

Strömungsverhältnisse in der Lübecker Bucht

Von Günter Dietrich und Hartwig Weidemann

Inhalt

| | |
|--|----|
| 1. Aufgabenstellung | 69 |
| 2. Das Untersuchungsprogramm und seine Durchführung | 71 |
| 3. Die Strömungsverhältnisse bei ausgewählten Windlagen | |
| a) bei östlichen Winden | 74 |
| b) bei westlichen Winden | 78 |
| 4. Die Strömungsverhältnisse in der Travemündung | 83 |
| 5. Zusammenfassung und Bemerkungen zu den Strömungsverhältnissen in der Brandungszone | 85 |

1. Aufgabenstellung

Die Aufgabe bestand in der Ermittlung der Strömungsverhältnisse in der Lübecker Bucht im allgemeinen und ihres Anteils an den Abtragungsvorgängen vor dem Brodtener Ufer zwischen Niendorf und Travemünde im besonderen. Der zweite Teil dieser Aufgabe mit seinen hohen Anforderungen an direkte Strommessungen in See entsprang unmittelbar den Bedürfnissen des Wasserbaus. Zusammen mit anderen Untersuchungen der natürlichen Verhältnisse galt es zu klären, mit welchen Mitteln die Küste vor den abtragenden Kräften wirksam geschützt werden kann.

Die vorliegende spezielle Aufgabe erschien nicht lösbar, ohne daß versucht wurde, die Strömungsvorgänge vor dem Brodtener Ufer in einen größeren Zusammenhang mit den Verhältnissen in der Lübecker Bucht zu bringen. Aber auch bei der Einbeziehung der Lübecker Bucht in die Betrachtung kann nur eine Teillösung der Fragestellung erwartet werden, da die Vorgänge in der Brandungszone durch Messungen nicht erfassbar waren. Die geeigneten meßtechnischen Voraussetzungen fehlen dafür. Gerade diesen Vorgängen muß aber eine übertragende Bedeutung zugesprochen werden, sowohl wegen der zerstörenden, als auch wegen der transportierenden Kräfte, die mit ihnen verbunden sind. Sie finden im folgenden kurz Erwähnung, soweit man aus allgemeingültigen Ergebnissen neuerer Brandungsuntersuchungen Aussagen über die Verhältnisse in der Lübecker Bucht machen kann.

Das Meßprogramm befaßte sich ausschließlich mit der Ermittlung der Strömungsverhältnisse der Lübecker Bucht außerhalb der Brandungszone. Auch diese Aufgabe stellte umfangreiche Anforderungen an die Messungen, die sich aus der allgemeinen Natur der Strömungen in der Lübecker Bucht ergaben.

Bei einer Gesamtküstenlänge von 69 km von Dahmeshöved im Norden über Neustadt und Travemünde bis Klützhöved im Osten und bei einer Gesamtbreite der Öffnung zwischen Dahmeshöved und Klützhöved von 21 km stellt die Lübecker Bucht einen Teil der Mecklenburger Bucht dar. Diese Randstellung kommt auch in den Strömungsverhältnissen zum Ausdruck. Sie wird deutlich, wenn man die großräumigen Strömungsverhältnisse an der Oberfläche zwischen Kattegat und eigentlicher Ostsee betrachtet. In den beiden Karten in Abbildung 1 nach G. DIETRICH (2) sind die Oberflächenströmungen bei Ost- und Westwinden Stärke 6 gegenübergestellt, die sich auf Tagesmittel des Windes und der Oberflächenströmung beziehen. Der Anteil windbedingter Gefällsströmungen ist bei den höheren Stromgeschwindigkeiten entscheidend beteiligt. Er ist durch die geographische Lage besonders begünstigt, dadurch daß Kattegat, Sund und Beltsee das Ostende des Skagerraks mit dem Westende der eigentlichen Ostsee verbinden. Der gleiche Wind ruft entgegengesetzte Stauwirkung im östlichen Skagerrak und im westlichen Teil der eigentlichen Ostsee hervor. Westliche Winde zum Beispiel erzeugen

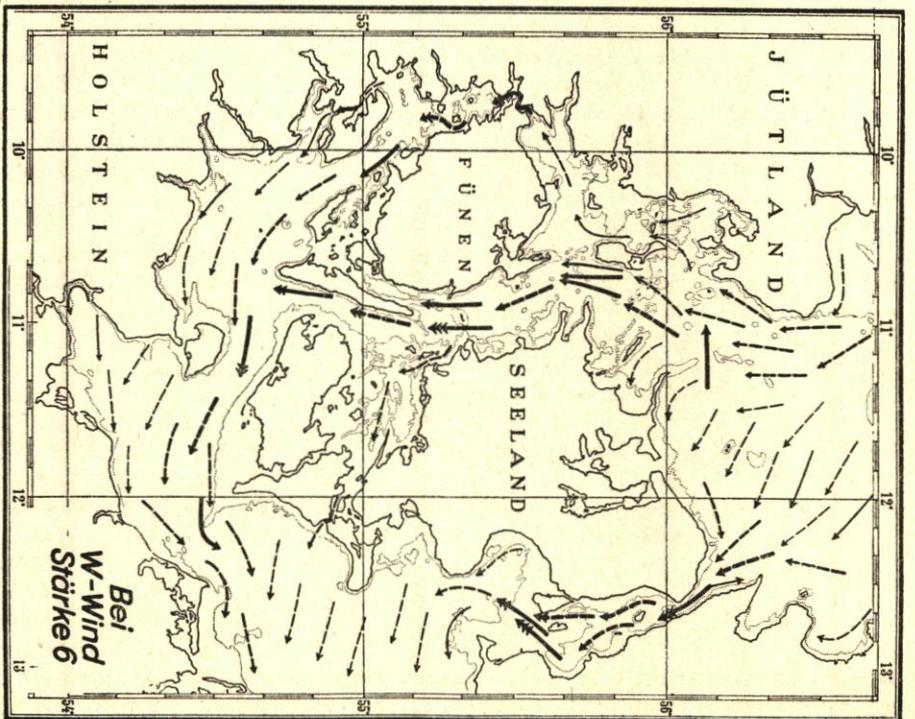
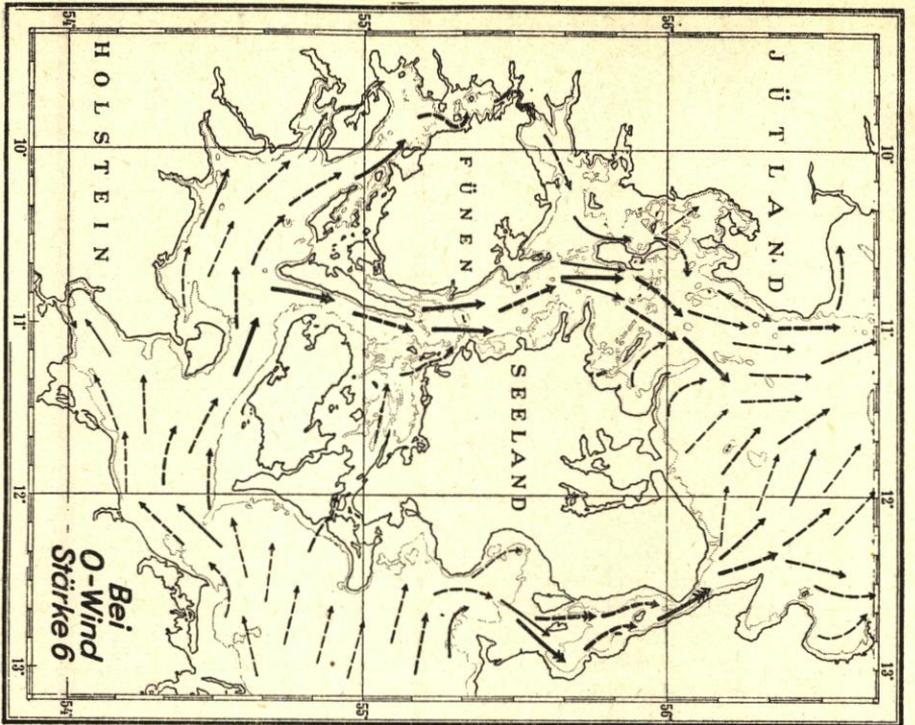


Abb. 1. Oberflächenströmungen in der Beltsee bei Ostwind und bei Westwind Stärke 6 (nach G. DIERICH, 1951)

Strom- und Windangaben beziehen sich auf Tagesmittelwerte, die Windangaben außerdem auf die mittlere Luftbewegung im Meeresniveau im Gebiet mit den Grenzen Skagen—Kopenhagen—Fehmarn—Blaavandshuk

Stromgeschwindigkeit in cm/Std.
(für 10 m unter Wasser)

Häufigkeit des Stromrichtung in %
(anzusehen nach nicht auf Beobachtungen)

| | | | |
|---|---------|---|--------------------|
| ○ | < 0,2 | ← | > 75 |
| — | 0,2-0,5 | ← | 50-75 |
| — | 0,5-1,0 | ← | 25-50 |
| — | 1,0-1,5 | ← | 10 m Referenzlinie |
| — | 1,5-2,0 | ← | |
| — | > 2,0 | ← | |

eine Erhöhung des Wasserstandes im östlichen Skagerrak, aber eine Erniedrigung im westlichen Teil der Ostsee, begünstigen damit ein großes Spiegelgefälle zwischen Skagerrak und Ostsee und demzufolge einen starken Oberflächenstrom durch die Durchlässe der Beltsee in Richtung auf die Ostsee. In engem Zusammenhang mit den Änderungen des Spiegelgefälles zwischen beiden Seegebieten, die mit den Änderungen von Richtung und Stärke des Windes auftreten, unterliegt auch der Durchstrom Schwankungen in der Geschwindigkeit und Wechsel in der Richtung. Es sind auch andere Anteile in den beobachteten Oberflächenströmungen enthalten, wie Gezeitenströme, Strömungen im Zusammenhang mit Eigenschwingungen einzelner Seegebiete oder der ganzen Ostsee, Triftströmungen oder Strömungen, die aus dem unterschiedlichen Dichteaufbau der Wassermassen folgen. Sie spielen aber gegenüber den windbedingten Gefällsströmungen zwischen Kattegat und Ostsee eine untergeordnete Rolle. Dies gilt naturgemäß nur für die Durchlässe und ihre Verbindungsstücke, es gilt nicht für die randlichen Buchten. Zu diesen Buchten gehört aber die Lübecker Bucht.

Nur gelegentlich nimmt die Lübecker Bucht mittelbaren Anteil an den Vorgängen des Durchstromes zwischen Fehmarn-Belt und Gedser-Enge. Dies tritt dann ein, wenn bei langanhaltendem Ein- bzw. Ausstrom der eigentlichen Ostsee salzreiches Kattegatwasser oder salzarmes Ostseewasser sich in den oberen Wasserschichten bis in die innere Lübecker Bucht ausbreitet. Für die Entwicklung der Strömungen selbst werden jene Anteile entscheidend, denen für die Wasserbewegung in den Durchlässen der Beltsee und ihren Verbindungsstücken nur zweitrangige Bedeutung zukommt. Abgesehen vom periodischen Gezeitenstrom sind auch diese Anteile in den gemessenen Strömungen mittelbar oder unmittelbar vorwiegend vom Winde abhängig. Eine Behandlung der Strömungsverhältnisse in der Lübecker Bucht setzte deshalb voraus, daß die Messungen bei verschiedenen Windlagen erfolgten. Hierin lagen die besonderen äußeren Schwierigkeiten des Untersuchungsprogramms, das sich nicht kurzfristig auf eine Auswahl von Wetterlagen abstellen ließ. Mehrfache Wiederholungen bzw. Dauermessungen waren notwendig, um wenigstens eine gewisse Anzahl von Wetterlagen zu erfassen. Im folgenden machen es Raumgründe erforderlich, unter ihnen eine enge Auswahl zu treffen. Wir beschränken uns hauptsächlich auf die Beobachtungen bei östlichen und westlichen Winden. Diese Begrenzung erscheint insofern begründet, als damit die Gegensätze in den Stromverhältnissen bei auflandigen und ablandigen Winden in der Lübecker Bucht zur Darstellung gelangen.

