Zur Frage der Zirkulation in der Kieler Bucht.

Von Rolf MACHENS, Kiel

(Mit 1 Textabbildung)

1. Einleitung

Die Stromverhältnisse im Übergangsgebiet zwischen Nord- und Ostsee sind vielfachen Schwankungen unterworfen. Nicht nur der mittlere Strömungszustand verändert sich infolge der klimatischen Einflüsse, sondern die Beobachtung ergibt auch starke, kurzfristige Schwankungen, die in der Regel so groß sind, daß sie den durchschnittlichen Zustand fast völlig überdecken. Ihre Ursache liegt in dem Einfluß des Windes, der Trift- und Stauströme hervorruft.

Das Gebiet aber, über dem der Wind für die Zirkulation des Übergangsgebiets Bedeutung gewinnt, ist sehr groß, denn es erstreckt sich vom Kattegat bis in die östliche Ostsee. Es bereitet daher die Erfassung und Darstellung seines Einflusses Schwierigkeiten. MANEGOLD (1936) wählt zu seiner Charakterisierung den komplexen Begriff der Großwetterlage und WATTENBERG (1941) den großräumigen Luftdruckgradienten Helsingfors — Berlin. Auf diese Weise lassen sich die Wirkung von Wind und Luftdruck auf den hydrographischen Zustand des Übergangsgebietes zeigen, und die Begriffe der Ein- und Ausstromlage meteorologisch begründen.

Die Kieler Bucht nimmt innerhalb des Übergangsgebietes eine Sonderstellung ein, die aus ihrer Lage zu den eigentlichen Verbindungswegen folgt. Das Verhältnis der engsten Querschnitte des Kleinen und des Großen Belts ist nach WATTENBERG 1 : 13. Der Kleine Belt ist daher für den Wasseraustausch von untergeordneter Bedeutung. Dieser spielt sich im wesentlichen nur durch die Nordostecke der Bucht zwischen dem Großen Belt und dem Fehmarn Belt ab. Auch die Tatsache, daß die Hauptrichtungen beider Meeresstraßen fast senkrecht aufeinander stehen, kann nicht ohne Bedeutung für die Zirkulation innerhalb der Bucht sein. Denn dadurch begünstigt, lösen sich beträchtliche Teile der durch die Belte strömenden Wassermassen vom Hauptstrom ab und wandern mit frontartigen Begrenzungen durch die Kieler Bucht, wie WATTENBERG in einer hinterlassenen, noch nicht veröffentlichten Arbeit zeigt. Die aus dem engen Bett der Belte entlassenen Wassermassen unterliegen nun aber viel stärker dem Einfluß des örtlichen Windes, dessen Veränderlichkeit sich auf ihre Bewegung überträgt.

Gestaltet das Klima durch den Niederschlagsüberschuß der Ostsee den mittleren Grundzustand der Strömung in den Belten, dem die Großwetterlage durch die großräumige Windverteilung über den Nachbargebieten der Beltsee die Ein- und Ausstromlagen überlagert, so greift innerhalb der Kieler Bucht darüber hinaus noch der vom örtlichen Wetter abhängige Wind wesentlich in das Zirkulationssystem ein.

Dieser vielfachen, veränderlichen Einflüsse wegen widersetzt sich das Strombeobachtungsmaterial der Kieler Bucht ganz besonders einer Bearbeitung, die ein geschlossenes und anschauliches Bild ihrer Strömungen vermitteln kann. Als erster versucht KOHLMANN (1905) die Oberflächenströmungen darzustellen. Dabei findet er, daß dem Einstrom durch den Großen Belt ein Wirbel mit westlicher Strömung im Süden der Bucht zugeordnet ist, und bei Ausstrom die umgekehrten Verhältnisse gelten. Aber er stellt auch Stromverteilungen mit gleichsinniger Wasserbewegung in der ganzen Bucht fest. Die Kennzeichnung der wesentlichlichsten Lagen, ihrer Häufigkeit und Bedeutung gelingt KOHLMANN jedoch nicht. Eine spätere Arbeit von LANGLOFF (1913) befaßt sich mit den Ursachen der Meeresströmungen in der Kieler Bucht. In ihr wird versucht, die statistischen Zusammenhänge zwischen Strom und Wind zu erfassen, ohne daß dabei die Arbeit KOHLMANN's, der bereits der sypnoptische Gedanke zugrunde liegt, fortgesetzt wird. Von der sypnoptischen Betrachtungsweise ausgehend, wird nun der Versuch gemacht, für die Kieler Bucht typische Zirkulationsverhältnisse abzuleiten und ihre Bedeutung für den Wasseraustausch anzudeuten.

