

Optische Messungen zur Bestimmung von Schwebstofftransporten

Von KLAUS OHM

Zusammenfassung

Es werden die Grundlagen der Schwebstoffkonzentrationsbestimmung mittels Trübungs- und Attenuationsmessung dargestellt. Im Ästuar ist bei den hohen Konzentrationen die Attenuationsmessung geeigneter; der dieser Methode prinzipiell anhaftende Meßfehler kann durch eine Messung am Formazinstandard beurteilt werden. Die Proportionalitätskonstante zwischen Attenuationskoeffizient und Schwebstoffkonzentration ist zur Zeit für Bilanzierungsprobleme nur unzureichend bestimmt. Hier könnten zusätzliche Streulichtmessungen die Korngrößenverteilung der Suspension ermitteln und damit die entscheidende Fehlerursache verringern.

Summary

The basic principles of optical measurements of concentrated suspended matter, as is often found in estuaries, are discussed. Attenuation measurements are easier to use as an indicator of concentration than turbidity measurements. Formazine can be used to evaluate systematic errors associated with different instruments due to angular spreading of the light beam. Insufficient knowledge of the correlation between the attenuation coefficient and concentration yields the largest uncertainty in calculating the concentration. This could be reduced by additional scattered light measurements which would then lead to the determination of the suspended sediment particle size distribution.

Inhalt

1. Einführung	227
2. Grundlagen der optischen Verfahren	228
2.1 Begriffe	228
2.2 Optische Eigenschaften von Hydrosolen	229
2.3 Meßkonzepte	230
2.3.1 Trübungsmessung	230
2.3.2 Attenuationsmessung	231
3. Zusammenhang von Stoffkonzentration und Attenuationskoeffizient	233
3.1 Experimentelle Befunde und ihre Ursachen	233
3.2 Eine empirische Korrektur des BEERSchen Gesetzes	234
4. Schriftenverzeichnis	235

1. Einführung

Die Kenntnis des Schwebstofftransports ist besonders im Ästuarbereich von grundlegender Bedeutung. Einerseits beobachtet man in der Vermischungszone von Flußwasser und Meerwasser besonders große Mengen von Schwebstoffen im Wasser und am Boden, andererseits sind die Flußmündungen dicht besiedelt und durch Schifffahrt und Industrie intensiv genutzt. Daraus ergeben sich zwei Schwerpunkte des Interesses am Schwebstofftransport. Um die Schifffahrtsweg freizuhalten, wird Sediment aus der Fahrinne gebaggert. Das soll

möglichst geringe Kosten verursachen. Chemische Produkte liefern einen wesentlichen Beitrag zur Umweltbelastung von Gewässern. Das Schicksal chemischer Schadstoffe ist wegen der großen spezifischen Oberfläche des Schwebstoffs eng mit seinem Transport und Verbleib verknüpft.

2. Grundlagen der optischen Verfahren

Der Transport wird ermittelt, indem die Konzentration eines Stoffes an einem Ort mit der dort herrschenden Strömungsgeschwindigkeit multipliziert wird. Die so erhaltene Flußdichte kann über einen Gewässerquerschnitt und über die Zeit integriert werden, um zu transportierten Mengen zu gelangen. Verlangt man eine höhere Genauigkeit des Ergebnisses oder schwanken die Meßgrößen Konzentration und Geschwindigkeit, müssen diese entsprechend örtlich und zeitlich dichter genommen werden. Hier liegt der wesentliche Grund für die Einführung optischer Methoden.

Schwebstoffkonzentrationen werden direkt bestimmt, indem man eine Wasserprobe bekannten Volumens filtriert und das getrocknete Filter wägt oder indem der Schwebstoff einer meist größeren Wassermenge zentrifugiert, getrocknet und gewogen wird. Solche Messungen können nur punktuell durchgeführt werden und sind verhältnismäßig aufwendig. Mit optischen Methoden kann dagegen automatisch kontinuierlich gemessen werden. Damit kann man eine wesentlich größere Dichte der Meßpunkte erzielen und damit höhere Verlässlichkeit oder bessere Auflösung erreichen.