2. Das Untersuchungsprogramm und seine Durchführung

Keine einzelne ozeanographische Meßmethode gestattet, die Mannigfaltigkeit der Strömungsvorgänge in ausreichender Vollständigkeit zu erfassen, besonders nicht im vorliegenden Seegebiet bei der zu erwartenden Veränderlichkeit der Strömungen. Erst aus der gegenseitigen Ergänzung der Ergebnisse nach verschiedenen Untersuchungsmethoden, die nebeneinander zur Anwendung gebracht wurden, konnte man hoffen, dem Untersuchungsziel näher zu kommen. Es handelte sich um folgende Methoden, die zur Anwendung gelangten:

- I. Abgrenzung der Wasserkörper nach Temperatur und Salzgehalt und Verfolgung ihrer Ausbreitung durch wiederholte Messungen in ein- bis dreitägigen Abständen innerhalb eines festgelegten Stationsnetzes.
- II. Messungen der Strömungen innerhalb des gleichen Stationsnetzes mit dem Stromkreuz an der Oberfläche und in Bodennähe.
- III. Messungen der vertikalen Stromverteilung vom verankerten Schiff an ausgewählten Punkten über einen längeren Zeitraum. Zugrunde gelegt wurden 48 Stunden bei Verwendung des bifilar aufgehängten Strommessers nach H. RAUSCHELBACH (9).
- IV. Dauerstrommessungen in einer Tiefe an ausgewählten Punkten über mehrere Wochen. Hierfür wurden drei Schaufelradstrommesser verwendet.

V. Wasserstandsregistrierungen mit Schreibpegeln an der Küste, zeitweilig ergänzt durch einen Hochseepegel in der Öffnung der Lübecker Bucht zur Mecklenburger Bucht.

Drei Schaufelradstrommesser, einen Bifilar-Strommesser nach Rauschelbach, einen Hochseepegel nach Rauschelbach und die Registrierpegel stellte das Deutsche Hydrographische Institut zur Verfügung. Die Messungen, die unter die Punkte I—III fallen, erfolgten mit dem Forschungskutter „Südfall“ vom Institut für Meereskunde der Universität Kiel unter der Leitung von H. WEIDEMANN, der auch die Bearbeitung ausführte. Messungen und Bearbeitung zu Punkt IV unterstanden G. DIETRICH. Das Auslegen und Aufnehmen der Geräte wurde mit dem Tonnenleger „Bussard“ vom Wasser- und Schiffsamt Kiel im Rahmen seiner Betonungsarbeiten durchgeführt. Die Betreuung der Küstenpegel zum Punkt V unterstand M. PETERSEN, die des Hochseepegels G. DIETRICH. Über die Ergebnisse der Bearbeitung der Wasserstandsänderungen berichtet W. HANSEN (3) in einer gesonderten Untersuchung. Auf den Programmpunkt V wird deshalb im folgenden nicht weiter eingegangen.

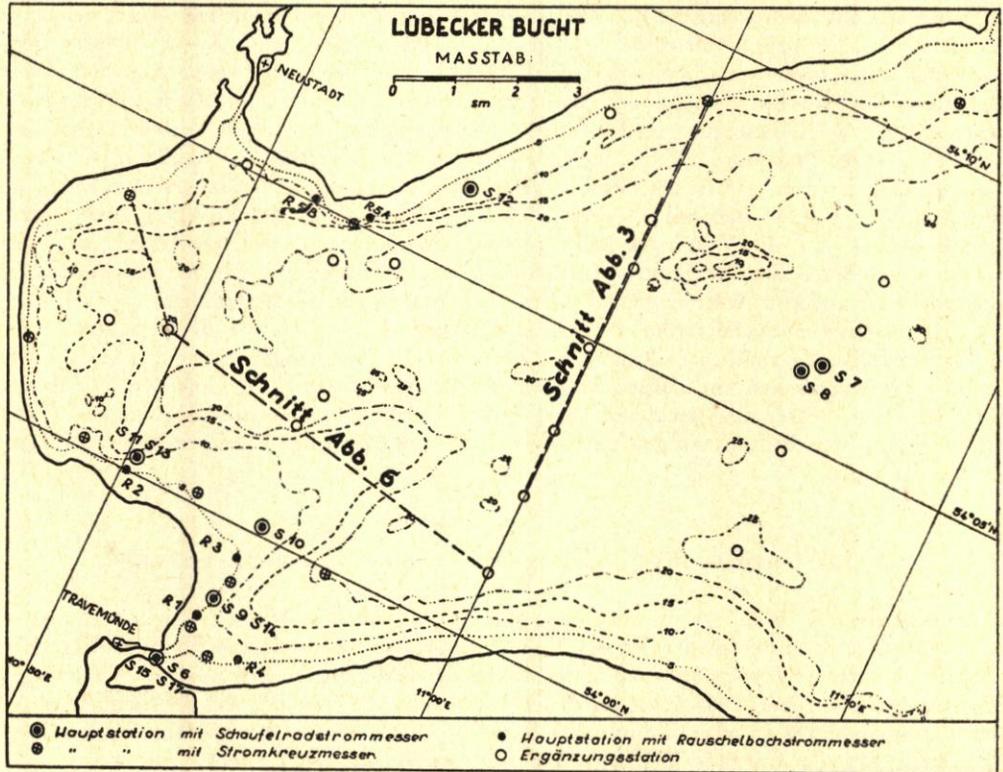


Abb. 2. Verteilung der Meßstellen in der Lübecker Bucht

- I ○ für Wasserkörperbestimmung aus Temperatur- und Salzgehaltsschichtung
- II ⊕ zusätzlich zu I für Stromstichproben mit Stromkreuz
- III ● R1—R5 für Bestimmung vertikaler Stromverteilung mit Rauschelbach-Strommesser
- IV ● S6—S17 für Dauerstrommessungen mit Schaufelradstrommessern
- Verlauf der Vertikalschnitte in Abb. 3 und 6
Tiefen in m

Die Verteilung der Meßstellen zu den einzelnen Programmpunkten ist aus Abbildung 2 zu ersehen. Tabelle 1 enthält zur Ergänzung die Positionen und Meßzeiten zu den Programmpunkten I—IV.

Tabelle 1

Meßzeiten und Positionen der ausgeführten Beobachtungen in der Lübecker Bucht zu den Programmpunkten I—IV im Jahre 1950

| Programmpunkte | Meßzeit | | Wiederholungen | | |
|---|-----------------------|---------------|---------------------------|---------------|--------------------------|
| I. Wasserkörper (Temperatur- u. Salzgehaltsverteilung) | 5. 2.—21. 2. | | 6 mal mit 12—19 Stationen | | |
| | 27. 4.—12. 5. | | 8 | " | " 12—19 " |
| | 22. 7.— 7. 8. | | 6 | " | " 15—20 " |
| II. Strom-Stichproben (Stromkreuz) | 5. 2.—21. 2. | | 6 " " 9—13 " | | |
| | 27. 4.—12. 5. | | 8 " " 9—14 " | | |
| | Meß- stelle Nr. | φ (N) | λ (E) | Meßzeit | Meßtiefen m |
| III. Vertikale Stromverteilung (Rauschelbach- strommesser) | R1 | 53°58.5' | 10°53.6' | 23. 7.—25. 7. | 0.5—2.5—4.5 0.5—3.5—6 |
| | R2 | 54°00.1' | 10°50.2' | 26. 7.—28. 7. | 0.5—2.5—4.5 |
| | R3 | 53°59.6' | 10°53.8' | 29. 7.—31. 7. | 0.5—2.5—4.5 |
| | R4 | 53°58.2' | 10°54.9' | 1. 8.— 3. 8. | 0.5—2.5—5.5 |
| | R5a | 54°05.2' | 10°53.4' | 4. 8. | 0.5—2.5—5.5 |
| | b | 54°05.1' | 10°51.5' | 4. 8.— 6. 8. | 0.5—2.5—5.5 |
| | | | | | über Grund, unt. Obfl. |
| IV. Dauerstrom- messungen (Schaufelrad- strommesser) | S6 | 53°57'50" | 10°53'05" | 22. 3.— 4. 4. | 3 5 |
| | S7 | 54°06'06" | 11°05'30" | " " " " | 3 19.5 |
| | S8 | 54°05'57" | 11°05'09" | " " " " | 17.5 5 |
| | S9 | 53°58'54" | 10°54'00" | 5. 4.— 6. 4. | 3 4.5 |
| | S10 | 54°00'09" | 10°53'48" | 5. 4.—18. 4. | 3 5.0 |
| | S11 | 54°00'12" | 10°50'21" | " " " " | 3 4.0 |
| | S12 | 54°06'18" | 10°55'18" | 19. 4.— 3. 5. | 3 3.5 |
| | S13 | 54°00'12" | 10°50'21" | " " " " | 3 4.0 |
| | S14 | 53°58'54" | 10°54'00" | " " " " | 3 5.0 |
| | S15 | 53°57'50" | 10°53'05" | 3. 5.— 4. 5. | 2.5 5.0 |
| | S17 | 53°57'50" | 10°53'05" | " " " " | 5 1.0 |

Zu der Durchführung der Programmpunkte I bis IV sei ergänzend bemerkt:

I. Die Lage der Stationen (vgl. Abb. 2) war so gewählt, daß in einer eintägigen Rundfahrt alle hydrographisch wichtigen Punkte einmal berührt wurden. Auf allen Stationen wurden Salzgehalt und Temperatur in Tiefenstufen von 5 zu 5 m bestimmt; der unterste Meßpunkt lag jeweils etwa 1 m über Grund. Die einzelnen Rundfahrten folgten einander in Abständen von 1 bis 2 Tagen (bzw. 3 Tagen während der 3. Meßreihe).

II. Auf den küstennahen Stationen dieses Netzes (Wassertiefe 6—8 m) und einigen ausgewählten Stationen im mittleren Teil der Lübecker Bucht (Wassertiefe 20—25 m) wurden außerdem auf jeder Rundfahrt kurze Strömungsmessungen mit Stromkreuzen gemacht. Zu diesem Zweck wurden vom Heck des verankerten Schiffes aus zwei Stromkreuze ausgesetzt, deren Treibkörper bei dem einen unmittelbar unter der Oberfläche, bei dem zweiten in 4 bis 6 m Tiefe (1—2 m über Grund) standen. Mit Hilfe von Logleinen, die an den Tragebojen befestigt waren, wurden die Längen gemessen, die in bestimmten Zeiträumen ausgelaufen waren. Die Richtung der Bojen wurde in dem Augenblick bestimmt, in dem das Schiff in seine Ausgangslage zurückgeschwoit war. Zur Kontrolle der Ausgangslage wurde zu Beginn der Messung ein Lot am Heck geworfen und erst dann gepeilt, wenn die Lotleine wieder senkrecht stand.

Diese einfache Meßmethode, die auch auf den Feuerschiffen in ähnlicher Weise üblich ist, ergibt recht zuverlässige Werte; lediglich der Bodenstrommessung kann ein gewisser Fehler da-

durch anhaften, daß bei großen Differenzen zwischen Oberflächen- und Bodenstrom die Schwimboje des Tiefenkreuzes durch den Oberflächenstrom etwas mitgeschleppt wird.

