10 cm Wellenhöhe
<b>Abmessungen des Sensors (Meßwertaufnehmer)</b>	Schwimmer: Durchmesser 110 mm Höhe 300 mm
<b>Meßverfahren (Prinzip)</b>	Schwimmer-Prinzip mit Aufzeichnung der Wellendarstellung auf Wachspapier-Schreiber 200 mm. Papiertransport erfolgt durch Wellenbewegung. Die Aufzeichnung erfolgt in jeweils 10 Blöcken mit je 300 m addierter Wellenhöhe und danach in einem Schnellschrieb für 2 min über 60 mm Papierlänge. Die zugehörige Zeit wird laufend am Papierrand aufgedruckt
<b>Fehlermöglichkeit</b>	Reißen des Schwimmerseiles Zuwachsen des perforierten Schwimmerrohres
<b>Langzeitdrift</b>	-----
<b>Einsatzdauer des Gerätes</b>	1–3 Monate, je nach Wellengang, da Papiertransport von Wellenbewegung angetrieben wird
<b>Energieversorgung/Bedarf</b>	9-V-Blockbatterie für Uhr mit druckender Zeitscheibe 9-V-Blockbatterie für intermittierenden Schnellschrieb über 2 min
<b>Eichmöglichkeit</b>	kaum nötig, da Zwangsübertragung
<b>Wartung/Service</b>	Kontrolle von Schwimmerseil, Meßrad, Schwimmer etc. Freihalten des Schwimmerrohres von Bewuchs. Service für Getriebe, Streifenführung, Filmkamera
<b>Geräteabmessungen</b>	Registriergerät: Länge = 520 mm, Breite = 510 mm, Höhe = 260 mm
<b>Gerätegewicht (Luft/Wasser)</b>	Registriergerät = 40 kg
<b>Art der Verankerung/Auslegung</b>	perforiertes Schwimmerrohr aus Polyester mit Glasfasern an einem eingespülten Standrohr durch Schellenbefestigung
<b>Meßwertregistrierung</b>	auf 200 mm breitem Wachspapier über Schreiber
<b>Meßdatenauswertung</b>	manuell oder mit elektronischen Hilfsmitteln, wie sie zur Abtastung von Kurvenverläufen mit anschließender Aufbereitung für Weiterverarbeitung im Rechner gebräuchlich sind
<b>Empfohlener Anwendungsbereich</b>	in Küstennähe Gefährdung durch Schifffahrt, Eis, Treibgut
<b>Referenzen, Literatur- hinweise, Erfahrungen, Bemerkungen</b>	DHI – Hamburg, WSA Bremerhaven, Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk – Cuxhaven. SCHRADER, J. P.: Kennzeichnende Seegangsgößen für drei Meßpunkte in der Elbmündung. Hamburger Küstenforschung, Heft 4, 1968. SIEFERT, W.: Die Seegangsverhältnisse im Elbmündungsgebiet, Hamburger Küstenforschung, Heft 18, 1971. WEHMELSFELDER, P. J.: De Integrator als Golfmeetapparatur, De Ingenieur 66, Nr. 19, 1954

<b>Gerätehersteller</b> (Name und Sitz der Firma)	Hydrowerkstätten GmbH Uhlenkrog 38 2300 Kiel-Hassee BRD
<b>Gerätedaten</b>	Wellenpegel No 385
<b>Gemessene Parameter</b>	Wellenhöhe
<b>Meßbereich</b>	0-10 m
<b>Genauigkeit</b>	± 5 cm
<b>Auflösung</b>	10 cm
<b>Ansprechempfindlichkeit</b>	ab 10 cm Wellenhöhe
<b>Abmessungen des Sensors (Meßwertaufnehmer)</b>	Schwimmer: Durchmesser 110 mm Höhe 300 mm
<b>Meßverfahren (Prinzip)</b>	Es werden die fortlaufenden Zählerstände für addierte Wellenhöhe, für Anzahl der Wellen und für die Zeit im Intervall von 1 h oder ½ h von einer Super-8-Kamera in Einzelbildern auf Film dargestellt
<b>Fehlermöglichkeit</b>	Reißen des Schwimmerseiles Zuwachsen des perforierten Schwimmerrohres
<b>Langzeitdrift</b>	-----
<b>Einsatzdauer des Gerätes</b>	max. 3 Monate (je nach Zeitintervall)
<b>Energieversorgung/Bedarf</b>	1,5-V-Monozelle für Schaltuhr; 6-V-Akku, 7,5 Ah – dryfit PC von Sonnenschein – Batteriesatz zur Speisung einer Super-8-Filmkamera
<b>Eichmöglichkeit</b>	kaum nötig, da Zwangsübertragung
<b>Wartung/Service</b>	Kontrolle von Schwimmerseil, Meßrad, Schwimmer etc. Freihalten des Schwimmerrohres von Bewuchs. Üblicher Service für Getriebe, Streifenführung, Filmkamera
<b>Geräteabmessungen</b>	Registriergerät: Länge = 500 mm, Breite = 300 mm, Höhe = 180 mm
<b>Gerätgewicht (Luft/Wasser)</b>	Registriergerät = 30 kg
<b>Art der Verankerung/Auslegung</b>	perforiertes Schwimmerrohr aus Polyester mit Glasfasern an einem eingespülten Standrohr durch Schellenbefestigung
<b>Meßwertregistrierung</b>	auf Super-8-Film durch Kamera in Einzelbildschaltung
<b>Meßdatenauswertung</b>	Auswertung des Films durch Auslesung der Bilder in Einzelbild – Projektion
<b>Empfohlener Anwendungsbereich</b>	in Küstennähe – Gefährdung durch Schifffahrt, Eis Treibgut
<b>Referenzen, Literatur- hinweise, Erfahrungen, Bemerkungen</b>	Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk – Cuxhaven, Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz – Norderney, GÖHREN, H.: Entwicklung eines integrierenden Wellenmeßgerätes. Hamburger Küstenforschung, Heft 13, 1970

Gerätehersteller  
(Name und Sitz der Firma)