2. *Das Beobachtungsmaterial und seine Bearbeitung.*

Die Grundlage bilden die Strombeobachtungen folgender Ostseeunternehmungen der DEUTSCHEN SEEWARTE[1]):

1.	30. 6. — 14. 7. 1936	= 14 Tage	= insgesamt 59 Tage
2.	20. 4. — 5. 5. 1937	= 15 Tage	
3	27. 7. — 11. 8. 1937	= 15 Tage	
4.	1. 12. — 16. 12. 1937	= 15 Tage	

Von allen Unternehmungen liegen stündliche Strombeobachtungen in 5 m-Tiefenstufen von der Oberfläche bis 25 m Tiefe (= Bodennähe) auf den Stationen

Feuerschiff Fehmarn Belt 54°35.9' N 11° 9,5' E

Südausgang Großer Belt 54°41,5' N 10°45,1' E

und bei der ersten Unternehmung noch auf der Station

Südausgang Kleiner Belt 54°47' N 10°15' E

vor. Als Ergänzung sind außerdem noch die 4-stündlichen Oberflächenstrombeobachtungen der Feuerschiffe Kiel und Flensburg dieser Zeiträume mit herangezogen, so daß insgesamt synoptische Beobachtungen von 5 Punkten der Kieler Bucht zur Verfügung stehen. Zur Beurteilung der Oberflächenenströmungen zwischen Kiel und Fehmarn Belt sind ferner einige Schätzungen des Oberflächenstroms nach dem Kielwasser der Wegetonnen verwertet, die auf den Fahrten des F.K. „SÜDFALL" gesammelt sind.

Betrachtet man den zeitlichen Verlauf der Stromrichtung südlich des Großen Belt, dann zeigt sich, daß über Zeiträume von einigen Tagen die Stromrichtung an der Oberfläche und in der Tiefe innerhalb gewisser Schwankungen gleich bleibt. Mit allerdings größerer Unbeständigkeit infolge des überwiegenden Einflusses der Windtrift lassen auch die Beobachtungen im Westen der Bucht dasselbe erkennen, während bei Feuerschiff Fehmarn Belt die Schwankungen geringer sind. Da südlich des Großen Belt die Windtrift über der Kieler Bucht einerseits und die Wasserversetzung durch die Belte andrerseits in etwa gleicher Stärke den Strömungszustand bestimmen, sind diese Beobachtungen für eine Einteilung des gesamten Materials in Zeiträume annähernd gleichbleibender Zirkulation innerhalb der ganzen Kieler Bucht besonders geeignet. Auf diese Weise läßt sich das Material in verschieden lange Zeiträume aufteilen und nach charakteristischen Merkmalen der Strömung südlich des Großen Belt zu vier verschiedenen Zirkulationstypen zusammenfassen. Die Beobachtungen zwischen zwei aufeinander folgenden Strömungszuständen bleiben dabei der Unbeständigkeit wegen unberücksichtigt. Zur Kennzeichnung der gleichzeitigen Wetterlagen ist die häufigste Windrichtung und Windstärke nach den Beobachtungen auf Feuerschiff Kiel, die als repräsentativ für die ganze Bucht angesehen werden, mit angegeben. Das Ergebnis der Einteilung ist in folgender Tabelle zusammengestellt:

[1]) Für deren Überlassung ich dem DEUTSCHEN HYDROGRAPHISCHEN INSTITUT an dieser Stelle danken möchte.

Die Zeiträume mit annähernd gleichbleibender Zirkulation innerhalb der Kieler Bucht
nach Beobachtungen der Deutschen Seewarte in den Jahren 1936—37.

Zirkulation südlich des Großen B.	Anfang Ende	Dauer Tage	Mittlere Dauer Tage	Prozent aller Beobacht.	Häufigste Windrichtung u. Stärke bei F.S. Kiel
Einstrom in allen Tiefen	5. 7. 36 00 — 7. 7. 06	2,2	4,1	21	W und NW, 3—4
	21. 4. 37 22 — 28. 4. 20	6,9			
	27. 7. 37 8 — 30. 7. 12	3,2			
Ausstrom in allen Tiefen	1. 8. 37 16 — 9. 8. 3	7,5	7,4	25	E 2—3
	3. 12. 37 6 — 10. 12. 14	7,3			
Ausstrom nach NW a. d. Oberfläche,	30. 6. 36 23 — 2. 7. 3	1,2	1,8	9	SE 2
Einstrom in der Tiefe	2. 7. 36 18 — 4. 7. 12	1,8			
	13. 12. 37 20 — 16. 12. 7	2,5			
Ausstrom nach NE a. d. Oberfläche	8. 7. 36 5 — 12. 7. 19	4,6	2,8	15	SW 2—3
	3. 5. 37 1 — 5. 5. 8	2,3			
	12. 12. 37 4 — 13. 12. 19	1,6			
unbeständig			1,1	30	SW—W, 2—4

Die vorliegenden Beobachtungen umfassen nur 59 Tage. Es können aber Ergebnisse aus ihm nur verallgemeinert werden, wenn der Witterungsverlauf nicht systematisch vom Durchschnitt langer Zeiträume abweicht. Zum Vergleich wird die Zusammenstellung der Windverhältnisse bei Feuerschiff Adlergrund von NEUMANN (1936) herangezogen, die die Jahre 1924—32 umfaßt:

Häufigkeitsverteilung der Windrichtung und Windstärke auf F.S. Kiel z. Zt. der Strombeobachtungen und auf Feuerschiff Adlergrund in den Jahren 1924—32 (nach NEUMANN).