III. Auf fünf jedesmal 48-stündigen Dauerstationen (vgl. Abb. 2) wurden die vertikale Stromverteilung und ihre zeitlichen Schwankungen näher untersucht. Zu diesem Zwecke wurde ein elektrisch registrierender Bifilar-Strommesser nach RAUSCHELBACH (Beschreibung s. RAUSCHELBACH [9]) je 20 Minuten an der Oberfläche, in mittlerer Tiefe (2—3 m) und dicht über Grund (4—6 m) ausgebracht, so daß in jeder Stunde in allen drei Tiefenstufen Richtung und Geschwindigkeit beobachtet werden konnten. Zur Ergänzung wurde gleichzeitig auch die Änderung der thermohalinen Schichtung verfolgt.

IV. Schaufelradstrommesser bildeten eine nützliche Ergänzung zu den Programmpunkten I bis III. Darüber hinaus boten sie durch ununterbrochene Registrierung bei jeder Wetterlage die Möglichkeit, die Strömungsverhältnisse auch bei Sturm zu erfassen, wenn die anderen Methoden von Bord eines Schiffes zwangsläufig undurchführbar waren. Die Arbeitsweise dieser Geräte, von denen drei Stück gleichzeitig zur Messung an verschiedenen Punkten herangezogen wurden, ist von J. JOSEPH (5) beschrieben. Mit Ausnahme der Meßstellen in der Travemündung und in der Öffnung der Lübecker Bucht zur Mecklenburger Bucht wurden die Geräte auf etwa 7 m Wassertiefe ausgelegt. Sie standen 3 m über Grund. Geringere Meß-tiefen mußten aus Sicherheitsgründen für das auslegende Schiff und für die Geräte gemieden werden. Die Geräte lagen damit ohne Ausnahme außerhalb der Brandungszone. Sie haben sich über die Dauer der Meßzeit vom 22. 3. bis 4. 5. 1950 auch in diesem Meßprogramm vor-züglich bewährt. Besonders aus den Ergebnissen der Registrierungen bei Sturmwetterlagen lassen sich Anhaltspunkte dafür erwarten, wie weit die beobachteten Strömungen mit morpho-logisch wirksamen Kräften verbunden sein können.

3. Strömungsverhältnisse bei ausgewählten Windlagen

In der Lübecker Bucht sind im allgemeinen zwei verschiedene Wasserkörper vorhanden, die sich hinsichtlich ihrer Dichte unterscheiden:

1. Salzarmes und daher verhältnismäßig leichtes Wasser in der oberflächennahen Deckschicht mit vorwiegend 10 bis 15 ‰ Salzgehalt. Die Beimischung von Ostseewasser ist an diesen niedrigen Salzgehalten entscheidend beteiligt.
 2. Salzreiches und daher verhältnismäßig schweres Wasser in der bodennahen Schicht mit Salzgehalten um 20 bis 25 ‰, dessen Herkunftsgebiet im Kattegat zu suchen ist.
- Beide Wasserarten sind durch eine Sprungschicht voneinander getrennt, die je nach Jahreszeit und Wetterlage mehr oder weniger scharf ausgebildet ist. Sie liegt überwiegend in 15 bis 20 m Tiefe. Die vertikale Mächtigkeit der Deckschicht ist damit wesentlich größer als die der salzreichen Unterschicht; denn für diese bleiben bei den größten Tiefen von 25 m in der Lübecker Bucht im allgemeinen nur wenige Meter übrig.

Eine horizontale Lagerung der beiden Wasserarten beobachtet man nur bei ruhigen Wetterlagen. Stärkere Winde wirken sich deutlich auf die Verlagerung der Sprungschicht aus und damit auch auf die Verbreitung der Wasserarten. Aber ihr Einfluß bleibt nicht auf diese Wirkung beschränkt. Die Wassermengen der beiden Wasserarten innerhalb der Lübecker Bucht wechseln je nach den Strömungsverhältnissen in der Öffnung der Lübecker Bucht zur Mecklenburger Bucht. Wenn also die horizontale Ausbreitung der Wasserkörper aus den Beobachtungen der Salzgehaltsverteilung abgeleitet werden soll, muß stets beachtet werden, daß neben den Wirkungen von Verlagerungen in horizontaler Richtung auch solche in vertikaler Richtung auftreten.

a) Strömungsverhältnisse bei östlichen Winden

Einen Überblick über die Wirkung von östlichen Winden auf die Verteilung der Wasserarten vermitteln die vier Vertikalschnitte vom 4., 6., 8. und 10. 5. 1950 in Abbildung 3. Der Verlauf der Schnitte ist aus Abbildung 2 zu ersehen.

Zu Beginn der Nordostlage (4. 5., oberster Schnitt Abb. 3) ist die Schichtung der Bucht noch normal, d. h. an der Oberfläche 12 bis 13 ‰ Salzgehalt. Im Nordteil zeigt sich jedoch bereits eine Erniedrigung an der Oberfläche auf unter 11 ‰. Am 6. 5. hat sich diese Entwicklung weiter fortgesetzt; der Einschub salzarmen Wassers mit Salzgehalten unter 10 ‰ hat sich wesentlich verbreitert und dabei die Sprungschicht im gesamten Querschnitt der Bucht um etwa

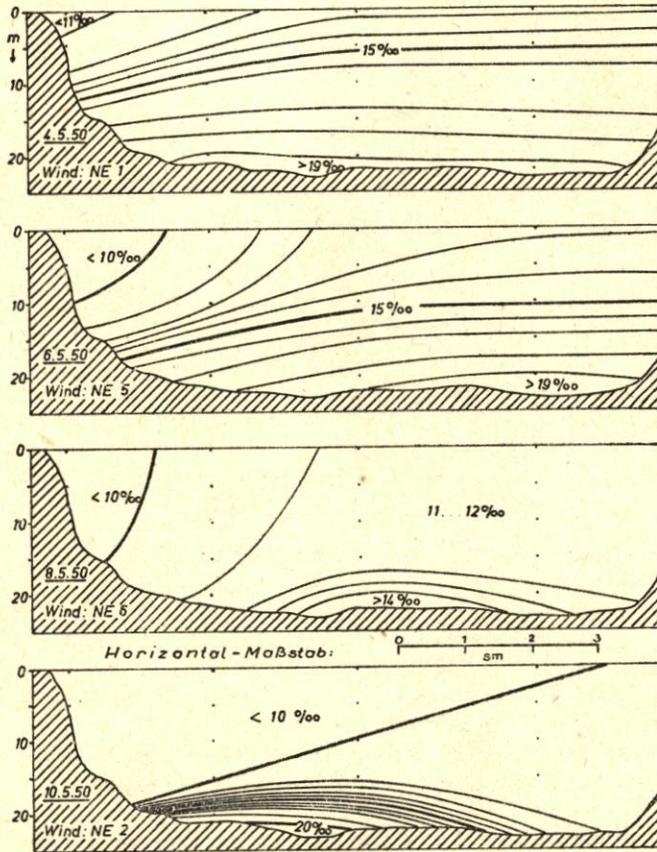


Abb. 3. Beispiel für die Salzgehaltsschichtung und ihren zeitlichen Ablauf in der Lübecker Bucht bei östlichen Winden vom 4.—10. 5. 1950
Verlauf der Schnitte s. Abb. 2

- A. Bei Beginn einer Nordostwindlage am 4. 5. 1950
- B. Im weiteren Verlauf dieser Nordostwindlage am 6. 5. 1950
- C. Bei dem Höhepunkt dieser Nordostwindlage am 8. 5. 1950
- D. Nach Abflauen dieser Nordostwindlage am 10. 5. 1950

5 m gesenkt. Auf dem Höhepunkt der Nordostlage am 8. 5. ist praktisch die ganze Bucht von salzarmem Wasser (10—12 ‰) ausgefüllt; das Tiefenwasser ist bis auf einen geringen Rest mit über 14 ‰ Salzgehalt völlig verdrängt. Am 10. 5. schließlich ist die Ausfüllung der oberen Schichten weiter fortgeschritten, und der Salzgehalt ist überall unter 11 ‰, zu einem großen Teil sogar unter 10 ‰. In der Bodenschicht jedoch dringt bei nachlassendem Anstau bereits wieder salzreiches Wasser von etwa 20 ‰ ein, das durch eine außerordentlich scharfe Sprungschicht von der Oberschicht getrennt ist.

Wie schon aus diesen Schnitten hervorgeht, erfolgt die Ausbreitung des salzarmen Ostseewassers nicht gleichförmig über die ganze Breite der Lübecker Bucht. Die in Abbildung 4 dargestellten Ergebnisse der Oberflächenmessungen erlauben einen Einblick in den zeitlichen Ablauf an der Oberfläche.

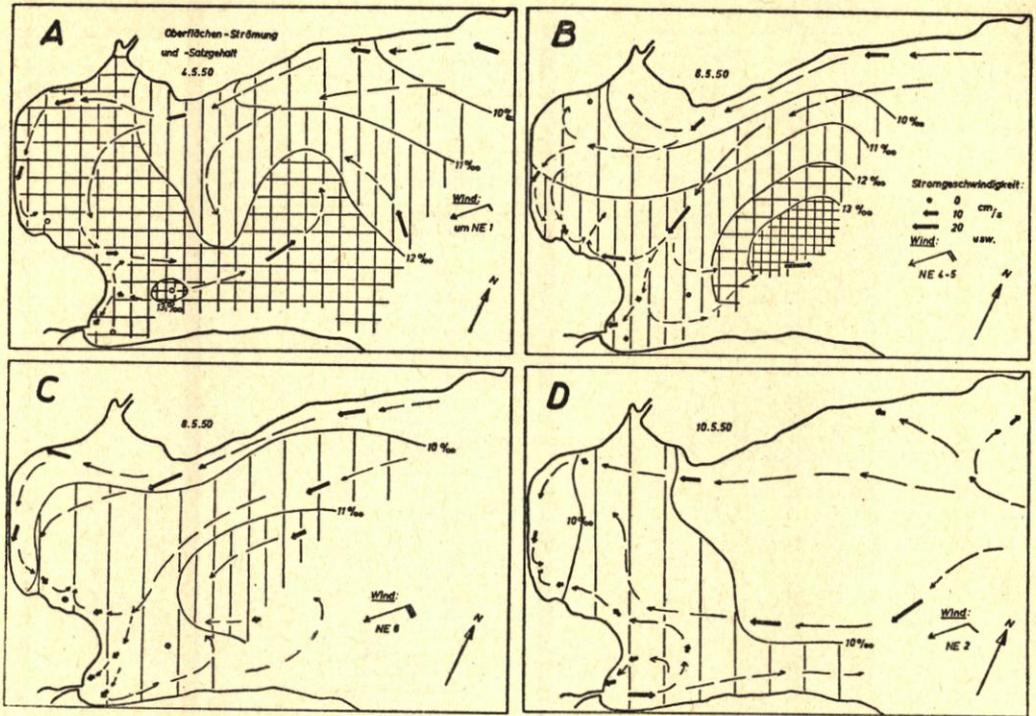


Abb. 4. Beispiel für die Ausbreitung der Wasserkörper bei östlichen Winden vom 4.—10. 5. 1950
Verteilung des Salzgehalts an der Oberfläche in ‰ und Schema der Ausbreitung der Wassermassen mit Ergebnissen der Stromkreuzmessungen

In den Karten der Abbildung 4 sind für die gleichen Tage wie in Abbildung 3 (4. bis 10. 5. 1950) die Verteilung des oberflächensalzgehaltes und die oberflächenströmung wiedergegeben. Die Dichte der Schraffur deutet die Größe des oberflächensalzgehaltes an (weiß: unter 10 ‰, dichteste Schraffur: über 13 ‰). Die dicken Pfeile stellen die Ergebnisse der oberflächenstromkreuzmessungen dar, wobei die Länge des Schaftes ein Maß für die Stromgeschwindigkeit ist. Die dünnen gestrichelten Pfeile sollen den Gesamtcharakter der Wasserbewegung nach Rückschlüssen aus Stromkreuzmessungen und Salzgehaltsverteilung verdeutlichen.