Optische Messungen sind indirekte Verfahren; man erhält als Ergebnis z. B. den Attenuationskoeffizienten der Probe oder den Vergleich mit einem künstlichen Trübungsstandard. Die Grundlagen dieser Verfahren werden im ersten Teil dargestellt. In einem zweiten Schritt muß diese optische Größe mit der Stoffkonzentration verknüpft werden. Das geschieht mittels Eichmessungen, deren Problematik im zweiten Teil diskutiert werden soll.

2.1 Begriffe

Die Wellenlänge λ ist eine wesentliche Qualität des Lichtes, und sie beeinflusst seine Wechselwirkung mit der Materie. Da diese Arbeit sich nicht mit der Wellenlängenabhängigkeit von Prozessen beschäftigt, wird davon ausgegangen, daß monochromatisch bei einer bestimmten Wellenlänge gearbeitet wird. Entsprechend wird der Index λ von wellenlängenabhängigen Größen auch weggelassen. Weiterhin wird keine Wellenlängenumwandlung durch Fluoreszenz betrachtet. Die betrachteten Prozesse sind die Absorption und die Streuung. Das bedeutet, daß Licht, das in einen Meßraum fällt, diesen zu einem Teil unbeeinflusst wieder verläßt, ein zweiter Teil durch Streuung in veränderten Richtungen heraustritt und ein dritter Teil durch Absorption in Wärme umgewandelt wird und damit seinen Charakter als Licht verliert.

Dieser Beschreibung entsprechend werden auch die Begriffe verwendet (Abb. 1): Die Materieeigenschaft, die Licht durch Absorption vernichtet, wird durch den Absorptionskoeffizienten a beschrieben, die Eigenschaft, die Licht aus seiner Richtung ablenkt, durch den totalen Streukoeffizienten b . Die Summe der beiden wird, übereinstimmend mit der Terminologie der optischen Ozeanographie, *Attenuationskoeffizient* c genannt (JERLOV, 1976).

$$c = a + b \quad (1)$$

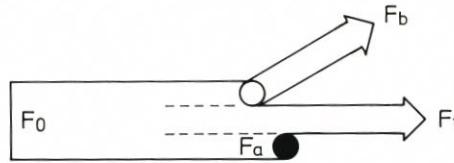


Abb. 1. Aufteilung des Strahlungsflusses F_0 bei Absorption und Streuung. Der Teil, der weder absorbiert (F_a) noch gestreut (F_b) wird, tritt unbeeinflusst aus dem Meßraum (F_t)

Die für c auch verwendete Bezeichnung „Extinktionskoeffizient“ wird aus Gründen der Eindeutigkeit vermieden. Wegen des hier betrachteten Konzentrationsbereichs wird nur die Wirkung der Partikeln betrachtet, nicht die sehr viel geringere des reinen Wassers; eine entsprechende Indizierung kann entfallen.

2.2 Optische Eigenschaften von Hydrosolen

Diese grobe Begriffsbestimmung soll an Hand der wichtigsten optischen Eigenschaften des zu untersuchenden Mediums noch etwas präzisiert werden. Absorption ist an gefärbte Lösungen oder gefärbte Teilchen gebunden. Die Streuung wird durch Wechselwirkung des Lichts mit Teilchen von anderer Brechzahl als der des Wassers verursacht. Für Teilchen, die sehr klein gegen die Wellenlänge sind, hat Lord RAYLEIGH (1871) eine Theorie der Streuung geliefert. Für größere homogene Kugeln hat MIE (1908) eine grundlegende Arbeit veröffentlicht, in deren Folge auch für andere Partikelformen die Streuung berechnet wurde. Wichtig für unsere Zwecke ist dabei die Streufunktion $\beta(\varphi)$, die die Winkelverteilung des gestreuten Lichts beschreibt. Den totalen Streukoeffizienten b erhält man durch Integration über den vollen Raumwinkel.