Windrichtung Windstärke	Häufigkeit auf Feuerschiff Kiel während ausgewählten (1)	nicht berücksichtigten Beobachtungen (2)	den allen (3)	Häufigkeit auf F.S. Adlergrund 1924—32 (4)
N	6	3	9	7
NE	6	1	7	8
E	15	0	15	12
SE	13	2	15	11
S	4	4	8	12
SW	7	7	14	15
W	10	9	19	21
NW	9	4	13	14
	70%	30%	100%	100%
0	4	3	7	5
1	7	4	11	16
2	19	7	26	17
3	16	4	20	19
4	11	6	17	16
5	8	5	13	11
6	2	1	3	8
7	2	—	2	5
8	1	—	1	2
9	—	—	—	1
	70%	30%	100%	100%

Der Vergleich der Spalten 3 und 4 zeigt, daß die Windverhältnisse in dem kurzen Zeitraum der Strombeobachtungen verhältnismäßig gut die langfristige Häufigkeitsverteilung wiederspiegeln. Es kann daher das Beobachtungsmaterial auch für den durchschnittlichen Witterungsverlauf als annähernd repräsentativ angesehen werden. Durch die Auswahl der Zirkulationstypen (vgl. Spalte 1 und 2) tritt aber eine systematische Verringerung der westlichen Windrichtungen auf etwa die Hälfte ihrer ursprünglichen Häufigkeit ein, während die östlichen kaum geschwächt wurden. Das bedeutet, daß nur etwa die Hälfte der Beobachtungen bei Winden mit Westkomponente sich unter den Zirkulationstypen einordnen lassen, während bei den beständigeren östlichen Winden in der Regel eine länger anhaltende gleichförmige Zirkulation vorherrscht. Ferner scheinen auch die stärker durch die Auswahl reduzierten hohen Windstärken die Entstehung eines Zirkulationstyps zu hindern.

Die mittleren Ströme der einzelnen Zirkulationstypen sind graphisch bestimmt. Dabei wird gleichzeitig ein Maß für die mittleren Abweichungen der Einzelbeobachtungen vom Mittelwert im Sinne THORADEs (1936) erhalten. THORADE gelangt unter Anwendung der Fehlertheorie auf Vektoren, deren Richtungen und Beträge um einen Mittelwert nach der Gausschen Fehlerfunktion schwanken, zur Definition des „Streuhalbmessers", der den Radius des Kreises um den Endpunkt des mittleren Vektors darstellt, in den etwa 64 % aller Beobachtungen fallen. Er entspricht damit dem „mittleren Fehler" der Einzelbeobachtungen des Mittelwerts einer skalaren Größe. Mittelwert und Streuhalbmesser ergeben sich auf folgende Weise: In ein Koordinatensystem werden die Endpunkte aller zu mittelnden Stromvektoren eingetragen. Parallel zu einer beliebigen Richtung werden von außen her an beiden Seiten der Punktwolke je 10 % aller Punkte (Rest = 80 %) und in dem verbleibenden Streifen an jedem Ende senkrecht zur ursprünglichen Richtung 8 % abgetrennt. Das so entstandene Rechteck enthält noch 64 % aller Beobachtungen, was mit großer Annäherung auch für den flächengleichen Kreis um seinen Mittelpunkt gilt. Sein Radius ist der Streuhalbmesser, sein Mittelpunkt der Endpunkt des mittleren Stromvektors. Um einen Vergleich der g r a p h i s c h bestimmten mit den exakt b e r e c h n e t e n Werten durchführen zu können, ist das von THORADE berechnete Beispiel zugrunde gelegt.

Die Einengung der Punktwolke erfolgt einmal parallel zu den Koordinaten, einmal unter einem Winkel von 30° dagegen. Das Ergebnis zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit der Rechnung:

Methode	Mittelwert Betrag	Mittelwert Richtung	Streuhalbmesser
Berechnung THORADEs	14,5 cm/s	294°	3,76 cm/s
Graphische Bestimmung	1) 14,5 cm/s	296°	3,7 cm/s
	2) 14,5 cm/s	294°	3,6 cm/s

Die bisher in der Ozeanographie üblichen Angaben für die Unsicherheit eines mittleren Stromvektors sind keine absoluten Streumaße. Denn die von A. WEGENER in Anlehnung an das Verfahren des KON. NED. MET. INST. vorgeschlagene

$$\text{Beständigkeit} = \frac{\text{Mittelwert der Einzelbeträge}}{\text{Betrag des mittleren Vektors}}$$

wie auch die von A. SCHUMACHER (1940) eingeführten Begriffe sind von dem Betrag des Mittelwerts abhängig. SCHUMACHER bezeichnet eine

Strömung als	wenn innerhalb eines Winkels von 45°	und innerhalb eines Winkels von 90°
sehr beständig	über 2/3	über 2/3
beständig	über 1/2	über 2/3
ziemlich beständig	über 1/3	über 1/2
unbeständig	unter 1/3	über 1/3

aller Beobachtungen liegen.