Der Einstrom erfolgt vornehmlich längs der nördlichen Begrenzung der Lübecker Bucht; die Ergebnisse der Stromkreuzmessungen und die Verlagerung der 10 ‰-Isohaline sprechen deutlich dafür. Dem steht an den beiden ersten Tagen in der südlichen Hälfte der Bucht ein kräftiger Ausstrom gegenüber. Ferner fallen in den drei Karten für den 6., 8. und 10. 5. zwei Erscheinungen in der Ausbreitung der Wassermassen auf, die sich in ähnlicher Weise wiederholen: einmal die Gabelung der Strömung vor der Mitte des Brodtener Ufers, ferner eine Konvergenz zwischen dem nördlichen Zweig dieser Gabelung und der an der Küste Haffkrug—Scharbeutz nach Süden setzenden Strömung.

Die Ausbreitung der Wasserarten an der Oberfläche, wie sie sich aus dem Salzgehalt und dazu aus Stichproben von Strommessungen mit dem Stromkreuz ergeben, deuten im ganzen gesehen darauf hin, daß sich bei östlichen Winden eine Wasserbewegung einstellt, die die

Lübecker Bucht entgegen dem Uhrzeigersinn umkreist. Eine Divergenz vor dem Steinriff und eine Konvergenz bei Niendorf scheint darin eingeschlossen. Dauerstrommessungen ergaben die Möglichkeit, dieses Bild zu kontrollieren und durch quantitative Angaben von Richtung und Geschwindigkeit an einzelnen Punkten zu erweitern.

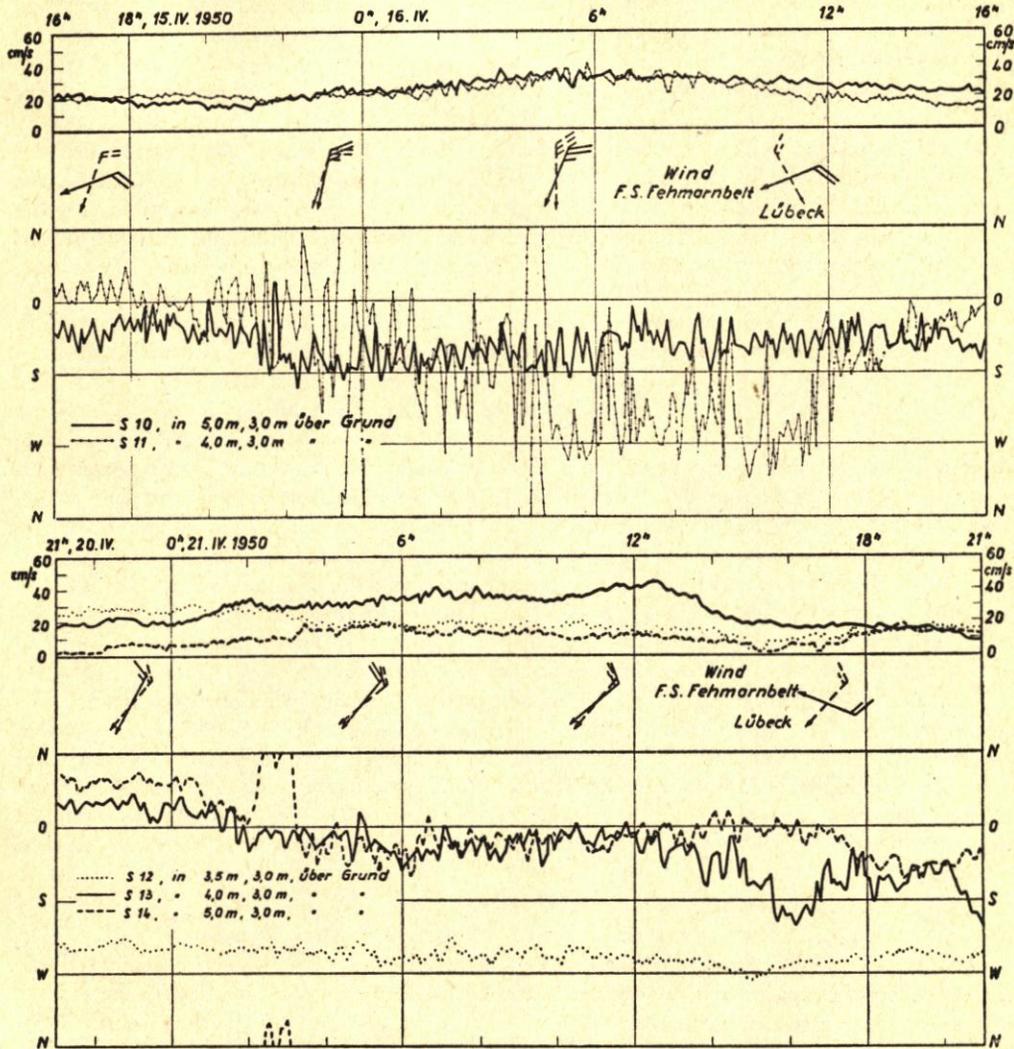


Abb. 5. Beispiele für den Strömungsverlauf nach Dauerstrommessungen in einer einzigen Tiefe bei östlichen Winden

- A. Nördlich und westlich des Brodtener Ufers auf den Meßstellen S 10 und S 11 vom 15. 4. 16^h bis 16. 4. 16^h, 1950
- B. Bei Pelzerhaken und westlich und östlich des Brodtener Ufers auf den Meßstellen S 12, S 13 und S 14 vom 20. 4. 21^h bis 21. 4. 21^h, 1950

Lage der Meßstellen s. Tab. 1 und Abb. 2

In Abbildung 5 sind zwei Ausschnitte über je 24 Stunden aus den Ergebnissen der Dauerstrommessungen mit Schaufelrädern wiedergegeben. Leider fielen in die Meßperiode keine stürmischen Ostwindlagen, so daß sich die Beispiele nur auf mäßige und frische östliche bis nördliche Winde beziehen. Die Windangaben stützen sich auf die Terminbeobachtungen auf dem

Feuerschiff Fehmarnbelt und der Wetterwarte Lübeck, also auf Beobachtungen nördlich und südlich des Untersuchungsgebietes. Die Windverhältnisse sind auf beiden Beobachtungsstellen angenähert die gleichen, so daß der Mangel an Windbeobachtungen über dem Seegebiet nicht ins Gewicht fällt. Die Angaben der Windstärken in Beaufort in den Abbildungen geschieht durch die übliche Form der Befiederung der Windpfeile. Jede lange Fieder bedeutet zwei Beaufortstärken. Die Stromgeschwindigkeiten sind in cm/sec aufgetragen, gestützt auf die Registrierungen in Abständen von fünf Minuten. Unterhalb von 8 bis 10 cm/sec Strom springen die Meßgeräte nicht an. Die Stromrichtung ist rechtweisend aufgetragen, wohin der Strom fließt.

Nach Abbildung 5 B wurde auf der Meßstelle S 12 nordöstlich von Pelzerhaken bei mäßigen Winden aus NO, Stärke 3—4, ein recht beständiger Einstrom nach WSW in die innere Lübecker Bucht beobachtet. Er verlief parallel zur Küste mit Geschwindigkeiten, die 30 cm/sec nicht überschritten. Westlich und östlich des Brodtener Ufers auf den Meßstellen S 13 und S 14 war die vorherrschende Stromrichtung O bis SO, wobei im Westen 45 cm/sec, im Osten 20 cm/sec nicht überschritten wurden. Im Westen vor Niendorf war die Stromrichtung parallel zur Küste, während sie im Osten quer über die Travemünder Bucht verlief.

Einen Ausschnitt aus den Ergebnissen von Dauerstrommessungen bei frischen Winden um NO bis Stärke 5 bis 6 enthält Abbildung 5 A, und zwar für zwei Meßpunkte westlich und nördlich des Brodtener Ufers. Die Geschwindigkeiten stiegen mit auffrischenden Winden in beiden Teilen auf 40 cm/sec. Die starke Streuung in den Stromrichtungen nach der Registrierung dürfte nicht der Wirklichkeit entsprechen. Die verschwommenen Bilder auf dem Registrierfilm deuten auf starke Bewegung der Kompaßrose im Schaufelradstrommesser, was sehr wahrscheinlich eine Wirkung der Bewegungen des ganzen Gerätes in den Seegangs- und Dünungswellen ist. Gerade vor dem Brodtener Ufer steht bei nordöstlichen Winden ein kräftiger Seegang, der in 4 bis 5 m unter der Oberfläche noch nicht abgeklungen sein kann. Die Wasserbewegungen setzten auf der Meßstelle S 10 in die Travemünder Bucht. Auf S 11 ist trotz der starken Richtungsschwankung deutlich zu erkennen, daß der Strom umsprang von O bis SO auf SW bis W und nach Abflauen des Windes wieder zurückdrehte.

Auf allen fünf Meßstellen überwogen bei mäßigen und frischen Winden aus östlichen Richtungen, wie sie in den Ausschnitten der Abbildung 5, aber auch in anderen Fällen, erfaßt wurden, Bewegungen, die die Lübecker Bucht entgegen dem Uhrzeigersinn umkreisten. Westlich des Brodtener Ufers kamen Ausnahmen vor, indem eine Stromumkehr auftrat. Dieses Bild deckt sich mit dem, was aus der Ausbreitung der Wasserkörper und den Stromkreuzmessungen erschlossen wurde. Leider fehlen Beobachtungen der vertikalen Stromverteilung bei östlichen Winden.

b) Strömungsverhältnisse bei westlichen Winden

Das statistische Überwiegen der westlichen Winde in unserem Gebiet ist bedingt durch die Häufigkeit der zyklonalen Wetterlagen. Im Vergleich zu den Ostwindlagen, die infolge ihres meist antizyklonalen Charakters eine relativ große Beständigkeit zeigen, ist die Zeitdauer der einzelnen Westwindlagen im allgemeinen kürzer, wobei die Windrichtung zwischen S und NW zu schwanken pflegt. Für die Strömungsverhältnisse bedeutet das, daß sich nur selten der Einfluß eines in Richtung und Stärke über längere Zeit konstanten westlichen Windes feststellen läßt. In den Messungen der Programmpunkte I bis III wurden solche Westwindlagen von längerer Dauer nicht erfaßt. Westwindlagen von kurzer Zeitdauer zeigten ein recht uneinheitliches Bild: der Einfluß der vorangegangenen Wetterlage auf die Verteilung der Wassermassen verschiedener Herkunft ließ sich nicht in allen Fällen eindeutig von dem Einfluß der jeweils herrschenden Wetterlage trennen. An dieser Stelle wird ein Beispiel angeführt, das den Einfluß des herrschenden Windes deutlich zeigt.