Hydrowerkstätten GmbH  
Uhlenkrog 38  
2300 Kiel-Hassee  
BRD

Gerätedaten	Wellenpegel No 433
<b>Gemessene Parameter</b>	Wellenhöhe und Wellenperiode
<b>Meßbereich</b>	0–10 m
<b>Genauigkeit</b>	± 5 cm
<b>Auflösung</b>	10 cm
<b>Ansprechempfindlichkeit</b>	ab 10 cm Wellenhöhe
<b>Abmessungen des Sensors (Meßwertaufnehmer)</b>	Schwimmer: Durchmesser 110 mm Höhe 300 mm
<b>Meßverfahren (Prinzip)</b>	Ein Drehfeldgeber in einem Gehäuse mit Schwimerrad auf einem Schwimmerrohr überträgt die Wellenbewegung bis zu 500 m Entfernung an Land auf einen Drehfeldempfänger mit gekoppelter Schreibnadel für Wachspapier-Schreiber 200 mm
<b>Fehlermöglichkeit</b>	Reißen des Schwimmerseiles Zuwachsen des perforierten Schwimmerrohres
<b>Langzeitdrift</b>	-----
<b>Einsatzdauer des Gerätes</b>	Abhängig vom Papierverbrauch durch Wahl des Arbeitsaktes, z. B. 5 min Aufzeichnung, 25 min Pause bei Papiertransport 60 mm/min ergeben ca. 50 h
<b>Energieversorgung/Bedarf</b>	220 V, 50 Hz, 100 VA, wobei im Kabel zwischen Geber und Empfänger nur 24 V, 50 Hz aus Sicherheitsgründen fließen
<b>Eichmöglichkeit</b>	kaum nötig, da „Zwangsübertragung“ durch elektrische Koppelung
<b>Wartung/Service</b>	Kontrolle von Schwimmerseil, Meßrad, Schwimmer etc. Freihalten des Schwimmerrohres von Bewuchs. Service für Getriebe, Streifenführung, Filmkamera
<b>Geräteabmessungen</b>	Geber: Länge: 300 mm, Breite: 180 mm, Höhe: 240 mm Registriergerät: Länge: 530 mm, Breite: 370 mm, Höhe: 200 mm
<b>Gerätengewicht (Luft/Wasser)</b>	Geber: 7 kg Registriergerät: 17 kg
<b>Art der Verankerung/Auslegung</b>	perforiertes Schwimmerrohr aus Polyester mit Glasfasern an einem eingespülten Standrohr durch Schellenbefestigung
<b>Meßwertregistrierung</b>	mit Fernregistrierung auf einem Schreiber mit 200 mm breitem Wachspapier im Maßstab 1:100, 1:50, 1:25. Dauerbetrieb oder intermittierend z. B.: 5 min Aufzeichnung und 25 min Pause.
<b>Meßdatenauswertung</b>	manuell oder mit elektronischen Hilfsmitteln, wie sie zur Abtastung von Kurvenverläufen mit anschließender Aufbereitung für Weiterverarbeitung im Rechner gebräuchlich sind
<b>Empfohlener Anwendungsbereich</b>	in Küstennähe – Gefährdung durch Schifffahrt, Eis, Treibgut
<b>Referenzen, Literaturhinweise, Erfahrungen, Bemerkungen</b>	Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz – Norderney, LUCK, G. und NIEMEYER, H. D.: Das Seegangmeßprogramm Ostfriesische Inseln und Küste. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 21. Jahrgang, Heft 6, 1977

<b>Gerätehersteller</b> (Name und Sitz der Firma)	Hydrowerkstätten GmbH Uhlenkrog 38 2300 Kiel-Hassee BRD
<b>Gerätedaten</b>	Wellenpegel No 442
<b>Gemessene Parameter</b>	Wellenhöhe
<b>Meßbereich</b>	0-10 m
<b>Genauigkeit</b>	± 5 cm
<b>Auflösung</b>	10 cm
<b>Ansprechempfindlichkeit</b>	ab 10 cm Wellenhöhe
<b>Abmessungen des Sensors (Meßwertaufnehmer)</b>	Schwimmer: Durchmesser 100 mm Höhe 300 mm
<b>Meßverfahren (Prinzip)</b>	Schwimmer-Prinzip mit Aufzeichnung der Wellendarstellung auf Wachspapier-Schreiber 250 mm. Automatisch wechselnder Papiertransport von 3600 mm/h für 55 Minuten auf 7200 mm/h für 5 Minuten. Ein Getriebe erlaubt die manuelle Anpassung des Darstellungsmaßstabes von 1:50 oder 1:25
<b>Fehlermöglichkeit</b>	Reißen des Schwimmerseiles Zuwachsen des perforierten Schwimmerrohres
<b>Langzeitdrift</b>	-----
<b>Einsatzdauer des Gerätes</b>	ca. 20 Std. bei Dauerbetrieb
<b>Energieversorgung/Bedarf</b>	220 V, 50 Hz, 30 VA
<b>Eichmöglichkeit</b>	kaum nötig, da Zwangsübertragung
<b>Wartung/Service</b>	Kontrolle von Schwimmerseil, Meßrad, Schwimmer etc. Freihalten des Schwimmerrohres von Bewuchs. Service für Getriebe, Streifenführung, Filmkamera
<b>Geräteabmessungen</b>	Registriergerät: Länge = 600 mm, Breite = 400 mm, Höhe = 200 mm
<b>Gerätengewicht (Luft/Wasser)</b>	Registriergerät = 20 kg
<b>Art der Verankerung/Auslegung</b>	perforiertes Schwimmerrohr aus Polyester mit Glasfasern an einem eingespülten Standrohr durch Schellenbefestigung
<b>Meßwertregistrierung</b>	auf 250 mm breitem Wachspapier über Schreiber
<b>Meßdatenauswertung</b>	manuell oder mit elektronischen Hilfsmitteln, wie sie zur Abtastung von Kurvenverläufen mit anschließender Aufbereitung für Weiterverarbeitung im Rechner gebräuchlich sind
<b>Empfohlener Anwendungsbereich</b>	in Küstennähe - Gefährdung durch Schifffahrt, Eis, Treibgut
<b>Referenzen, Literatur- hinweise, Erfahrungen, Bemerkungen</b>	

Gerätehersteller  
(Name und Sitz der Firma)

George Kelk Limited  
48 Lesmill Road, Don Mills  
Ontario  
Canada M3B 2T5

<b>Gerätedaten</b>	Wave and Tide Gage, Model P 116
<b>Gemessene Parameter</b>	Wasserstand, Wellenhöhe
<b>Meßbereich</b>	0–3 m, auf 0–30 m durch mehrere Elemente erweiterbar
<b>Genauigkeit</b>	± 0,2 % des gesamten Meßbereiches
<b>Auflösung</b>	theoretisch unbegrenzt, abhängig von Auswerteelektronik
<b>Ansprechempfindlichkeit</b>	109,36 Mikrosekunden pro Meter
<b>Abmessungen des Sensors (Meßwertaufnehmer)</b>	Rohrdurchmesser 73 mm; Länge 3,43 m + n × 3 m
<b>Meßverfahren (Prinzip)</b>	Geschlitztes Aluminiumrohr mit koaxialem Innenleiter – Wellen im Rohr verstimmen einen elektronischen Oszillator am Kopf des Meßstabes
<b>Fehlermöglichkeit</b>	Korrosion, Bewuchs, Ölrückstände
<b>Langzeitdrift</b>	± 0,5 cm
<b>Einsatzdauer des Sensors</b>	ca. 1–2 Jahre, abhängig von Korrosion und Bewuchs
<b>Energieversorgung/Bedarf</b>	Sensor: 12–18 V =, 20 mA, massefrei Registriergerät: 115/230 V, 50–60 Hz
<b>Eichmöglichkeit</b>	vorhanden
<b>Wartung/Service</b>	Freihalten des Sensors von Korrosion und Bewuchs, üblicher Service an Schreibern und Elektronik
<b>Geräteabmessungen</b>	254 × 203 × 203 mm, Gewicht 4,1 kg
<b>Gerätegewicht (Luft/Wasser)</b>	ca. 11 kg für 3 m – Einheit
<b>Art der Verankerung/Auslegung</b>	Befestigung an einem Bauwerk oder Traggerüst
<b>Meßwertregistrierung</b>	auf Analogschreibern oder Magnetband
<b>Meßdatenauswertung</b>	manuell oder Rechner
<b>Empfohlener Anwendungsbereich</b>	an Bauwerken, Plattformen, Trägergerüsten etc. Gefährdung durch Treibgut, Eis, Ölverschmutzung
<b>Referenzen, Literaturhinweise, Erfahrungen, Bemerkungen</b>	