Für die hier durchgeführten Mittelwertsbildungen wird als relatives Maß der Unsicherheit die

$$\text{„Streuung"} = \frac{\text{Streuhalbmesser}}{\text{Betrag des mittleren Vektors}}$$

verwendet. Das Beispiel THORADEs dient wieder zum Vergleich der verschiedenen Methoden.

Das Ergebnis ist folgendes:

Die Beziehung zwischen „Beständigkeit" und „Streuung" in dem Beispiel THORADEs.

Beständigkeit nach A. WEGENER	Beständigkeit nach SCHUMACHER	„Streuung"
98%	sehr beständig	1/3
95%	sehr beständig	1/2
78%	beständig	1
53%	ziemlich beständig	2
29%	unbeständig	4
21%	unbeständig	6

Die „Streuung" ergibt demnach eine gute numerische Darstellung der Beständigkeit nach SCHUMACHER, zumal der Grundbegriff „beständig" der „Streuung" = 1 zugeordnet ist. Kleinere Abweichungen ergibt die Rechnung für die Streuung 2, bei der nur 26 % statt der für ziemlich beständige Strömung geforderten 33 % aller Beobachtungen innerhalb 45° liegen, und für die Streuung 6, wo mit 30 % innerhalb 90° gerade die untere Grenze der Unbeständigkeit unterschritten wird.

In den folgenden Tabellen ist das Ergebnis der geschilderten Bearbeitung des Materials zusammengestellt. Beide Zeiträume, in denen südlich des Großen Belt Ausstrom in allen Tiefen herrscht, fallen in die Beobachtungszeiten, bei denen vor dem Südausgang des Kleinen Belts keine Strommessungen durchgeführt sind. Es können daher bei diesem Zirkulationstyp keine Werte für den Kleinen Belt angegeben werden. In der Zusammenstellung der mittleren Ströme in allen Tiefen ist die ungefähre Lage der Übergangsschicht zwischen der Ober- und Unterströmung durch Querstriche gekennzeichnet, bzw. eingeschlossen.

Richtung und Stärke (cm/s) des mittleren Stroms bis 25 m Tiefe bei typischen Zirkulationsverhältnissen in der Kieler Bucht

nach ausgewählten Beobachtungen der Ostseeunternehmungen der Deutschen Seewarte und der Deutschen Feuerschiffe in den Jahren 1936/37.

Station und Tiefe (m)		Zirkulation südlich des Großen Belt: Einstrom in allen Tiefen	Ausstrom in allen Tiefen	Ausstrom n. NW a. d. Oberfläche Einstrom i. d. Tiefe	Ausstrom n. NE a. d. Oberfläche
Großer	0	167 / 38	310 / 34	302 / 20	48 / 24
Belt	5	178 / 33	325 / 27	288 / 18	56 / 20
	10	184 / 26	329 / 22	262 / 13	70 / 12
	15	179 / 29	330 / 16	220 / 25	220 / 11
	20	180 / 20	355 / 10	180 / 23	210 / 19
	25	172 / 18	12 / 8	175 / 16	182 / 18
Fehmarn	0	96 / 51	300 / 65	300 / 34	308 / 36
Belt	5	92 / 49	305 / 60	295 / 32	292 / 34
	10	83 / 41	311 / 36	293 / 26	287 / 28
	15	92 / 24	310 / 20	289 / 12	280 / 20
	20	105 / 14	260 / 8	125 / 8	150 / 5
	25	110 / 8	270 / 3	110 / 5	130 / 2
Kleiner	0	330 / 3	—	25 / 11	42 / 10
Belt	5	355 / 5	—	40 / 11	50 / 9
	10	325 / 6	—	5 / 7	50 / 7
	15	235 / 5	—	160 / 5	20 / 6
	20	330 / 4	—	185 / 3	320 / 6
	25	360 / 4	—	60 / 3	160 / 2
F. S. Flensburg	0	135 / 2	290 / 7	342 / 10	360 / 8
F. S. Kiel	0	160 / 8	300 / 18	310 / 9	16 / 10

Größte (1) und mittlere (2) Stromstärken, Streuhalbmesser (3) und Streuung (4) bei typischen Zirkulationsverhältnissen in der Kieler Bucht (cm/s)

nach ausgewählten Beobachtungen der Ostseeunternehmungen der Deutschen Seewarte und der Deutschen Feuerschiffe in den Jahren 1936/37.