In Abbildung 6 ist eine Lage mit kräftig auffrischendem WNW-Wind in zwei Schnitten dargestellt. Die Schnitte verlaufen etwa parallel zur Windrichtung von Sierksdorf an der Neustädter Bucht über den äußeren Teil des Stein-Riffs bis zu einem Punkt etwa 2 sm nördlich

von Groß Schwansee in Mecklenburg (vgl. Abb. 2). Im ersten Schnitt (22. 7.) erkennt man bei noch ruhigem Wetter eine als normal zu bezeichnende Schichtung: an der Oberfläche etwa 12 bis 13 ‰, eine breite Übergangsschicht zwischen 7 und 18 m Tiefe und eine Bodenschicht mit

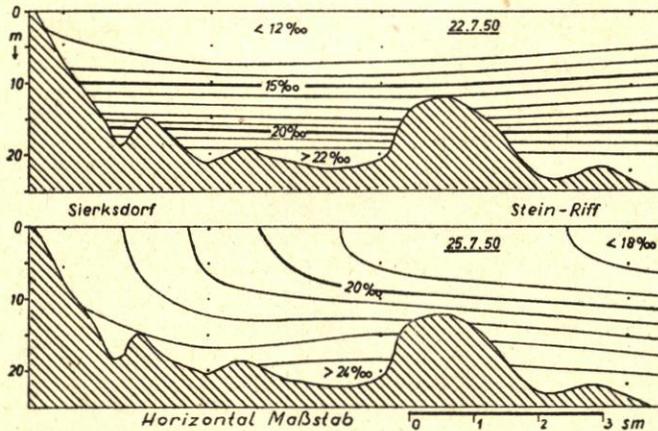


Abb. 6. Beispiel für die Salzgehaltsschichtung und ihren zeitlichen Ablauf in der Lübecker Bucht bei westlichen Winden

Verlauf der Schnitte s. Abb. 2

- A. Bei Beginn einer Westwindlage am 22. 7. 1950
- B. Bei dem Höhepunkt dieser Westwindlage am 25. 7. 1950

über 22 ‰. Am 24. 7. frischte der Wind aus West auf zeitweise Stärke 7 bis 8 auf und drehte am 25. 7. (zweiter Schnitt) auf WNW bei Stärke 6 im Mittel. Das salzarme Oberflächenwasser wurde dadurch aus der gesamten Bucht hinausgetrieben. Die Folge war, daß an der Leeküste das Tiefenwasser an die Oberfläche emporstieg. Während an der Oberfläche die Strömung überall etwa in Windrichtung setzte, muß also am Boden ein nicht unerheblicher Strom auf die Leeküste zu geherrscht haben, leider liegen für dieses Beispiel keine direkten Strommessungen vor. Im Salzgehaltsschnitt erkennt man, daß das Bodenwasser vom 22. 7. mit 22 ‰ am 25. 7. in der Neustädter Bucht als Oberflächenwasser auftrat, und daß als Ersatz des alten Bodenwassers ein stärker salzhaltiges mit über 24 ‰ einströmte.

In Abbildung 7 ist zur Ergänzung der Vertikalschnitte die Salzgehaltsverteilung an der Oberfläche für die gleichen Tage dargestellt; leider fehlen an diesen Tagen die Stromkreuzstichproben, da es sich um Rundfahrten zwischen je zwei der 48stündigen Dauerstationen handelte. Den geringen horizontalen Unterschieden am 22. 7. steht das außerordentlich starke Salzgehaltsgefälle am 25. 7. gegenüber, das fast genau parallel zur Windrichtung verläuft. Die Wirkung des Auftriebseffektes auf die Salzgehaltsverteilung ist auch an den Leeküsten bei Travemünde und zwischen Pelzerhaken und Grömitz zu erkennen, wenn auch nicht so kräftig wie in der Neustädter Bucht.

Aus den Ergebnissen der Dauerstrommessungen mit Schaufelrädern werden drei Ausschnitte von je 24 Stunden in Abbildung 8 wiedergegeben. Abgesehen von dem Fall bei mäßigen westlichen Winden in Abbildung 8 A konnten in 8 B und 8 C stürmische Westlagen ausgesucht werden mit Windstärken bis 8 Beaufort.

Auf den Meßstellen S 7 und S 8 wurde der Strom in Oberflächen- und Bodennähe in der offenen Lübecker Bucht bei 22 m Wassertiefe registriert. Die Geschwindigkeiten erreichten in der Oberflächennähe 20 cm/sec, in Bodennähe blieben sie unter 8 bis 10 cm/sec. Das Meßrad geriet überhaupt nicht in Umdrehungen. Im Ablauf der Stromrichtungen über die 24 Stunden, die in Abbildung 8 A dargestellt sind, erscheint bemerkenswert, daß die Wasserbewegung in Oberflächennähe angenähert in Richtung des Windes lief, bevorzugt ein wenig im Uhrzeigersinn von der Windrichtung abgelenkt. Die Richtungsänderungen in Bodennähe zeigen an, daß

Bewegungen vorhanden waren, die aber gering blieben und nicht ausreichten, um das Meßrad zu drehen. Ferner ist zu beachten, daß die Bewegungsrichtungen in Oberflächen- und Bodennähe einen großen Winkel einschlossen, der zwischen 90 Grad und 180 Grad schwankte. In

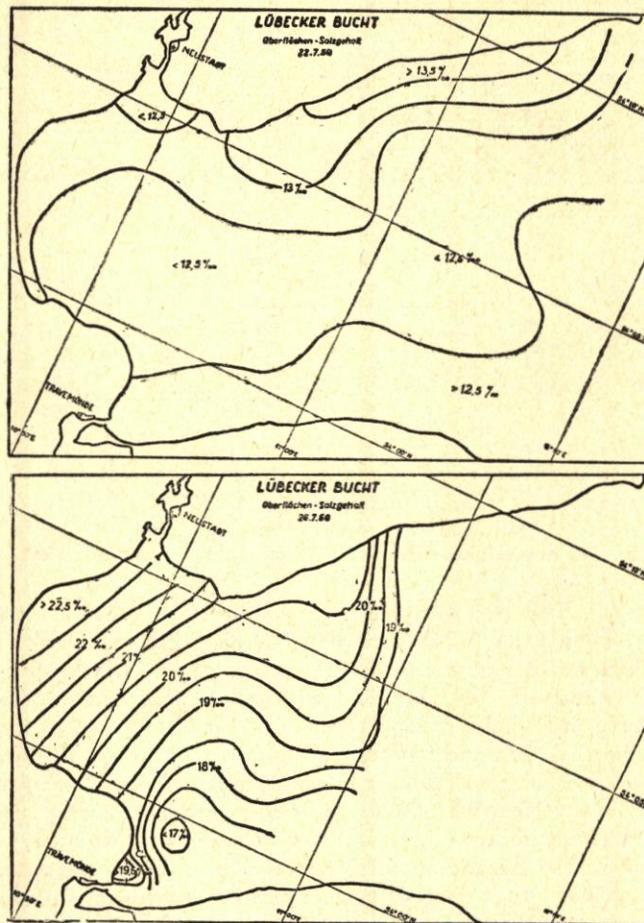


Abb. 7. Beispiel für die Ausbreitung der Wasserkörper bei westlichen Winden vom 22.—25. 7. 1950
Verteilung des Salzgehalts an der Oberfläche in ‰

der Deckschicht überwog die Ausstrom-, in der Unterschicht die Einstromrichtung in die Lübecker Bucht. Das ist derselbe vertikale Stromaufbau, der aus der Ausbreitung der Wasserarten nach den Vertikalschnitten in Abbildung 6 qualitativ erschlossen wurde.

Wenn man die Ergebnisse der Strommessungen in den Ausschnitten in Abbildung 8 B und C überblickt, dann ist auffallend, daß auf allen Meßstellen trotz der hohen Windstärken die Stromgeschwindigkeiten verhältnismäßig klein bleiben. Auf S 10 und S 11 nördlich und westlich des Brodtener Ufers waren sie unter 22 cm/sec, bei S 13 und S 14 westlich und östlich des Brodtener Ufers unter 15 cm/sec, wobei sie im letzten Fall nur selten meßbar waren und 8 bis 10 cm/sec überstiegen. Nur bei S 12 nordöstlich von Pelzerhaken wurden 30 cm/sec erreicht. Die Strömungen erfolgten vornehmlich parallel in östlicher Richtung, d. h. in der Ausstromrichtung aus der Lübecker Bucht. In der Umgebung des Brodtener Ufers traten aber auf allen Meßstellen wiederholt schnelle Richtungswechsel auf. Sie können darin begründet

sein, daß eine starke vertikale Stromschichtung auch in Küstennähe vorhanden ist, so daß das Meßinstrument zeitweise in die Strömung der Oberschicht, zeitweise in einen entgegengesetzt laufenden Strom der Unterschicht geriet. Es kann sich aber auch um einen Richtungswechsel der Strömungen über die ganze Wassersäule handeln.

Die Frage, ob eine vertikale Änderung in der Stromrichtung auf dem Flachwasser in Strandnähe überhaupt auftritt, können unter anderem die Ergebnisse der Strommessungen mit dem Bifilar-Strommesser beantworten. Hierbei wurden ausgesprochene Westwindlagen erfaßt, von denen Ausschnitte über 24 Stunden in Abbildung 9 von zwei Meßstellen wiedergegeben werden.

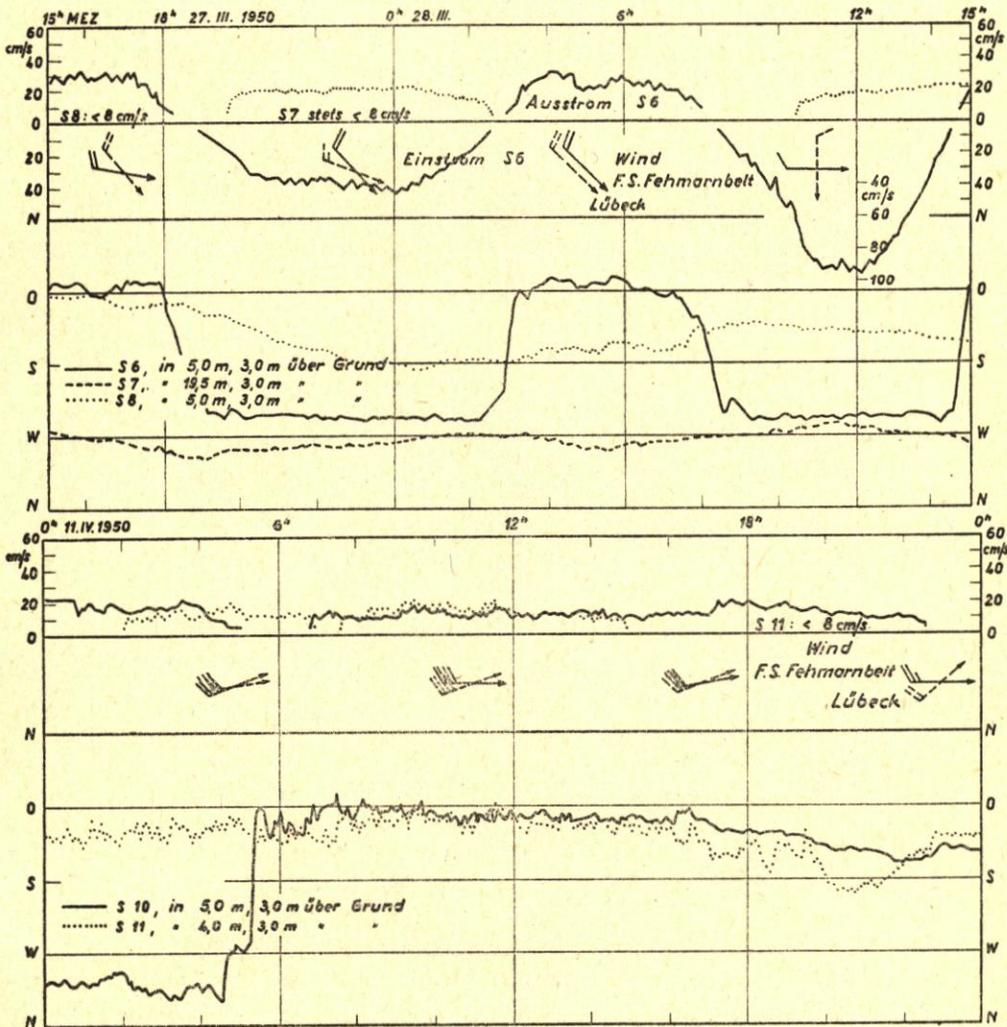
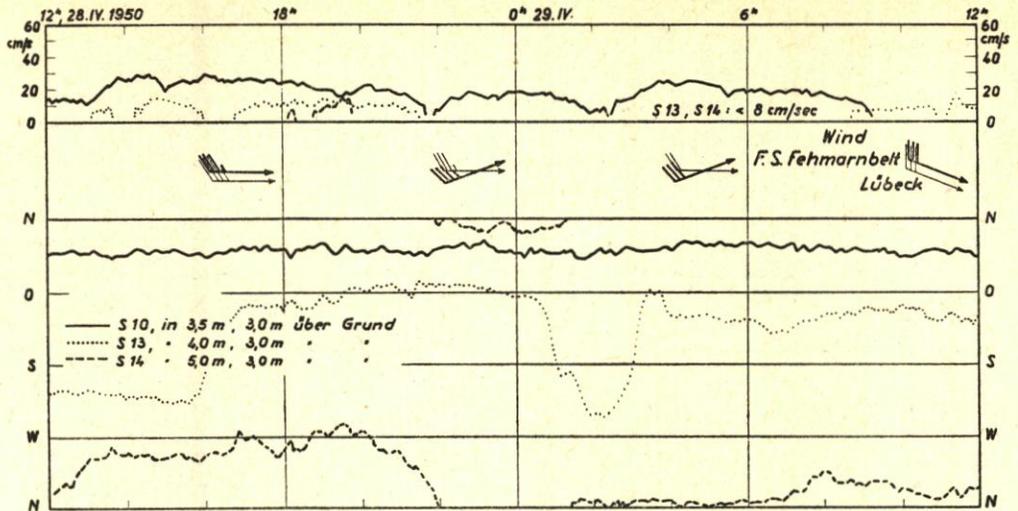