Gerätehersteller  
(Name und Sitz der Firma)

H. MAIHAK AG  
Semperstraße 38  
2000 Hamburg 60  
BRD

<b>Gerätedaten</b>	Druckaufnehmer MDS 75/MDS 76 mit Meßwertempfangsgerät MDS 700/710
<b>Gemessene Parameter</b>	Wasserdruck
<b>Meßbereich</b>	0 bis 1 bar, dynamische Messungen bis etwa 25 Hz
<b>Genauigkeit</b>	< 1 %
<b>Auflösung</b>	1 mbar
<b>Ansprechempfindlichkeit</b>	--- -- -- -- --
<b>Abmessungen des Sensors (Meßwertaufnehmer)</b>	MDS 75/76: 47 Ø × 210 mm
<b>Meßverfahren (Prinzip)</b>	Schwingsaiten-Druckaufnehmer Meßwertübertragung zum Empfangsgerät über ein zweiadriges Kabel
<b>Fehlermöglichkeit</b>	Ablagerungen, Bewuchs. Die Druckschwankungen infolge der Wellenbewegung werden mit zunehmender Wassertiefe gedämpft!
<b>Langzeitdrift</b>	vorhanden
<b>Einsatzdauer des Sensors</b>	ca. 5 Jahre
<b>Energieversorgung/Bedarf</b>	Empfangsgerät: 220 V/ca. 50 Hz (Netz), ca. 30 VA Druckaufnehmer durch Empfangsgerät über Meßkabel
<b>Eichmöglichkeit</b>	vorhanden
<b>Wartung/Service</b>	Druckaufnehmer: Kontrolle der Filterscheibe bei längeren Einsätzen Empfangsgerät: keine/Schreiber: übliche Pflegearbeiten
<b>Geräteabmessungen</b>	Empfangsgerät: 19"-Gehäuse – 4 Höheneinheiten Gewicht: ca. 9 kg
<b>Gerätegewicht (Luft/Wasser)</b>	Sensoren: ca. 1 kg
<b>Art der Verankerung/Auslegung</b>	abhängig vom Meßgeräteträger
<b>Meßwertregistrierung</b>	1) analog auf Kompensationsschreiber 2) auf Magnetband
<b>Meßdatenauswertung</b>	manuell oder durch Rechner
<b>Empfohlener Anwendungsbereich</b>	im Küstenbereich und an festen Bauwerken mit Kabellängen bis 5 km Gefährdung durch Schleppnetzfisherei
<b>Referenzen, Literatur- hinweise, Erfahrungen, Bemerkungen</b>	Leichtweiß-Institut – Braunschweig, Sonderforschungsbereich 79 der Universität Hannover

Gerätehersteller  
(Name und Sitz der Firma)

Norddeutsche Seekabelwerke AG  
Postfach 80 und 83  
2890 Nordenham 1  
BRD

<b>Gerätedaten</b>	1.1.2 Druck-Sensor	
<b>Gemessene Parameter</b>	Wasserdruck, Wellenhöhe und Wellenperiode	
<b>Meßbereich</b>	0–3,5 bar mit Nullpunkt 1013 mbar = 1–4,5 bar	
<b>Genauigkeit</b>	± 0,29 %	
<b>Auflösung</b>	abhängig von der Auswertelektronik – z. B. 4 Hz	
<b>Ansprechempfindlichkeit</b>	5 V/3,5 bar bzw. 20 mA/3,5 bar	
<b>Abmessungen des Sensors (Meßwertaufnehmer)</b>	druckfestes Gehäuse 90 Ø × 235 mm (Ausführung für Kabelanschluß)	
<b>Meßverfahren (Prinzip)</b>	Der Drucksensor besitzt als druckempfindliches Element eine Membrane. Die Durchbiegung dieser Membrane wird durch Dehnungsmeßdrähte in einer Brückenschaltung erfaßt. Die Brückenspannung wird über einen hochkonstanten Verstärker dem Ausgang zugeführt. – Auf Wunsch kann der Drucksensor auch mit einem piezoresistiven Druckaufnehmer geliefert werden.	
<b>Fehlermöglichkeit</b>	Ablagerungen, Bewuchs	Die Druckschwankungen infolge der Wellenbewegung werden mit zunehmender Wassertiefe gedämpft!
<b>Langzeitdrift</b>	keine Angaben	
<b>Einsatzdauer des Sensors</b>	ca. 3–5 Jahre	
<b>Energieversorgung/Bedarf</b>	Sensor über Meßkabel ± 15 V/± 2 % ca. 1 W Landstation aus 220-V-Netz	
<b>Eichmöglichkeit</b>	vorhanden – Druckprüfung	
<b>Wartung/Service</b>	Drucksensor:	Kontrolle auf Bewuchs bei mehrjährigen Einsätzen
	Landstation:	Üblicher Service an Schreibern und Elektronik
<b>Geräteabmessungen</b>	Landstation:	19"-Gehäuse
<b>Gerätegewicht (Luft/Wasser)</b>	Sensor:	ca. 2 kg
<b>Art der Verankerung/Auslegung</b>	abhängig vom Meßsystemträger	
<b>Meßwertregistrierung</b>	1) auf Analog-Schreibgeräten 2) abhängig von Landstation auf Datenträgern oder Magnetbändern	
<b>Meßdatenauswertung</b>	1) manuell 2) automatisch im Rechner	
<b>Empfohlener Anwendungsbereich</b>	vor der Küste, vor oder an festen Bauwerken mit Kabellängen bis 15 km – Wasserdruck max. bis 10 bar Gefährdung durch Schleppnetz Fischerei	
<b>Referenzen, Literaturhinweise, Erfahrungen, Bemerkungen</b>	Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz – Norderney, SFB 79 der Universität Hannover. NIEMEYER, H. D.: Naturmessungen der Seegangs- und Brandungsbeanspruchung von Inselstränden und Insel-schutzbauwerken. Jahresbericht 1978, Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz – Norderney, Band 30, 1979. NIEMEYER, H. D.: Instrument Equipment and Data Acquisition for Field Investigation on Wave and Surf Action on Shores, Proceedings 18 th IAHR – Congress Cagliari 1979	