Station		Zirkulation südlich des Großen Belt: Einstrom in allen Tiefen		Ausstrom in allen Tiefen		Ausstrom n. NW a. d. Oberfläche Einstrom i. d. Tiefe		Ausstrom n. NE a. d. Oberfläche	
		0 m	25 m	0 m	25 m	0 m	25 m	0 m	25 m
Großer Belt	1	108	62	105	57	78	53	59	44
	2	**38**	**18**	**34**	**8**	20	16	**24**	**18**
	3	36	13	25	8	19	12	24	10
	4	0,9	0,7	0,7	1,0	0,9	0,8	1,0	0,6
Fehmarn Belt	1	135	34	129	38	88	23	130	38
	2	**51**	**8**	65	3	**34**	5	**36**	**2**
	3	30	12	26	10	23	8	22	10
	4	0,6	1,5	0,4	3,3	0,7	1,6	0,6	5,0
Kleiner Belt	1	12	9	—	—	27	13	26	14
	2	**3**	**4**	—	—	**11**	3	**10**	**2**
	3	9	3	—	—	9	3	9	7
	4	3,0	0,8	—	—	0,8	1,0	0,9	3,5
F. S. Flensburg	1	23		25		25		15	
	2	**2**		**7**		**10**		**8**	
	3	12		9		7		9	
	4	6,0		1,3		0,7		1,1	
F. S Kiel	1	36		45		23		38	
	2	**8**		**18**		**9**		**10**	
	3	16		17		7		14	
	4	2,0		0,9		0,8		1,4	

3. Zur Frage typischer Zirkulation in der Kieler Bucht.

a) bei Einstrom in allen Tiefen südlich des Großen Belt.

Mit einem Anteil von 21 % aller Beobachtungen steht dieser Typus an zweiter Stelle und ist mit einer mittleren Dauer von 4,1 Tagen der am zweitlängsten anhaltende.

Bei vorwiegend westlichen und nordwestlichen Winden kehrt sich durch Anstau der Wassermassen im Skagerrak und Kattegat und die Wasserstandserniedrigung in der westlichen Ostsee das mittlere Druckgefälle um, so daß auch an der Oberfläche der Strom in die Ostsee hinein setzt. Mit zeitweise sehr hohen Geschwindigkeiten (bis 108 cm/s) strömt das Wasser fast strahlförmig aus dem Großen Belt in die Kieler Bucht hinein und staut sich im Süden der Bucht. Das aufgestaute Wasser fließt in der Hauptsache ostwärts durch den Fehmarn Belt mit maximal bis auf 135 cm/s erhöhter Geschwindigkeit ab. Teilweise wird es aber auch unter dem Einfluß der ablenkenden Kraft der Erdrotation nach Westen abgelenkt, so daß in der Mitte der Bucht eine antizyklonale Strömung entsteht, die sich in ihrem Südteil gegen die Windtrift behauptet. Diese Annahme wird durch den in allen Tiefen des Kleinen Belts gemessenen Ausstrom gestützt, während an den Feuerschiffen Flensburg und Kiel der Strom dem Wind gehorcht.

Je stärker der Einstrom ist, umso tiefer dringt er nach Süden in die Bucht ein. In der Mitte der Bucht findet man ihn besonders auf seiner Ostflanke scharf begrenzt, was durch Schaumstreifen, Tangansammlungen oder sprunghafte Änderung des Wellencharakters häufig erkennbar ist.

Solche Verhältnisse sind besonders deutlich auf einer Fahrt des F.K. SÜDFALL (Nr. 124/1947) beobachtet: Bei kräftiger Einstromlage herrscht in der Mitte der Bucht fast Stromstille, die südlich des Großen Belt plötzlich durch starken Südstrom abgelöst wird. Nach Schätzung aus dem Kielwasser der Wegetonnen beträgt seine Geschwindigkeit mehr als 50 cm/s! Nach Osten nimmt die Geschwindigkeit sprunghaft ab und schon die nächste Wegetonne in etwa 2 sm Abstand zeigt völlige Stromstille. Weiter gegen Feuerschiff Fehmarn Belt setzt der Strom mit langsam zunehmender Stärke nach Osten.

Die vertikale Geschwindigkeitsverteilung vor dem Ausgang des Großen Belt zeigt, von der Bodenreibungsschicht abgesehen, einen sehr geringen vertikalen Gradienten, so daß diese Strömung als Staustrom angesehen werden kann, der in allen Tiefen dem gleichen Druckgefälle unterliegt. Ober- und Unterschicht lassen sich durch ein Minimum der Stromstärke in 10 m Tiefe trennen. Im Fehmarn Belt scheint sich dagegen einem schwachen Staustrom aus dem Anstau im Süden der Bucht eine überwiegende Windtrift mit nach der Tiefe abnehmender Geschwindigkeit zu überlagern. Im kleinen Belt finden wir wieder in allen Tiefen Geschwindigkeiten gleicher Größenordnung, wie wir sie als Stauwirkung erwarten müssen.

Die Auswirkungen dieser Zirkulation können bei langer Dauer folgende sein:

1. Fortschreitender Ersatz der gesamten Wassermasse durch Kattegatwasser,
2. Infolge der ablandigen Komponente der Windtrift im Westen der Bucht Auftriebwasser entlang der Küste und in den Förden, hierdurch
3. Ausgleich der vertikalen Unterschiede in diesem Gebiet und Anreicherung der Oberschicht mit Nährstoffen aus den lebensarmen Bodenschichten dieses Raumes.