Abb. 8. Beispiele für den Strömungsverlauf nach Dauerstrommessungen in einer einzigen Tiefe bei westlichen Winden

- A. In der Lübecker Bucht und in der Travemündung auf den Meßstellen S7, S8 und S6 vom 27. 3. 15^h bis 28. 3. 17^h, 1950
 B. Nördlich und westlich des Brodtener Ufers auf den Meßstellen S10 und S11 am 11. 4. 0^h bis 12. 4. 0^h, 1950



C. Bei Pelzerhaken und westlich und östlich des Brodtener Ufers auf den Meßstellen S 12, S 13 und S 14 vom 28. 4. 12^h bis 29. 4. 12^h, 1950

Lage der Meßstellen s. Tab. 1 und Abb. 2

Die erste Meßstelle (Abb. 9 A) lag vor Niendorf (vgl. Abb. 2) auf etwa 5 m Wassertiefe. Die Meßstiefen waren 0,5 bis 2,5 und 4,5 m, charakterisieren also den Oberflächen-, Mittel- und Bodenstrom. Die Messung begann am 26. 7., unmittelbar im Anschluß an die in Abbildung 6/7 dargestellte extreme Westlage des 25. 7. mit ihren starken Auftriebserscheinungen in der Neustädter Bucht. Bei noch anhaltendem, jedoch etwas abgeflautem Wind aus NW bis W zeigte sich am 26. 7. bald nach 9 Uhr ein rasches Ansteigen der Geschwindigkeit des in allen Tiefen nach Osten gerichteten Stromes, wobei der Oberflächenstrom zwischen 10 und 13 Uhr Beträge von 55 bis über 60 cm/sec erreichte. Der Bodenstrom setzte während der gleichen Zeit nur mit

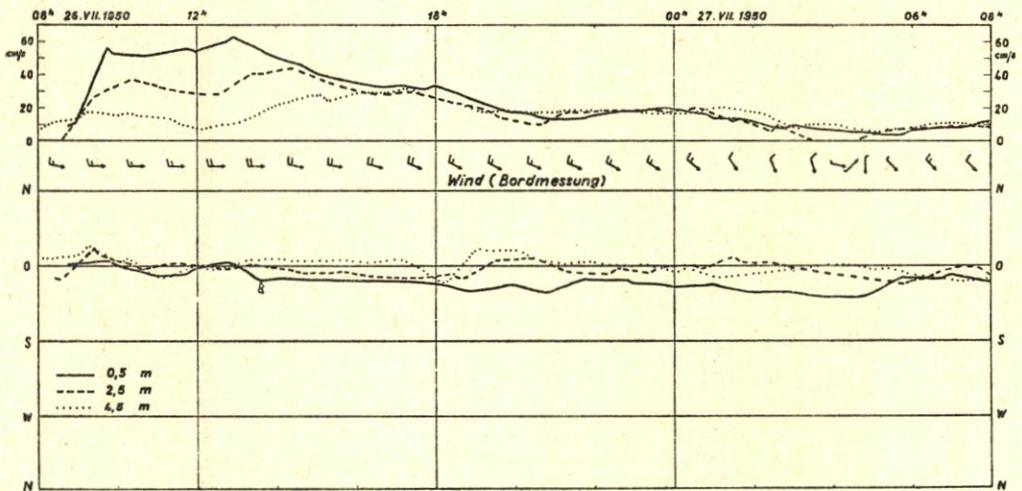
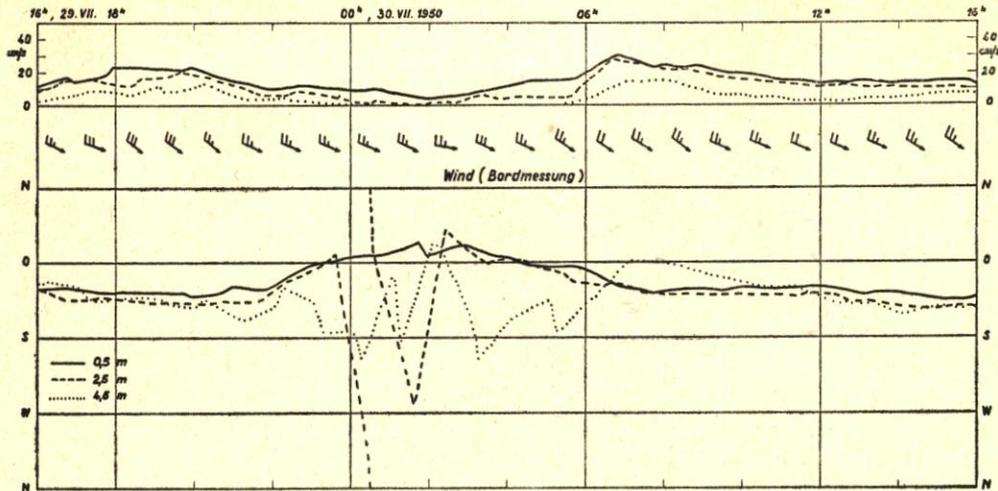


Abb. 9. Beispiele für den Strömungsverlauf in verschiedenen Tiefen bei westlichen Winden

A. Westlich des Brodtener Ufers auf der Meßstelle R 2 vom 26. 7. 8^h bis 27. 7. 8^h, 1950



B. Nördlich des Brodtener Ufers auf der Meßstelle R 3 vom 29. 7. 16^h bis 30. 7. 16^h, 1950
Lage der Meßstellen s. Tab. 1 und Abb. 2

etwa 10 bis 20 cm/sec, der Mittelstrom hielt sich mit etwa 30 bis 40 cm/sec in der Mitte. Von 13 Uhr bis gegen 20 Uhr begann die Oberflächengeschwindigkeit langsam wieder abzusinken bis etwa 20 cm/sec, Mittel- und Bodenstrom dagegen stiegen noch weiter an und erreichten ab 16 Uhr den Wert des Oberflächenstromes, um von da an mit ihm gleichzeitig langsam abzunehmen. In der Periode zwischen 20 Uhr und 2 Uhr (27. 7.) zeigte zeitweise der Bodenstrom höhere Werte als Oberfläche und Mitte. Von 2 bis 8 Uhr ging in allen Tiefen bei weiter abflauendem Wind die Geschwindigkeit auf 10 cm/sec und weniger zurück.

Die während dieser 24 Stunden in der Ostströmung aufgetretenen Richtungsschwankungen waren relativ geringfügig; die allgemeine Tendenz zeigte beim Oberflächenstrom die größte Südkomponente (im Mittel 110—120 Grad), beim Bodenstrom dagegen eine fast reine Ostrichtung (mit geringen nördlichen Komponenten, 80—90 Grad). Da die Richtung der benachbarten Küstenstrecke etwa 95 Grad betrug, bedeutet das, daß die Oberflächenströmung eine aufländige Komponente (Einfluß der Oberflächen-Winddrift), der Bodenstrom eine geringe abländige Komponente enthielt (Abfluß der oberflächlich angestauten Wassermassen).

Bei der zweiten Meßstelle R 3 (Abb. 9 B) vor der Mitte des Brodtener Ufers auf ebenfalls 5 m Wassertiefe (mit den gleichen Meßtiefen wie in der zeitlich vorangegangenen ebenfalls erwähnten Meßstelle R 2) herrschten wiederum frische nordwestliche Winde (mit Stärke 5—6 im Mittel). Der Stromgeschwindigkeitsverlauf war hier jedoch wesentlich ruhiger: an der Oberfläche wurden zwei Maxima von 25 bis 30 cm/sec, am Boden nur 10 bis 15 cm/sec beobachtet, dazwischen zeitweise fast Stromstille. Bei der Richtungsangabe ist deutlich zu erkennen, daß zu den Zeiten der Geschwindigkeitsmaxima (29. 7., 18—20 Uhr und 30. 7., 6—10 Uhr) die Stromrichtung in allen Tiefen parallel zur Küste und mit dem Winde nach Südosten (110—130 Grad) setzte; lediglich während des zweiten Maximums hatte der Bodenstrom eine abländige östlichere Komponente (90—110 Grad).

4. Strömungsverhältnisse in der Travemündung

Die Strömungsverhältnisse in der Travemündung und ihrer nächsten Umgebung nehmen eine Sonderstellung ein. Es ist nicht allein der Einfluß des Oberwassers der Trave, der dabei eine Rolle spielt; auch schnell wechselnde Spiegelgefälle, die zeitweise große Werte erreichen, tragen dazu bei.

Ein Längsschnitt des Salzgehalts verdeutlicht die starke Schichtung, die hier auftritt (Abb. 10). Dazu ist zu bemerken, daß die vertikale Salzgehaltszunahme nur unzureichend bei Beobachtungsabständen von 4 m erfaßt wird. Der Übergang von dem salzarmen Travewasser zu dem salzreichen Wasser aus der Lübecker Bucht, die hier übereinander liegen, dürfte im allgemeinen noch ausgeprägter sein.