Gerätehersteller  
(Name und Sitz der Firma)

Safare – Crouzet  
B. P. 171  
06005 Cedex NICE  
Frankreich

<b>Gerätedaten</b>	Houlographe Ultrasonic	
<b>Gemessene Parameter</b>	Abstand der Wasseroberfläche vom Meeresboden	
<b>Meßbereich</b>	0–20 m	
<b>Genauigkeit</b>	± 5 cm	
<b>Auflösung</b>	± 1 cm	
<b>Ansprechempfindlichkeit</b>	--- -- -- --	
<b>Abmessungen des Sensors (Meßwertaufnehmer)</b>	380 Ø × 700 mm; Schwinger kardanisch aufgehängt	
<b>Meßverfahren (Prinzip)</b>	Durch Echolotung vom Meeresboden zur Wasseroberfläche wird der Abstand der Wasseroberfläche gemessen. Datenübertragung zur Landstation per Kabel. Ultraschallfrequenz: 200 kHz	
<b>Fehlermöglichkeit</b>	Störechos durch Reflektoren im Wasser wie Treibgut, Sand, Luftblasen	
<b>Langzeitdrift</b>	keine – Schallgeschwindigkeit abhängig von Temperatur und Salzgehalt des Wassers	
<b>Einsatzdauer des Sensors</b>	2–5 Jahre (kardanische Schwingeraufhängung)	
<b>Energieversorgung/Bedarf</b>	Seestation über Meßkabel Landstation 220 V/50 Hz/0,4 A	
<b>Eichmöglichkeit</b>	vorhanden	
<b>Wartung/Service</b>	Seestation:	Kontrolle auf Korrosion und Bewuchs
	Landstation:	üblicher Service an Registriergeräten und Elektronik
<b>Geräteabmessungen</b>	19"-Gehäuse, 4 Höheneinheiten, Gewicht: 25 kg	
<b>Gerätegewicht (Luft/Wasser)</b>	Sensor:	85/32 kg
<b>Art der Verankerung/Auslegung</b>	Grundgestell, absetzen auf Meeresboden	
<b>Meßwertregistrierung</b>	analog auf Schreiber, digital auf Drucker, Magnetband	
<b>Meßdatenauswertung</b>	manuell oder Rechner	
<b>Empfohlener Anwendungsbereich</b>	vor der Küste oder festen Bauwerken mit Kabellängen bis 3 km Gefährdung durch Schleppnetzfisherei	
<b>Referenzen, Literatur- hinweise, Erfahrungen, Bemerkungen</b>		

Tab.: A28

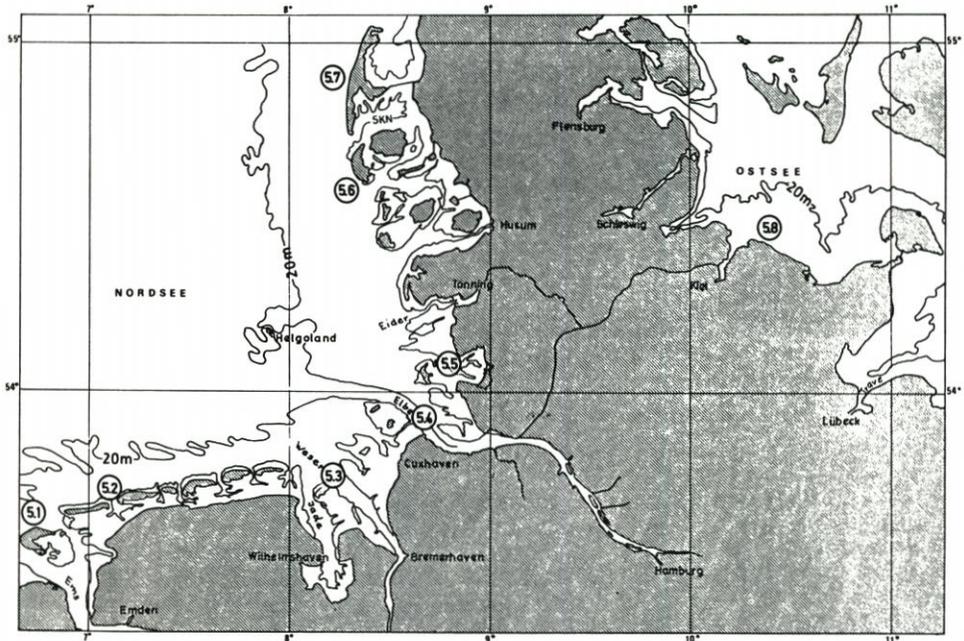


Abb. A 22: Seegangmeßprogramm an der Nord- und Ostsee

### 5.1 Südstrand der Insel Borkum

Beginn: 1978

Ende: 1980

Betreiber: Wasser- und Schiffsamt Emden und Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig

Zielsetzung: Untersuchungen zur Ermittlung der Verformung des in die Wester-Ems einlaufenden Seegangs über den der Insel Borkum vorgelagerten Riffen und Platen bis zum Randzelgat auf Höhe Borkum-Südstrand.

Vertiefungen der Kenntnisse über das örtliche Seegangsklima im Bereich der Bühnenfelder und den damit verbundenen Küstenlängstransport sowie über Zusammenhänge mit morphologischen Veränderungen und Umlagerungen im Bereich des derzeitigen Bühnensystems.

Meßnetz, Geräteausstattung und Datenerfassung: Die Verformung des Seegangs über den Riffen und Platen wird an drei Stationen (Zufahrt zur Wester-Ems, vor dem SW-Kopf der Insel Borkum und im Randzelgat auf Höhe Borkum-Südstrand) gemessen. Im Bühnenfeld sind insgesamt fünf Wellen- und drei Strömungsmessstationen aufgebaut.

Folgende Geräte sind eingesetzt:

- 3 Wellenmeßbojen Typ „wave-rider“ der Firma Datawell,
- 5 Druckaufnehmer im Flachwasser und Brandungsbereich, System „Maihak“,
- 2 elektromagnetische Zweikomponenten-Strömungsmesssonden, Typ „NSW“ der Norddeutschen Seekabelwerke,
- 1 elektromagnetische Zweikomponenten-Strömungsmesssonde, Typ „Colnbrook“ der Firma Colnbrook in England.

Die Anschlußkabel aller Meßstationen im Bühnenfeld wurden über die Deckwerksvor-

lage und über das Deckwerk zu dem hinter dem Deckwerk stehenden Meßwagen geführt und hier an die jeweiligen Vorverstärker, Stromversorgungseinheiten und Registriergeräte angeschlossen.

Die kontinuierlich und synchron anfallenden analogen Meßdaten werden sowohl auf Direktschreibern aufgezeichnet als auch mit einem PCM („Pulse code modulation“)-Magnetbandgerät auf Magnetbändern zwischengespeichert. Damit wird sichergestellt, daß bei Ausfall einer Registriereinheit jeweils auf die zweite zurückgegriffen werden kann. Eine analoge Aufzeichnung der Meßdaten auf Linienschreibern dient einer ständigen örtlichen Kontrolle im Hinblick auf etwaige Störungen.