Die Werte der Streuung sind besonders im Westen der Bucht sehr hoch. Allgemein liegt das darin begründet, daß die Westwindwetterlagen in sich eine große Unbeständigkeit aufweisen und damit auch die Windtrift großen Schwankungen unterworfen sein muß. Außerdem liegen die westlichen Beobachtungspunkte nahe der Konvergenz zwischen dem nach Norden setzenden Staustrom und dem entgegengesetzt fließenden Triftstrom, sodaß sie wechselnden Einflüssen ausgesetzt sein können. Besonders im Großen Belt trägt auch noch der Gezeitenstrom (THIEL 1936, 1934) mit zur Streuung bei.

b) bei Ausstrom in allen Tiefen südlich des Großen Belt.

Dieser Typ umfaßt mit 25% die meisten Beobachtungen und weist mit 7,4 Tagen auch die größte mittlere Dauer auf.

Der durch vorwiegend östliche Winde in der westlichen Ostsee hervorgerufene Stau führt zu kräftigem Ausstrom durch die Belte, der im Fehmarn Belt noch durch die Windtrift unterstützte maximale Stromgeschwindigkeiten von 129 cm/s an der Oberfläche erreicht. Sogar in den unteren Schichten des Fehmarn Belt setzt sich der Ausstrom durch. Wie stark der Einfluß der Windtrift ist, erkennt man daran, daß selbst unmittelbar vor dem Großen Belt der Oberflächenstrom weiter

nach NW in die Kieler Bucht hineinfließt und erst innerhalb 15 m Tiefe nach Norden dreht. Diese Stromverteilung muß zu kräftigem Stau besonders im Nordwesten der Bucht führen und dadurch wahrscheinlich auch Ausstrom in allen Tiefen des Kleinen Belt hervorrufen.

Die Mitte der Übergangsschicht ist im Großen Belt und im Fehmarn Belt an der starken vertikalen Geschwindigkeitsabnahme in etwa 15 m Tiefe zu erkennen. Vor dem Großen Belt setzt sich die Rechtsdrehung der Strömung bis zum Boden fort. Die untere Schicht im Fehmarn Belt wird dagegen nach links abgelenkt, eine Erscheinung, die als Folge des Auftriebwassers im Ostteil der Bucht angesehen werden kann. Bei anhaltender Zirkulation dieser Art wird die gesamte Wassermasse der Kieler Bucht — im Norden schnell, im Süden langsam — durch Ostseewasser ersetzt.

Fast alle Streuungswerte belegen beständige oder sehr beständige Strömung. Nur die Bodenströmung des Fehmarn Belt zeigt die hohe Streuung von 3,3. Sie deutet an, daß der Bodenstrom sich nur schwer, oft unregelmäßig oder stoßweise gegen den mittleren Einstrom am Boden durchsetzen kann. Offenbar reicht der Anstau in der westlichen Ostsee nur knapp aus, den aus der Dichteverteilung herrührenden Druckgradienten am Boden überzukompensieren.

c) bei Ausstrom nach NW an der Oberfläche und Einstrom in der Tiefe südlich des Großen Belt.

Nur 9 % aller Beobachtungen lassen sich unter diesem Typ einordnen, dessen mittlere Dauer mit 1,8 Tagen auch den niedrigsten Wert aufweist.

Bei vorwiegend schwächeren südöstlichen Winden zeigt die Oberflächenströmung die gleichen Eigentümlichkeiten nur mit geringeren Geschwindigkeiten wie der vorhergehende Typus. Der Ausstrom findet aber jetzt sein Gegengewicht in kräftigem Einstrom in der Unterschicht, der sich deutlich durch den Fehmarn Belt fortsetzt. Unter seinem Einfluß zeigt die vertikale Geschwindigkeitsverteilung im Großen und Fehmarn Belt Linksdrehung mit der Tiefe. Die obere Grenze des Einstroms sinkt von etwa 12 auf etwas unter 15 m vom Großen Belt zum Fehmarn Belt ab. Auch vor dem Kleinen Belt ist der Einstrom zwischen 15 und 20 m Tiefe gut ausgeprägt. Nur in flacher Schicht über dem Boden ist noch eine schwache Nordkomponente in der Strömung erkennbar. Denn das bis hierher sich ausbreitende Tiefenwasser aus dem Großen Belt schiebt sich seines größeren Salzgehalts wegen unter das des Kleinen Belts.

Annähernd entspricht diese Zirkulation den Verhältnissen, wie sie im mittleren Zustand erwartet werden müssen. Auch die niedrigen Beträge der Streuungen deuten darauf hin. Wegen des geringen Anteils an dem vorliegenden Beobachtungsmaterial scheint es aber nicht berechtigt zu sein, die mittlere Wasserversetzung langer Zeiträume auch als den wahrscheinlichsten Bewegungszustand anzusehen.