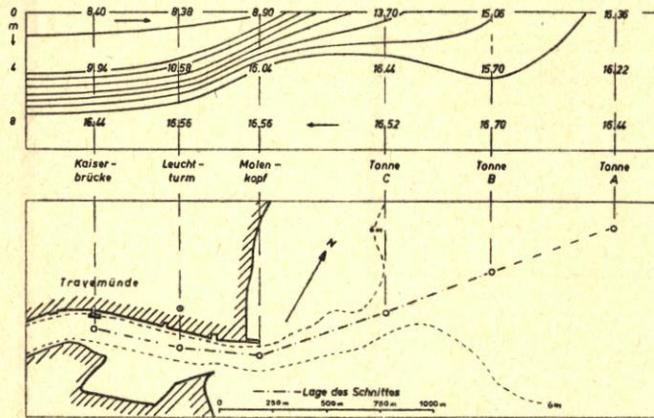


Abb. 10. Beispiel für die Salzgehaltsschichtung in der Travemündung (aufgenommen am 17. 2. 1950)

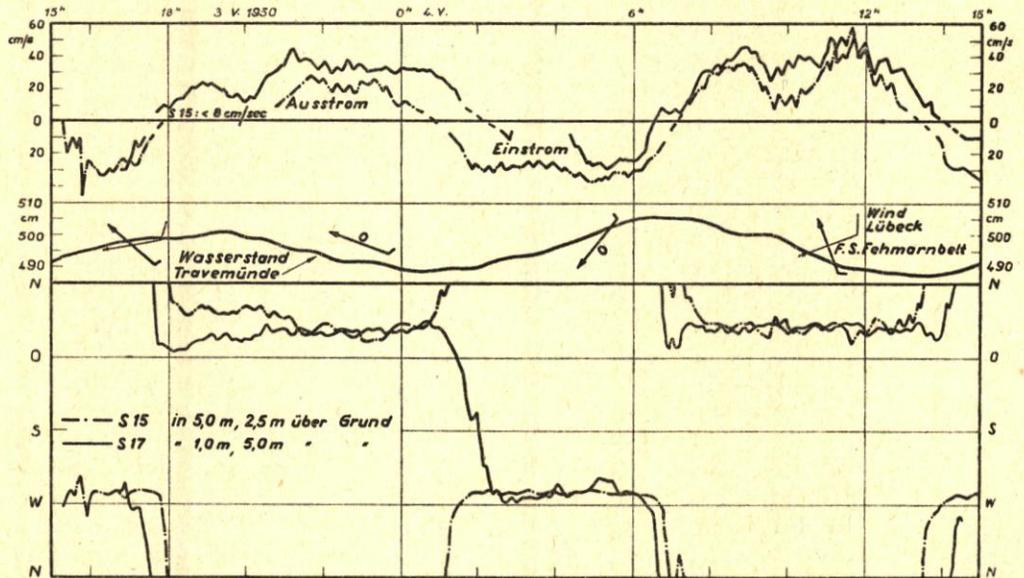


Abb. 11. Beispiel für den Strömungsverlauf nach Dauerstrommessungen mit Schaufelradstrommessern in der Travemündung in Oberflächennähe und in Bodennähe

Messstellen S 15 und S 17 vom 3. 5. 15^h bis 4. 5. 1950
Lage der Messstellen s. Tab. 1 und Abb. 2

Die Bedeutung der Gefällsströmungen in der Travemündung kommt in Abbildung 8 A und Abbildung 11 nach Dauerstrommessungen mit Schaufelradstrommessern zum Ausdruck. Die Messstellen S 6, S 15 und S 17 lagen in der engsten Stelle der Travemündung querab vom

neuen Lotsenhafen. Richtung und Geschwindigkeit wiesen einen regelmäßigen Wechsel von Ein- und Ausstrom mit Gezeitenstromcharakter auf. Diese Feststellung mag auf den ersten Blick überraschen, da die Gezeiten im ganzen Seegebiet der Ostsee verschwindend klein sind. Der mittlere Springtidenhub der Lübecker Bucht beträgt nur 11 cm. Die Wasserstandskurve von Travemünde ist in Abbildung 11 mit aufgenommen. Aber es bleibt zu beachten, daß die Travemündung nur einen geringen Querschnitt besitzt. Sie nimmt die Stellung einer Düse zwischen zwei Wasserbehältern ein, nämlich zwischen der Lübecker Bucht auf der einen Seite und den haffartigen Gebieten der Pötenitzer Wiek und des Dassower Sees sowie dem Unterlauf der Trave mit seinem Seencharakter auf der anderen Seite. Die Wasserstandsschwankungen gehen in erster Linie von der Lübecker Bucht aus, sei es in Form von Stauerscheinungen, Eigenschwingungen einzelner Seegebiete oder der ganzen Ostsee oder in Form von Gezeiten. Bei der Anpassung der Wasserstände der ausgedehnten inneren Gebiete an die der Lübecker Bucht müssen beträchtliche Wassermengen durch die Travemündung geschoben werden, die bei der Enge der Mündung zu erheblichen Geschwindigkeiten Anlaß geben. Spitzengeschwindigkeiten bis 95 cm/sec wurden gemessen (Abb. 8 A), zugleich die höchsten Werte, die während der ganzen Meßperiode festgestellt wurden. Diese Werte sind aber nicht allein durch die Gezeiten bewirkt, sondern hierbei sind noch Wasserstandsschwankungen anderer Natur beteiligt, worauf W. HANSEN (3) näher eingeht.

Verhältnismäßig rein kommt der Gezeitenstromcharakter der Bewegungen bei sehr ruhiger Wetterlage zum Ausdruck (Abb. 11). In dem Zeitabschnitt, der dargestellt ist, wurde mit zwei Schaufelradstrommessern gleichzeitig registriert, mit einem in Oberflächennähe, mit dem anderen in Bodennähe. Hiernach scheint in Oberflächennähe eine beständige Stromkomponente in Richtung des Ausstroms aus der Trave den Stromschwankungen überlagert zu sein. Sie betrug etwa 10 bis 20 cm/sec und läßt sich als Oberwasser der Trave deuten. Kurze Schwankungen traten außerdem in den Strömungen auf, die im Wasserstand nicht spürbar waren. Die Reaktionen der Wasserbewegungen auf Schwankungen des Spiegelgefälles sind eben viel eher meßbar als das Gefälle selbst.

5. Zusammenfassung und Bemerkungen zu den Strömungsverhältnissen innerhalb der Brandungszone

Eine Wiedergabe und eine Diskussion der gesamten Meßergebnisse ist aus Raumgründen nicht möglich. Sie sind im vorliegenden Fall auch entbehrlich, da es vor allem galt, einen Überblick über die stärkeren Strömungen zu bekommen, um beurteilen zu können, wie weit ihnen erodierende und wie weit ihnen transportierende Kräfte zugeschrieben werden können. Die vorliegende Auswahl beschränkt sich vor allem auf anhaltende östliche und westliche Winde mit höheren Windstärken. Das mag einseitig erscheinen, ermöglicht aber die Verhältnisse bei auflandigen und ablandigen Winden zu übersehen, d. h. gewissermaßen in den Grenzfällen. Dazwischen liegen vielerlei Übergänge und lokale Abwandlungen in den Strömungsverhältnissen, die unter anderen äußeren Bedingungen auftreten können.

Bei östlichen Winden überwiegt an der Oberfläche Einstrom für den größten Teil der Bucht. Nur auf der Südseite von der inneren Neustädter Bucht längs des Brodtener Ufers und der Mecklenburger Küste herrscht Ausstrom in östliche Richtung vor. Dieser Ausstrom überquert zum großen Teil die Travemünder Bucht an ihrer Öffnung, ohne bis zur Travemündung vorzudringen. Im Verhältnis zu anderen Windlagen gesehen, erreichen die Stromgeschwindigkeiten nach Dauerstrommessungen in Küstennähe außerhalb der Brandungszone ihre Höchstwerte im allgemeinen bei östlichen Winden.

Bei westlichen Winden, wenn sie lange genug wehen, so daß sich angenähert stationäre Verhältnisse einstellen können, überwiegt auf allen Meßstellen in Oberflächennähe außerhalb der Travemündung Ausstrom in östlichen Richtungen, bei Pelzerhaken sowohl wie am Brodtener Ufer. Die abtransportierten Wassermassen werden durch Kompensationsbewegungen in der Tiefe ergänzt. Die starke Stromschichtung besonders bei westlichen Winden nach den

Beobachtungen mit dem Bifilar-Strommesser, der Auftrieb des kalten, salzreichen Wassers in der inneren Neustädter Bucht und die Ergebnisse der Dauerstrommessungen in der Öffnung der Lübecker Bucht zur Mecklenburger Bucht beweisen dies. Die Stromgeschwindigkeiten bei westlichen Winden bleiben selbst bei Sturm auf allen Meßstellen wesentlich kleiner als bei frischen östlichen Winden.

In der engen Travemündung treten starke Stromschwankungen auf. Geringe Wasserstandsschwankungen der Lübecker Bucht, die regelmäßig mit den Gezeiten, mit den Eigenschwingungen einzelner Meeresgebiete und mit dem wechselnden Windstau verbunden sind, reichen aus, kräftige Ausgleichsströmungen mit den ausgedehnten Seen oberhalb der Travemündung einzuleiten.

Die Tabelle 2 enthält die beobachteten Spitzengeschwindigkeiten und die dabei auftretenden Richtungen.

Tabelle 2
Beobachtete Spitzengeschwindigkeiten auf den Meßstellen
in der Lübecker Bucht

S: Schaufelradstrommessungen

R: Messungen mit dem Rauschelbach-Strommesser vom „Südfall“

| Gebiet und Meßstelle | v_{\max} cm/sec | Meßtiefe üb. Grund in m | Bem. z. Stromrichtung bei Spitzen |
|-----------------------------|----------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| Travemündung | | | |
| S 6 | 95 | 3 | Ein- und Ausstrom |
| S 15 | 60 | 2,5 | " " " |
| S 16 | 60 | 5 | " " " |
| Travemünder Bucht | | | |
| S 14 | 25 | 3 | O—SO |
| R 4 | 25 | 1 | NO |
| R 1 | 15 | 1 → Obfl. | SW |
| Stein-Riff | | | |
| S 10 | 40 | 3 | SO |
| R 3 | 15 (30) | 1 (Obfl.) | SO |
| S 11 + S 13 | 45 | 3 | O, selten SW |
| R 2 | 30 (60) | 1 (Obfl.) | O |
| Pelzerhaken | | | |
| S 12 | 45 | 3 | SW, auch NO |
| R 5a | 20 (40) | 1 (Obfl.) | SW |
| Mitte Lübecker Bucht | | | |
| S 8 | 40 | 17,5 | (NW, veränderlich) |
| S 7 | <11 | 3 | ONO und W |

Die Werte unterliegen natürlich ganz den Zufälligkeiten der Beobachtungszeit und sind daher nicht allgemein gültig. Aber die Zeiträume der Dauermessungen über mehrere Wochen mit verschiedenen Sturmlagen geben doch einen wichtigen Anhalt. In Bodennähe bis zu Tiefen von 10 bis 15 m, aber außerhalb der Brandungszone, dürften unter Berücksichtigung der Geschwindigkeitsabnahme zwischen 3 m über Grund und dem Boden die Strömungen nur in seltenen Fällen und dann nur kurzfristig 30 cm/sec überschreiten. Ausgenommen davon ist die Travemündung an ihrer engsten Stelle, in der wesentlich höhere Geschwindigkeiten auftreten.

Zieht man die Ergebnisse neuerer Untersuchungen über die Erosionsfähigkeit strömenden Wassers heran (F. HJULSTRÖM [4]), so ergibt sich daraus, daß wenigstens 25 cm/sec bei einem Korndurchmesser von 0,5 mm notwendig sind, um den Boden anzugreifen. Mit kleineren und größeren Korndurchmessern steigen die Grenzgeschwindigkeiten an, und zwar auf 50 cm/sec

bei Korndurchmessern von 0,03 mm bzw. 2,5 mm. Die Strömungen in der Lübecker Bucht werden demnach nur selten und dann nur in geringen Tiefen schwach aktiv in die Erosion eingreifen. Entscheidend hierfür sind die Vorgänge innerhalb der Brandungszone. Den Strömungen außerhalb kommt fast ausschließlich nur Bedeutung für den Transport der Schwebstoffe zu, die in der Brandungszone vom Wasser aufgenommen worden sind. Als morphologisch wirksam müssen die wechselnden, aber zeitweise starken Strömungen in der Travenmündung angesehen werden. Sie dürften zu der natürlichen Offenhaltung des Fahrwassers entscheidend beitragen.