## 5.2 Ostfriesische Inseln und Küste

Beginn: 1976

Betreiber: Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz Norderney und Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)

### Aufgabe der Untersuchungen:

- Herstellung eines Bezuges zwischen Wasserständen, Seegang, Brandung und Strandlage vor den ungeschützten Dünen und den Dünenschutzwerken der Ostfriesischen Inseln,
- Orientierung der Verformung der Riffbögen vor den ostfriesischen Seegaten an Seegangs- und Brandungserscheinungen,
- Ausbreitung des durch die Seegaten eindringenden Seegangs auf den südlich der Inseln gelegenen Watten,
- Seegangsbeanspruchung der Küstenschutzwerke in Abhängigkeit von ihrer Lage zu den Seegaten, von örtlichen morphologisch-topographischen und baulichen Randbedingungen sowie der Wechselwirkung zwischen Seegang und Bauwerk (LUCK u. NIEMEYER, 1976).

Meßnetz, Geräteausstattung und Datenerfassung: Die Seegangsentwicklung wird an 13 Stationen von See her bis vor die in allgemeiner Richtung von Südwest nach Nordost verlaufenden Deiche beiderseits von Norddeich meßtechnisch erfaßt. Gleichzeitig wird der Wellenauflauf an vier Punkten vor den Deichen gemessen.

Folgende Geräte sind eingesetzt:

- 3 Unterwasserecholot-Wellenpegel auf Ultraschallbasis, System „FAHRENTHOLZ“, Kiel,
- 2 integrierende Wellenmeßgeräte, System „GÖHREN“,
- 4 mechanische Wellenpegel, System „WEMELSFELDER“,
- 4 mechanische Wellenpegel, System „WES-63“ der Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, Norderney,
- 3 Wellenauflaufmeßgeräte.

Alle im Meßprogramm eingesetzten Geräte sind mit herkömmlicher Schreibregistrierung ausgerüstet, deren Schriebe z. B. nach dem Wellenkammverfahren digitalisiert und dann ausgewertet werden können. Um den hohen Aufwand bei der manuellen Auswertung von Schnellschrieben abzumindern, ist die Speicherung der gesamten Meßdaten auf rechnerkompatiblen Bändern vorgesehen. Im Endausbau können die Daten von zehn Wellenpegeln zentral erfaßt werden. Das Konzept der Datenfernübertragung erlaubt die fortlaufende Aufzeichnung aller Meßwerte auf ein Digitalmagnetband bei diskontinuierlicher Abfrage, was durch eine meßstationsseitige Zwischenspeicherung ermöglicht wird. Diese Aufzeichnungsart gestattet die durchgehende Messung von Sturmzeiten bei gleichzeitiger kurzfristiger Auswertung in Rechenzentren ohne zeitraubende manuelle Datenaufbereitung, die zumeist zu einer Einschränkung der Messungen zwingt (LUCK u. NIEMEYER, 1977).

**Bisherige Ergebnisse:** Folgende Ergebnisse konnten bisher erzielt werden: Die Höhenentwicklung der Wellen im Seegebiet nördlich der Ostfriesischen Inseln wird bestimmt durch die in den vorhergehenden drei Stunden herrschenden Windgeschwindigkeiten. Die durch die Riffbrandung bewirkte Wellendämpfung steht – qualitativ und quantitativ – in starker Abhängigkeit zum örtlichen morphologischen Formeninventar. Watt und Seegang unterliegen kausalen Zusammenhängen, und mit einer abnehmenden Seegangsintensität ist eine Höhenzunahme des Wattes bis zur Vorlandbildung verbunden. Für den Wellenaufbau an den Deichen haben die langperiodischen Anteile des Seegangs eine größere Bedeutung als die kurzperiodischen (NIEMEYER, 1976, 1977, 1979).

### 5.3 Jade-Weser-Ästuar

**Beginn:** 1975

**Ende:** 1979 (nur Jade)

**Betreiber:** Wasser- und Schiffsamt Bremerhaven, Wasser- und Schiffsamt Wilhelmshaven sowie Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)

**Aufgabe der Untersuchungen:** Messung des Wellenklimas in den Ästuaren von Weser und Jade mit ihren verzweigten Rinnensystemen und Folgen von Untiefen und Platen sowie darin eingebetteten tieferen Rinnen als Grundlage für Untersuchungen im Bereich der morphologischen Veränderungen, für Planung und Bemessung aller Seebauwerke und für die Sicherheit des Schiffsverkehrs.

Im einzelnen sollten mit den Messungen folgende Fragestellungen bearbeitet werden:

- Änderung der Parameter beim Einlaufen der Wellen in das Ästuar,
- Verteilung der Seegangsenergie hinter Riffen und Platen,
- Einfluß des Seegangs auf die Topographie und umgekehrt,
- Gewinnung von Bemessungsdaten für Seebauwerke,
- Einfluß des Seegangs auf Schiffe, insbesondere des langperiodischen Seegangs auf Tiefgangschiffe.

#### Meßnetz, Geräteausstattung und Datenerfassung:

**Jade:** Im Bereich der seewärtigen Zufahrt zur Jade wurde im Wangerooger Fahrwasser eine Seegangsmeßboje („wave rider“) ausgelegt. Zwei weitere Stationen mit mechanischen Wellenschreibern wurden im Bereich Hooksielplate und Alte Mellum angeordnet. An ihnen sollten u. a. Werte über die Veränderung des Seegangs beim Einlaufen in die Jade sowie Bemessungsdaten für Bauten aller Art im Seebereich gewonnen werden.

**Außenweser:** In der Außenweser wurden der Seegang und seine Verformung an fünf Stationen gemessen:

- Station Schlüsseltonne bei einer Wassertiefe von rd. SKN – 20 m für den in das Ästuar einlaufenden unbeeinflussten Seegang mit einer „wave rider“-Boje,
- Stationen „Roter Sand-Ost“ (SKN – 6 m; auf bzw. hinter einem Riff gelegen) und „Roter Sand-West“ (SKN – 10 m; am Rand der tiefen Rinne),
- Stationen „Tegeler Plate-West“ (SKN – 8 m; Rinnenbereich) und „Tegeler Plate-Ost“ (SKN – 4 m; Platenbereich).

Folgende Geräte wurden eingesetzt:

- mechanische Wellenschreiber, Typ „WEMELSFELDER“,
- Wellenmeßbojen, Typ „wave rider“ der Firma DATAWELL.

Die Meßwerte wurden auf dem Funkwege an eine Station auf dem Leuchtturm Hohe Weg übertragen und dort über AD-Wandler auf Magnetband gespeichert.

Durch Seegangseinwirkung und Kollision mit Schiffen gingen mehrere Pfahlstationen mit mechanischen Geräten verloren, so daß dann vier der fünf Stationen mit „wave rider“-Bojen besetzt waren.