Der ständige Zufluß frischen Kattegatwassers in der Tiefe und frischen Ostseewassers an der Oberfläche führt zu einer ausgeprägten Schichtung innerhalb der Bucht. Auch die Windtrift im Süden der Bucht kann infolge des Anstaus im Norden kaum eine ablandige Komponente entwickeln, so daß nur eine schwache Vertikalzirkulation entstehen kann, die der Schichtung entgegenarbeitet.

d) bei Ausstrom nach NE an der Oberfläche südlich des Großen Belt.

Der Anteil dieses Typs beträgt 15% bei einer mittleren Dauer von 2,8 Tagen. Bei vorwiegend südwestlichen Winden verläßt das Oberflächenwasser als Triftstrom nach NE die Kieler Bucht durch den Großen Belt. Teilweise scheint der Oberstrom durch den Fehmarn Belt, der jetzt deutlicher mit der Tiefe nach links dreht, den Wasserverlust der Kieler Bucht zu decken. In der Hauptsache gleicht ihn aber ein starker und sehr beständiger Einstrom in der Tiefe des Großen Belt aus. Sogar der Bodenstrom im Südausgang des Kleinen Belt trägt hierzu mit bei. Die Grenze zwischen Ober- und Unterstrom sinkt von 12 m auf beinahe 20 m vom Großen Belt zum Fehmarn Belt hin ab. Das Kattegatwasser gelangt daher nur in geringerer Mächtigkeit aber auch mit kleinerer Geschwindigkeit und noch unbeständiger als beim vorigen Typus in die Ostsee.

Zur Speisung des Ausstroms wird das salzreiche Bodenwasser im Südwesten der Bucht durch die ablandige Windtrift als Auftriebwasser in die Oberflächenströmung mit einbezogen. Dadurch wird von Südwesten her der Salzgehalt an der Oberfläche ständig zunehmen bei gleichzeitiger Verringerung der vertikalen Gegensätze. So bildet sich ein Salzgehaltsgefälle von West nach Ost an der Oberfläche aus mit einem besonders starken Gradienten zwischen Großem Belt und Fehmarn Belt, wo der Ausstrom der Kieler Bucht mit dem des Fehmarn Belt zusammentrifft.

Die Bearbeitung von nur 5 Beobachtungspunkten kann für den Gesamtraum der Kieler Bucht nur die Grundzüge der Zirkulation erkennen lassen. Besonderheiten der Strömung besonders in den küstennahen Gebieten können daraus nicht mehr exakt abgeleitet werden, wenn sich auch aus dem Schema ihre wesentlichsten Eigentümlichkeiten ergeben.

In der oben erwähnten von WATTENBERG hinterlassenen Arbeit ist die Oberflächensalzgehaltsverteilung in der Kieler Bucht bei verschiedenen Wetterlagen aufgrund annähernd synoptischer Beobachtungen dargestellt, die die hier geschilderten typischen Strömungsverhältnisse in ihren Auswirkungen auf die Salzgehaltsverteilung an der Oberfläche recht gut belegt.

Die Zirkulationstypen zeigen zwar eine gewisse Beständigkeit, sie sind aber keineswegs — auch bei gleichbleibenden meteorologischen Bedingungen — als stationär anzusehen. Selbst bei Ausstrom nach NW und Einstrom in der Tiefe südlich des Großen Belt, der Zirkulation, die qualitativ der mittleren entspricht, kann kein stationärer Zustand angenommen werden, denn gerade sie weist die geringste gesamte und mittlere Dauer auf.

Bei einem Vergleich des Anteils der verschiedenen Typen ist zu beachten, daß 30% aller Beobachtungen nicht verwertet werden konnten. Diese Beobachtungen fallen zum größten Teil in Zeiten stärkerer Winde mit westlicher Komponente, wie oben gezeigt ist. Es ist also anzunehmen daß die Zirkulationsverhältnisse bei vorherrschenden W- bis NW-Winden und SW-Winden mit ihren Folgen bei Berücksichtigung der unbeständigeren Strömungen stärker in Erscheinung treten, als es hier angegeben ist.

Schriften

DEUTSCHE SEEWARTE: Meereskundliche Beobachtungen der deutschen Feuerschiffe 1936, 1937.

KOHLMANN, R.: Beiträge zur Kenntnis der Strömungen der westlichen Ostsee. Wiss. Meeresunt. Abt. Kiel Bd. VIII 1905.

LANGLOFF, F.: Ursachen der Meeresströmungen in der Kieler Bucht. Diss. Kiel 1913.

MANEGOLD, W.: Die Wetterabhängigkeit der Oberflächenströmung an den Pforten der Ostsee. Archiv d. Deutschen Seewarte Bd. 54/4 Hamburg 1936.

NEUMANN, G.: Triftströmungen an der Oberfläche bei Adlergrund-Feuerschiff. Ann. d. Hydr. 1936/1

SCHUMACHER, A.: Monatskarten der Oberflächenströmungen im Nordatlantischen Ozean. Ann. d. Hydr. 1940/4.

THIEL, G.: Strombeobachtungen in der westlichen Ostsee im Juli 1936. Archiv d. Deutschen Seewarte Bd. 58/7 Hamburg 1938.

— Einiges über die Ergebnisse von Strombeobachtungen in der westlichen Ostsee. Ann d. Hydr. 1943 / Fritz Conrad-Heft.