Wenn auch mit den verfügbaren Geräten keine Messungen der Wasserbewegungen in der Brandungszone vorgenommen werden konnten, so erlauben doch einige grundsätzliche Untersuchungen dieses Problems, die in letzter Zeit in den USA durchgeführt wurden, einige Rückschlüsse auf die Vorgänge in der Lübecker Bucht. Zusammenfassend läßt sich aus den mannigfaltigen Teilergebnissen, die aus Messungen an der kalifornischen Küste, aus Modellversuchen in dortigen Laboratorien und aus energetischen und hydrodynamischen Überlegungen gewonnen wurden (J. A. PUTNAM, W. H. MUNK, M. A. TRAYLOR [8]; W. H. MUNK [6, 7]; F. P. SHEPARD, D. L. IMMAN [11]; TH. SAVILLE [10]), folgender Überblick geben: Die auflaufenden Seegangs- und Dünungswellen, besonders die überbrechenden Brandungswellen sind mit einem landwärts gerichteten Wassertransport verbunden. Damit führen sie zu einem Anstau des Wassers, der zur Entstehung einer seewärts gerichteten Brandungsrückströmung beiträgt. Als Unterströmung ist sie wohl bekannt. Sie verteilt sich an offenen Küsten verhältnismäßig gleichmäßig längs der Uferzone, kann aber auch zusätzlich streifenförmig gebündelt auftreten (*rip current*). Außerdem ist zu beachten, daß bei auflaufenden Brandungswellen, deren Käme einen Winkel mit der Küstenlinie bilden, nicht sämtliche Energie in den Brechern vernichtet bzw. an den Küsten reflektiert wird, sondern daß ein Teil in die Bewegungsenergie einer küstenparallelen Brandungslängsströmung (*longshore current*) übergeführt wird. Diese Längsströmung erreicht beachtliche Geschwindigkeiten und ist daher entscheidend für den Sandtransport und damit für die Strandversetzung.

Unter der Annahme einer geradlinigen Küste, einer gleichmäßigen Bodenneigung und von langgestreckten Kämmen der auflaufenden Wellen geben J. A. PUTNAM, W. H. MUNK und M. A. TRAYLOR (8) folgende Beziehung für die Geschwindigkeit v der Brandungslängsströmung an:

$$v = K \sqrt[3]{\frac{m \cdot H^2}{T} \sin 2\alpha},$$

Darin bedeuten H und T Höhe und Periode der brandenden Welle, m das Gefälle des Bodens in der Brandungszone, α den Winkel der Brandungswellen mit der geradlinigen Küste und K einen Reibungsbeiwert, der von der Bodenrauigkeit abhängt. Die vier Größen unter der Wurzel sind meßbar; K stellt einen Beiwert dar, der unter gegebenen Strandverhältnissen angenähert konstant ist.

In der Lübecker Bucht sind die Voraussetzungen für eine Anwendung der angeführten Beziehung nicht ausreichend erfüllt, um zuverlässige Angaben über die Geschwindigkeiten der Brandungslängsströmung machen zu können. Es ist noch eine wesentliche Vertiefung unserer Kenntnisse von den Vorgängen in der Brandungszone notwendig. Es läßt sich lediglich eine rohe Überschlagsrechnung anstellen, um eine Vorstellung über die Größenordnung der küstenparallelen Brandungslängsströmung zu vermitteln. Nach umfangreichen Seegangsmessungen auf dem Feuerschiff Fehmarnbelt von H. BRAUER (1) ist bei Windstärke 7 die Wellenhöhe $H = 1.4$ m, dazu gehört die Wellenperiode $T = 4.5$ sec; die Strandneigung wird mit 0.03 angesetzt, $\alpha = 10$ Grad angenommen; $K = 8.0$ gilt angenähert für Sandstrand. Daraus ergibt sich $v = 1.3$ m/sec. Das ist ein Vielfaches der gemessenen Stromgeschwindigkeiten außerhalb der Brandungszone bei Sturm. Die Richtung der Brandungslängsströmung ist durch die Fortpflanzungsrichtung der Wellen bestimmt. Sie verläuft in Richtung auf die Öffnung des spitzen Winkels, den die Kammlinie der Wellen und die Strandlinie einschließen.

In einer Hinsicht sind die Verhältnisse in der Brandungslängsströmung in der Lübecker Bucht einfach. Dies gibt Veranlassung dazu, trotz der Bedenken gegen die Anwendung der Ergebnisse, die unter sehr vereinfachenden Voraussetzungen in neuester Zeit gewonnen wurden, gewisse Folgerungen zu ziehen. Hohe Brandungswellen und damit große Geschwindigkeiten der Brandungslängsströmung können in der Lübecker Bucht nur bei einer Hauptwindrichtung auftreten, nämlich bei NO, wenn Seegang und Dünung der freien Ostsee und der Mecklenburger Bucht Zutritt in die Lübecker Bucht haben. Die Wellenkämme sind angenähert quer zur Windrichtung angeordnet. Zwar erfahren die Wellen bei abnehmender Tiefe eine Beugung zum Strande hin, solange aber die unbeeinflussten Kämme nicht zufällig schon in offener See küstenparallel waren, bleibt trotz der Beugung ein gewisser Winkel zwischen dem Kamm der Brandungswelle und der Küstenlinie erhalten. Legt man diese einfachen Zusammenhänge zugrunde, so läßt sich schematisch die Verteilung der Richtung der Brandungslängsströmung angeben, und zwar für den Fall der hier für hohe Stromgeschwindigkeiten entscheidenden

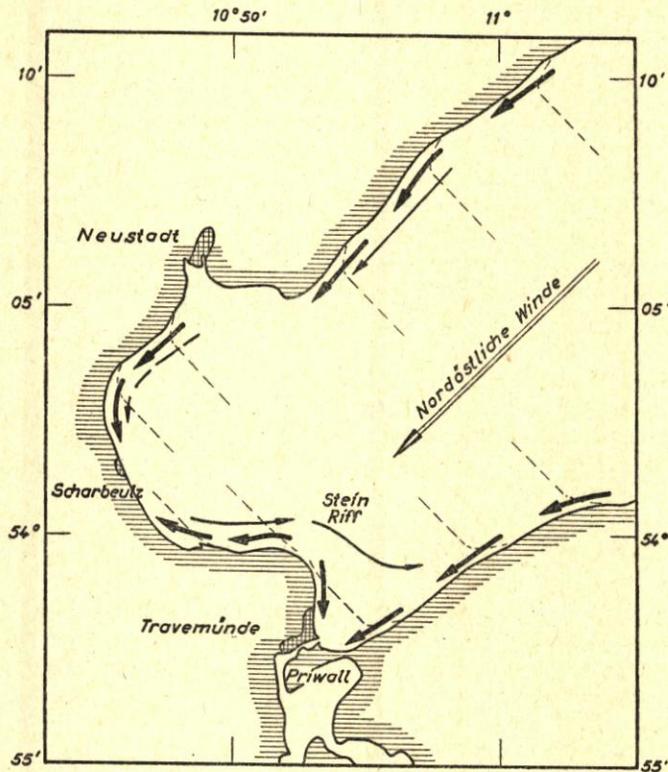


Abb. 12. Überblick über die vorherrschende Richtung der bodennahen Strömungen in Strandnähe der Lübecker Bucht bei nordöstlichen Winden

- ← Brandungslängsströmung
- ← Küstenströmung außerhalb der Brandungszone
- Wellenkämme, schematisch

Nordostwinde. Die vorherrschenden Richtungen der küstennahen Strömung außerhalb der Brandungszone für Nordostwindlagen sind nach den oben besprochenen Strommessungen übersehbar. Beide sind schematisch in Abbildung 12 zusammengefaßt. Es ergeben sich zwei Konvergenzen der Brandungslängsströmung, eine in der Neustädter Bucht in der Gegend von Scharbeutz, die andere in der Travemünder Bucht vor dem Priwall, ferner eine Divergenz auf dem Stein-Riff. Indem die küstennahe Strömung bei Nordostwinden bevorzugt die Bucht

entgegen dem Uhrzeigersinn umläuft, wirkt sie zum Teil in derselben Richtung wie die Brandungslängsströmung, zum Teil auch entgegen. In der Travemünder Bucht überquert sie die Bucht, ohne bis zum Travemünder Strand nach Süden vorzudringen.

Bei anderen Windrichtungen werden sich andere Richtungen in der Brandungslängsströmung ausbilden, deren Geschwindigkeiten aber verhältnismäßig gering bleiben müssen. Teils sind die Winde ablandig, dann tritt kein nennenswerter Seegang auf, teils haben sie zwar eine auflandige Komponente, aber dieser fehlt es an genügendem Seeraum zur vollen Ausbildung des Seegangs und zur Entwicklung einer Dünung. Einzig bei nordöstlichen Winden können größere Wellenhöhen erreicht werden, die die Voraussetzung von stärkeren Brandungslängsströmungen sind. Das schematische Strombild in Abbildung 12 stellt nicht den häufigsten Fall dar — anhaltende nordöstliche Winde sind verhältnismäßig selten. Es gibt auch keine Geschwindigkeiten der Strömungen an; dafür fehlen die Beobachtungsgrundlagen. Es gilt aber für diejenige Windlage, bei der im Vergleich zu allen anderen bei gleicher Windstärke die höchsten Stromgeschwindigkeiten zu erwarten sind, in der Brandungslängsströmung sowohl als auch in der küstennahen Strömung außerhalb der Brandungszone. Von dieser skizzierten Lage ist anzunehmen, daß sie sich entscheidend für die vorherrschende Richtung des Materialtransportes auswirkt. Ihre Bedeutung für morphologische Vorgänge bleibt aber auf einen verhältnismäßig schmalen Küstenstreifen beschränkt, dessen Wassertiefen kleiner als 10 bis 15 m sind.

Schriftenverzeichnis

1. BRAUER, H.: Messungen und Beobachtungen des Seegangs beim Feuerschiff Fehmarnbelt. Deutsche Luftfahrtforschung. Mitt. Nr. 579. 1939.
2. DIETRICH, G.: Oberflächenströmungen im Kattegat, im Sund und in der Beltsee. Dtsch. Hydr. Z., Bd. 4, S. 129—150. 1951.
3. HANSEN, W.: Hydrographische Untersuchungen in der Lübecker Bucht. Die Küste, H. 2, S. 90, 1952.
4. HJULSTRÖM, F.: Transportation of detritus by moving waters. In P. D. Trask: Recent marine sediments. Amer. Assoc. Petrol. Geol., S. 5—31. 1939.
5. JOSEPH, J.: Meereskundliche Meßgeräte. Naturforschung und Medizin in Deutschland 1939—46 (Fiat-Berichte), Geophysik, Teil II, S. 178—214. 1948.
6. MUNK, W. H.: The solitary wave theory and its application to surf problems. New York Acad. Sci. Vol. 51, S. 376—424. 1949.
7. MUNK, W. H.: Surf beats. Transac. Amer. Geophys. Un. Vol. 30, S. 849—854. 1949.
8. PUTNAM, J. A., W. H. MUNK, M. A. TRAYLOR: The prediction of longshore currents. Transac. Amer. Geophys. Un. Vol. 30, S. 337—345. 1949.
9. RAUSCHELBACH, H.: Beschreibung eines bifilar aufgehängten, an Bord elektrisch registrierenden Strommessers. Ann. Hydr. u. marit. Met., März-Beiheft 1929.
10. SAVILLE, TH.: Model study of sand transport along an infinitely long, straight beach. Transac. Amer. Geophys. Un. Vol. 31, S. 555—565. 1950.
11. SHEPARD, F. P., D. L. INMAN: Nearshore water circulation related to bottom topography and wave refraction. Transac. Amer. Geophys. Un. Vol. 31, S. 196—212. 1950.