Durch Schwierigkeiten im Empfangssystem (AD-Wandler, Multiplexer-Einheit) wurden erst 1978/79 längere Meßreihen der Bojen aufgenommen, die auch eine spektrale Auswertung zuließen.

**Bisherige Ergebnisse:** Da das Vorhandensein langperiodischen Seegangs aus einem Schrieb nicht direkt ersichtlich ist, wurde ein Rechenprogramm entwickelt, das mit Hilfe der spektralen Seegangsanalyse und nach Glättung des errechneten Spektrums erkennen läßt, ob im langperiodischen Bereich nennenswerte Energieinhalte vorhanden sind. Mit Hilfe eines parametrisierten Spektrums lassen sich Abhängigkeiten von verschiedenen Einflußfaktoren leichter erkennen. Es konnte bisher bei verschiedenen Wetterlagen langperiodischer Seegang nachgewiesen werden (YSKER, 1979).

Schon die ersten Ergebnisse aus der Außenweser zeigten, daß bei Sturm höhere Wellen im äußeren Ästuar auftreten, als allgemein angenommen oder vorausberechnet werden konnte. Im inneren Ästuar treten höhere Wellen mit sehr langen Perioden auf (BARTHEL, 1979, 1980).

Die vertiefte Auswertung nach kennzeichnenden Werten ergibt nach BARTHEL (1980):

- die Abhängigkeit der Wellenhöhen und -perioden von Wind und Wassertiefe. Dabei stellt sich heraus, daß die Vorhersageverfahren, wie sie z. B. in der amerikanischen Literatur angegeben werden, für den hiesigen Bereich kaum anwendbar sind,
- daß ausgereifter Seegang im Ästuar schon nach kurzer Einwirkdauer des Windes entsteht und ebenso schnell wieder abgebaut werden kann,
- für bestimmte Gebiete des Ästuars zuverlässige Angaben über Wellenhöhen und -perioden aufgrund der herrschenden Windverhältnisse,
- den Einfluß alternierender Tideströmungen auf Höhen und Perioden in Übereinstimmung mit Literaturangaben. Eine Beeinträchtigung der Höhen ist jedoch begrenzt auf den Bereich  $H_{1/3} > 1,0$  m.
- daß die Wellenparameter sich beim Einlaufen in das Ästuar erheblich ändern. Bei Sturmweatherlagen ist mit langperiodischem Seegang auch im Platenbereich zu rechnen, so daß eine Gefährdung von Tiefgangsschiffen nicht auszuschließen ist,
- daß bei Sturmweatherlagen im äußeren Ästuar maximale Wellenhöhen  $H_{max} = 15,0$  m vorkommen können. Diese Werte reichen an die Ergebnisse von Modellrechnungen für die südliche Nordsee heran.

Die Spektralanalyse eröffnet neue Möglichkeiten der Beurteilung des Ästuarseegangs. Es zeigt sich, daß abweichend von den üblichen Energiespektren-Formen im Ästuar typische Mehrfach-Peak-Spektren auftreten, die den Bereich charakterisieren. Die Untersuchung der Spektren mit besonderer Berücksichtigung der Gesamtenergie zeigt,

- daß Energie- und damit Höhenverluste im Riffbereich mit rd. 15 bis 20 % kleiner sind als erwartet; z. T. ergeben sich durch Beugung und Überlagerung größere Wellenhöhen als draußen,
- daß die hauptsächliche Energieumwandlung vor dem bei  $T_{nw}$  freifallenden Platenbereich erfolgt. Nur noch 16 bis 20 % der ursprünglichen Wellenenergie erreichen das Innere des Ästuars.

#### 5.4 Elbmündungsgebiet

Dauer: 1963 bis 1975

Betreiber: Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk der Freien und Hansestadt Hamburg – Strom- und Hafengebäude

**Aufgabe der Untersuchungen:** Ergänzend zu hydrodynamischen und morphologischen Fragestellungen wurden von der Forschungsgruppe auch die physikalischen Zusammenhänge beim Lauf der Wellen in flaches Wasser, vom Tiefwasser- bis zum Wattseegang, untersucht.

Im einzelnen wurden folgende Analysen über die Seegangsverhältnisse im Elbmündungsgebiet ausgeführt:

- typische Verteilungskurven für die Perioden, Höhen und Längen des Seeganges, die einen Aufschluß über die Veränderung der Wellenkennwerte beim Einlaufen vom Rand der Außenelbe auf das angrenzende Wattgebiet vermitteln,
- Korrelation zwischen Wellenhöhen und -perioden sowie den Windverhältnissen und Wasserständen,
- Untersuchung der Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Wassertiefe und topographischen Parametern, auch im Hinblick auf Extrapolationen extremer Seegangsverhältnisse,
- Diffraktion und Refraktion von Seegang an Platen, Riffen und Prielrändern,
- Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeiten der Wellenhöhen in Tiden je Jahr für verschiedene Lokationen auf der Grundlage vorliegender Windstatistiken für das Elbmündungsgebiet,
- Angaben über Brandungssstau und Brandungsschwingung.

**Meßnetz, Geräteausstattung und Datenerfassung:** Im Seegangmeßprogramm wurde in den Jahren 1963 bis 1975 der Seegang an insgesamt 28 Meßstationen in der Außenelbe und im Wattgebiet untersucht.

Folgende Geräte wurden eingesetzt:

- 7 integrierende Wellenmeßgeräte mit einer Schnellschriebsdauer von mehr als 4 Minuten, System „WEMELSFELDER“,
- 6 integrierende Wellenmeßgeräte mit einer Schnellschriebsdauer von 2 Minuten, System „WEMELSFELDER“,
- 5 integrierende Wellenmeßgeräte, System „GÖHREN“.

**Erfahrungen:** Aus einer Untersuchung über die Brauchbarkeit der gewonnenen Meßdaten ging hervor, daß von insgesamt rd. 5800 vorgesehenen Betriebsstunden an rd. 1500 Tagen die Geräte keine brauchbaren Registrierungen lieferten. Das ist eine Ausfallquote von rd. 25%. Dabei hatte sich besonders der starke Eiswinter 1969/70 ungünstig ausgewirkt.

Die Ausfallursachen sind bei den pfahlgebundenen (z. T. mit Plattformen ausgerüsteten) Geräten sehr vielfältig und teilweise hinterher gar nicht mehr feststellbar, wenn sie nicht unmittelbar beobachtet werden konnten. Außerdem führen oftmals mehrere Ereignisse gleichzeitig zum Ausfall eines Gerätes (SIEFERT, 1971).