THORADE, H.: Beständigkeit und Streuung bei Strömen. Ann. d. Hydr. 1936/1.

WATTENBERG, H.: Über die Grenzen zwischen Nord- und Ostseewasser. Ann. d. Hydr. 1941/9.

Figur 1.

Schematische Karten der Oberflächen- und Bodenströmung in der Kieler Bucht.

Der Bearbeitung liegen ausgewählte Beobachtungen der Ostseeunternehmungen der Deutschen Seewarte und der Deutschen Feuerschiffe in den Jahren 1936/1937 zugrunde.

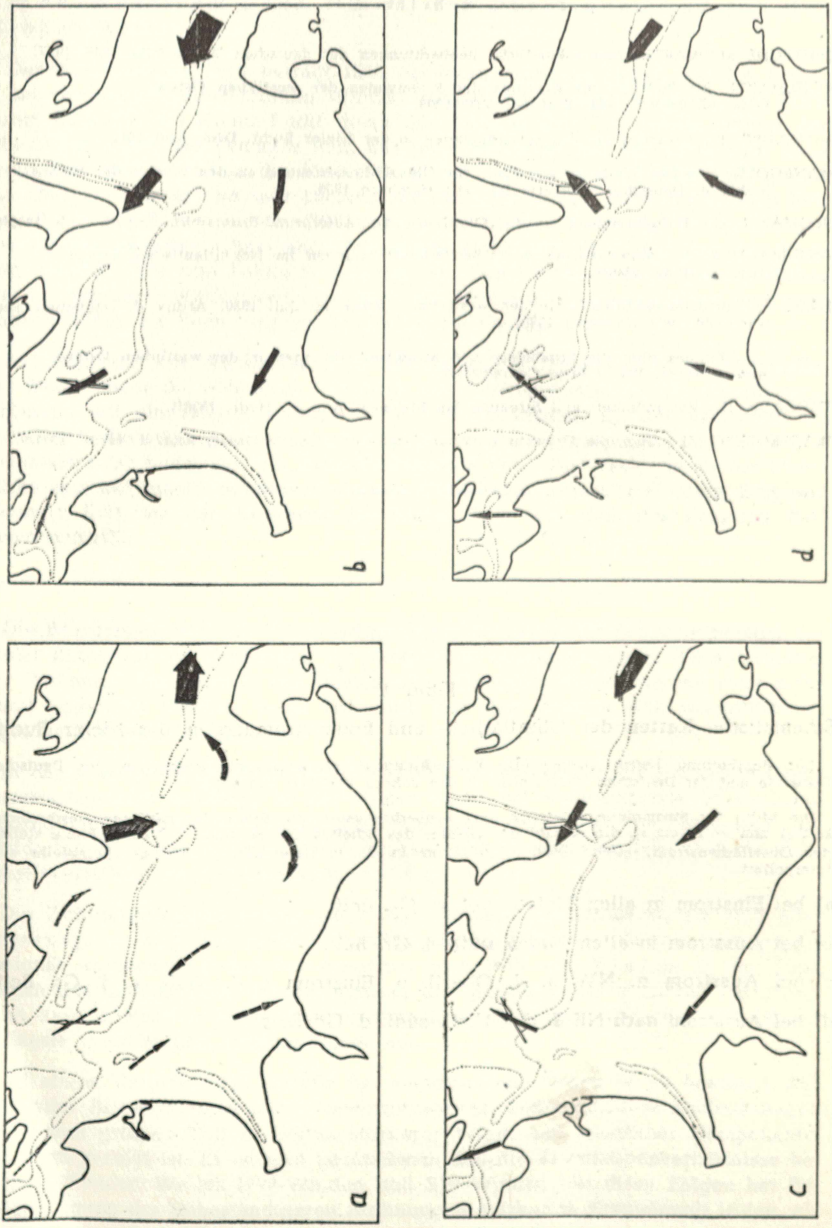
Die Mitte der Strompfeile entspricht dem Beobachtungsort, die Breite der mittleren Geschwindigkeit (1 mm = 20 cm/s), die Anzahl der Glieder des Schaftes der Streuung. Schwarze Pfeile stellen den Oberflächenstrom, offene Pfeile den Strom in 25 m Tiefe dar. Gebogene Strompfeile sind interpoliert.

a) bei Einstrom in allen Tiefen südl. d. Gr. Belt.

b) bei Ausstrom in allen Tiefen südl. d. Gr. Belt.

c) bei Ausstrom n. NW a. d. Oberfl. u. Einstrom i. d. Tiefe s. d. Gr. Belt.

d) bei Ausstrom nach NE a. d. Oberfl. südl. d. Gr. Belt.


a
b
c
d

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Schriften des Naturwissenschaftlichen Vereins für Schleswig-Holstein

Jahr/Year: 1949

Band/Volume: 24_1

Autor(en)/Author(s): Machens Rolf

Artikel/Article: Zur Frage der Zirkulation in der Kieler Bucht. 82-92