**Ergebnisse:** Einteilung in Gebiete gleicher Seegangsscharakteristik:

- tieferes Wasser vor dem Watt
- Wattströme
- Randwatt
- Brandungswatt
- brandungsfreies Watt

im Hinblick auf einen allgemeinen Überblick über den Seegang an Nord- und Ostsee unter Berücksichtigung gewisser Umgebungsparameter. Damit besteht die Möglichkeit, nach vorge-

gebenen Kriterien, z. B. zur Bauwerksbemessung in den genannten Gebieten, jede gewünschte statistische Größe zu bestimmen (SCHRADER, 1968; SIEFERT, 1971, 1972, 1974). Als ein markantes Ergebnis kann das Verhältnis  $H_{\max}/d = 1$  für Brandung im Watt genannt werden.

### 5.5 Dithmarscher Küste

**Beginn:** 1978

**Betreiber:** Amt für Land- und Wasserwirtschaft Heide, Dezernat Gewässerkunde, Büsum

**Aufgabe der Untersuchungen:** Ermittlung des auf die Seedeiche zulaufenden Seegangs und Erfassung der Wellenaufbauhöhe auf der Böschung eines Seedeichs. Die Ergebnisse dienen als Grundlage zur Bemessung von Küstenschutzwerken und zur Beurteilung der Schutzwirkung von Watt und Vorland.

**Meßnetz, Geräteausstattung und Datenerfassung:** Gemessen wird vor dem Seedeich bei Heringsand, nördlich von Büsum, seewärtig eines schmalen Vorlandstreifens mit breitem Anwachs (Quellerzone). Die Anlage gliedert sich in Seegangsmessung und Wellenaufbaumessung.

Folgende Geräte sind eingesetzt:

**Seegang:** 3 induktive Druckaufnehmer, System „HOTTINGER-BALDWIN“. Die Aufnehmer sind vergossen mit fest angekoppeltem Kabel 8/00-4 und, zum Schutz vor mechanischen Schäden, in ein nach oben offenes Betonrohr gebettet mit darüberliegendem Metallgitter. Nenndruck: 5 bar, Empfindlichkeit: 8 m V/V.

Die einzelnen Druckaufnehmer liegen 20 m, 210 m und 410 m vom Deichfuß entfernt auf PN + 6,5 bis 5,9 m.

**Auflauf:** 48fach Drucksensorsystem als Auflaufdetektor mit 45 m langer Wellenaufbau-Meßstrecke aus V4A-Material und Schreibgerät mit Programmschaltwerk für 24 V, System „FAHRENTHOLZ“.

Die Meßschiene ist auf Beton-Spurwegplatten montiert, die in die Seedeichböschung eingelassen sind. Weil vor allem Daten aus ungünstigen Vorgängen interessieren, also von mittleren und schweren Sturmfluten, wurde der unterste Drucksensor (Wassereintrittsöffnung) auf 3,1 m NN gelegt, so daß der oberste auf 8,51 m NN unmittelbar unterhalb der Deichkrone liegt.

Diese Anlage wird während Sturmfluten kurzzeitig um die Eintrittszeit des Hochwassers eingeschaltet, um Extremwerte zu erhalten. Messungen und Auswertungen werden darüber hinaus nicht vorgenommen.

**Erfahrungen:** Die Stromversorgung aus Batterien hat Schwächen, u. a. wegen deren zu schneller Alterung. Es ist daher vorgesehen, ein Stromaggregat einzusetzen. Eine zweite, ähnliche Meßanlage wie die in Heringsand soll am neuen Speicherkoog-Seedeich (scharliegend) in der Dithmarscher Bucht installiert werden.

### 5.6 Nordstrander Bucht und Sylt

**Beginn:** 1978

**Ende:** 1982

**Betreiber:** Amt für Land- und Wasserwirtschaft Husum, Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen sowie Sonderforschungsbereich 79, Teilprojekte C2/C3 der Universität Hannover

**Aufgabe der Untersuchungen:**

- Beschaffung von Seegangsdaten im Rahmen geplanter Bauvorhaben in der Nordstrander Bucht,
- Erfassung der Änderung des Seegangs im Bereich der Nordstrander Bucht durch die topographischen Randbedingungen und Vergleich mit dem Seegangsklima an der exponierten Westküste von Sylt,
- Vergleichsmessungen zwischen „FAHRENTHOLZ“-Wellenschreiber und „wave rider“-Boje (Sylt),
- Seegangsmessungen in Flachwasserbereichen (küstennahen Gebieten)
  - zur Untersuchung charakteristischer Spektralformen und Extremwertparameter,
  - zur Untersuchung charakteristischer Extremwertfolgen (z. B. Wellengruppen) oder anderer charakteristischer Eigenschaften, die in einem Energiedichtespektrum nicht enthalten sind,
  - für vergleichende Untersuchungen von Auswerteverfahren,
  - als Eingangswerte für Modellversuche mit unregelmäßigen Wellen.

**Meßnetz, Geräteausstattung und Datenerfassung:** Der Seegang wird durch „wave rider“-Bojen an drei ausgewählten Stationen in der Nordstrander Bucht gemessen. Die Messungen vor Westerland wurden im Frühjahr 1980 beendet.

Die Signale werden auf Analogmagnetband aufgezeichnet. Das Bandgerät ist mit einer Einschaltautomatik ausgerüstet, die mit dem Empfangsgerät gekoppelt ist. Messungen werden alle 4 Stunden ausgeführt; die Meßdauer beträgt jeweils 20 Minuten. Bei extremer Wellenbewegung wird die Meßzeit auf 40 Minuten verlängert oder kontinuierlich gemessen.

Die Wellen werden routinemäßig nach charakteristischen Seegangparametern ausgewertet, wobei die Zeitreihen sowohl mit Methoden der Extremwertstatistik als auch (im Frequenzbereich) auf der Grundlage der FOURIER-Transformationen analysiert werden.

### 5.7 Küstenvorfeld der Insel Sylt

**Beginn:** 1971

**Ende:** 1980

**Betreiber:** Amt für Land- und Wasserwirtschaft Husum und Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig

**Aufgabe der Untersuchungen:**

- Seegangs- und Strömungsmessungen zur Beurteilung der Sandvorspülung vor Westerland/Sylt im Jahre 1972,
- Verformung des Seegangs von der äußeren Meßstation, etwa 1,3 km vor der Küste, bis zum Strand einschließlich unter Berücksichtigung der Wirksamkeit eines Sandriffes, das in etwa 300 m Entfernung der Küste vorgelagert ist,
- Korrelationen zwischen örtlichen Windverhältnissen und – mit einer Phasenverschiebung von etwa drei Stunden – vorherrschenden Wellenkenngrößen,
- Energiedissipation, Orbital- und Brandungsströmungen sowie Brandungsstau im Strandbereich,
- Energieabgabe einer Brandung je Flächeneinheit als Maß für die mögliche Zerstörungskraft.

**Meßnetz, Geräteausstattung und Datenerfassung:** Für die im Jahre 1971 begonnenen Seegangsmessungen wurde ein Meßprofil bis zu einer Entfernung von 1280 m vor der Küste im südlichen Bereich der Stadt Westerland gewählt. An den Stationen W<sub>1</sub> bis W<sub>4</sub> wurden folgende Meßgeräte ausgelegt (WENZEL, 1974):

Station W<sub>1</sub> (225 m), in der Rinne zwischen Strand und Riff: Ultraschall-Wellenschreiber (System „FAHRENTHOLZ“), Druckwandler,

Station W<sub>2</sub> (570 m), am seeseitigen Rifftrand: Ultraschall-Wellenschreiber,

Station W<sub>3</sub> (940 m), seewärts des Riffes auf NN - 8,0 m: Ultraschall-Wellenschreiber, Druckwandler,

Station W<sub>4</sub> (1280 m), seewärts des Riffes auf NN - 8,5 m: kombinierter Tide- und Wellenschreiber nach dem Ultraschallprinzip.

Bei den Untersuchungen in der Brandungszone vor Sylt wurden u. a. folgende Meßgeräte eingesetzt:

7 induktive Druckgeber System „P 1“ der Firma Hottinger-Baldwin Meßtechnik,

8 Druckgeber System „МАИНАК“,

3 elektromagnetische Strömungsmesssonden System „COLNBROOK“ der Firma Colnbrook in England,

3 elektromagnetische Strömungsmesssonden System „NSW“ der Norddeutschen Seekabelwerke in Nordenham.

Für die Aufzeichnung der Meßdaten konnte noch keine digitale Aufzeichnung oder eine Registrierung über Magnetbänder vorgesehen werden; es wurden normale Schreibgeräte verwendet. Für die Ermittlung der charakteristischen Wellenhöhen und -perioden wurde die manuelle Auswertung nach dem Nulldurchgangsverfahren gewählt und einheitlich eine Folge von 100 Wellen einer jeden Messung ausgewertet. Diese Einzelwerte wurden auf Lochkarten übertragen und anschließend über EDV weiterverarbeitet.

Für die Brandungsuntersuchungen und -beobachtungen wurden in dem oben genannten Meßprofil in Abständen von je 20 m Stahlrohre mit der Oberkante auf NN + 5 m zwischen den Stationen 0 m (= Dünenfuß) und 100 m im Jahre 1971 eingespült, an denen 1971/72 Beobachtungen angestellt wurden (DETTE, 1974a).

Im November/Dezember 1973 konnte die ungewöhnliche Sturmtidenkette mit mehreren Orkanfluten erfaßt werden. Die Messungen erbrachten weitere Ergebnisse hinsichtlich der Orbitalgeschwindigkeit irregulärer Brandungswellen (BÜSCHING, 1974), über Brandungsströme im Bereich hoher REYNOLDS-Zahlen (DETTE, 1974) sowie über Seegangsenergie und -leistung am Strand und die Asymmetrie der Brandungswellen. Im Rahmen der Geräteteste zeigte es sich, daß bei Gebern mit Dehnungsmessstreifen wegen großer Kabellängen Schwierigkeiten auftraten. Druckaufnehmer nach dem Piezometerprinzip waren für den Einsatz in der Brandungszone zu empfindlich. Schwingsaitenmeßgeber haben sich sehr gut bewährt.

## 5.8 Probstei/Ostsee

Beginn: 1976

Ende: 1980

Betreiber: Amt für Land- und Wasserwirtschaft Kiel und Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig

Mit dieser Meßstation, bei deren Konzeption neben der Einbeziehung der örtlichen Gegebenheiten auch die Erfahrungen mit dem Seegangsmessprogramm vor Sylt genutzt werden konnten, war das erste Mal eine Möglichkeit gegeben, an der schleswig-holsteinischen Ostküste eingehende Kenntnisse über das Seegangs-, Brandungs- und Strömungsgeschehen zu erhalten.

Meßnetz, Geräteausstattung und Datenerfassung: Für Lage und Ausstattung des Meßprofils vor dem Ort Kalifornien waren folgende Gesichtspunkte maßgebend (EIBEN und MÖLLER, 1979):

- repräsentative Lage der Meßwertaufnehmer bezüglich der Übertragbarkeit der Daten auf das gesamte Untersuchungsgebiet sowie auch auf weite Teile der schleswig-holsteinischen Ostseeküste,
- begrenzte Übertragungswege,
- optimale Meßwerterfassung, auch einzelstandortbezogene Auswahl der Gerätetypen im Hinblick auf die jeweilige Meßaufgabe,
- weitgehende Austauschbarkeit der einzelnen Geräte bzw. deren Träger und Kabel,
- ereignisangepaßte, automatische Betriebssystematik zur Erfassung aller Meßdaten ohne dauernde personelle Überwachung,
- sichere und kostengünstige Unterbringung der Meßwerterfassungsanlagen.

Folgende Geräte wurden eingesetzt:

- 1 Wellen-Echolotpegel auf Ultraschallbasis, Prinzip „FAHRENTHOLZ“,
- 1 Ultraschall-Wellenpegel, Neuentwicklung der Firma FAHRENTHOLZ (das Gerät wurde lotrecht auf die Wasseroberfläche ausgerichtet und an einem Pfahl in ausreichender Höhe über dem Bemessungswasserstand befestigt [Station 75 m]; die Ultraschallsignale werden im Medium Luft ausgesendet und an der Wasseroberfläche reflektiert),
- 6 Druckmeßsensoren, Typ „МАИНАК“,
- 2 elektromagnetische Zweikomponenten-Strömungsmesssonden, Typ „COLNBROOK“.

Die seeseitigen Sensoren wurden aus Gründen der Verkehrssicherheit – vor allem auch im Hinblick auf den Badebetrieb und aus Kostengründen – im Strand- und Flachwasserbereich (Station 32 – 125 m) an Stahlrohrpfählen ( $\varnothing$  160 mm) sowie im tieferen Wasser (Station 450 – 1200 m) an Grundgestellen ( $\varnothing$  2 m, Höhe 1 m) angebracht. Die Übertragung der Seegang- und Brandungsströmungsdaten zum dafür zentralen Registrierteil erfolgte über armierte Seekabel.

**Ergebnisse:** Nach mehr oder weniger „ruhigen“ Jahren von 1976 bis 1978, ohne nennenswerte extreme Seegangereignisse, trat vom 28. 12. 1978 bis zum 2. 1. 1979 eine Sturmflutwetterlage mit Wasserstandserhöhungen von NN + 1,0 m bis maximal NN + 1,75 m über mehr als vier Tage (= 100 Stunden) ein. Während dieser Zeit wurden in Abständen von zwei Stunden ohne größere Ausfälle die Wellen und zugehörigen seegangserzeugten Strömungen vor der Probstei für die Dauer von jeweils 15 Minuten aufgezeichnet. Eine Grobanalyse der aufgetretenen Wellenhöhen und der Strömungen konnte vom Amt für Land- und Wasserwirtschaft Kiel schon am 5. 1. 1979 für erste Beurteilungen des Schadensausmaßes an Küstenschutzwerken und Küstenabschnitten vorgelegt werden (DETTE und STEPHAN, 1979).