Abb. 2 stellt eine typische Streufunktion $\beta(\varphi)$ dar; in Richtung des Winkels φ ist die auf den einfallenden Strahlungsfluß F_0 und das Streuvolumen ΔV bezogene Strahlendichte aufgetra-

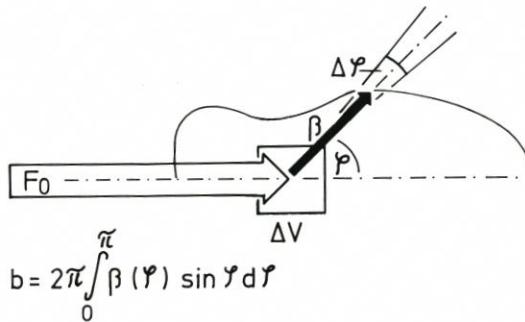


Abb. 2. Eine typische Streufunktion $\beta(\varphi)$. ΔV ist der Meßraum, φ der Winkel, unter dem das gestreute Licht beobachtet wird, und b der totale Streukoeffizient

gen. Typisch ist ein starker Anteil an Vorwärtsstreuung und ein Minimum unter etwa 90° . Bei einer festen Wellenlänge wird die Form von $\beta(\varphi)$ von Brechzahlen des Wassers und der Partikeln und vom Durchmesser der Partikeln bestimmt. Diese liegen im allgemeinen nicht in einer Fraktion vor, sondern in einer Größenverteilung. Entsprechend dieser Verteilung

überlagern sich die zu den einzelnen Größen gehörenden Streufunktionen zu einer resultierenden. Die Intensität des gestreuten Lichts oder die Größe des totalen Streukoeffizienten ist proportional zur Anzahl der Partikel im Volumen ΔV . Eine ausführliche Darstellung und Anwendung der Theorie auf meereskundliche Probleme, allerdings bevorzugt auf Plankton, findet man in den Arbeiten von REUTER (1980) und DIEHL u. HAARDT (1980).

2.3 Meßkonzepte

Um größtmögliche Kenntnisse über die Konzentration und Art der Schwebstoffe zu erhalten, ist eine Messung der erwähnten Größen nötig, des absorbierten Lichtflusses und der Streufunktion, darüber hinaus aber auch der Polarisierungsebenen des in die verschiedenen Winkel gestreuten Lichts, und das alles in einem größeren Wellenlängenbereich. Der damit verbundene Aufwand kommt für Feldmessungen nicht in Betracht. Vielmehr wendet man Verfahren an, bei denen nur eine Größe gemessen wird und deren Aussage dementsprechend nicht eindeutig interpretiert werden kann. Das gleiche optische Ergebnis kann von verschiedenen Stoffkonzentrationen erzeugt werden.

2.3.1 Trübungsmessung

Die eine Gruppe von Verfahren faßt man unter dem Begriff *Trübungsmessung* zusammen. Dabei wird der unter einem Winkel φ in einem Winkelbereich $\Delta\varphi$ gestreute Strahlungsfluß gemessen und durch den eingestrahnten Fluß F_0 geteilt. Die Ergebnisse zweier Geräte, die unterschiedliche Strahlengänge aufweisen, sind offensichtlich nicht vergleichbar. So hat man auch keinen Sinn darin gesehen, bei kommerziellen Geräten die Meßergebnisse in Einheiten des physikalischen Maßsystems anzugeben. Wünschenswert wäre ein Einheitsgerät. Allerdings hat sich bei der Vielzahl von möglichen Winkeln, von denen keiner besonders ausgezeichnet ist, jeder Hersteller einen anderen Strahlengang ersonnen. Um die Messungen mit verschiedenen Gerätetypen doch vergleichbar zu machen, bezieht man sich auf den Standard *Formazin*, wie er in den deutschen Einheitsverfahren festgelegt ist (Deutsche Einheitsverfahren, 1975), und gibt das Ergebnis in Trübungseinheiten *Formazin TE/F* an. Der Schluß von Trübung auf die Stoffkonzentration ist bei unterschiedlichem Strahlengang der Geräte im allgemeinen nicht möglich. Nur wenn die Streufunktion des untersuchten Stoffes der von *Formazin* gleicht, liefern verschiedene Geräte das gleiche Ergebnis. Einen Eindruck von der Streufunktion von Leitungswasser und *Formazin* geben ALBERT u. SMIRICZ (1976). Bei unbekanntem Stoffen muß also den eigentlichen Messungen eine Kalibrierung von Stoffkonzentrationen gegen Trübung vorangehen, die nur für einen bestimmten Gerätetyp gilt.

Beachtet man die dargestellten Einschränkungen, so hat die Trübungsmessung die vorteilhafte Eigenschaft, daß das Meßsignal, bei 0 beginnend, mit steigender Stoffkonzentration wächst. Dadurch ist die Trübungsmessung besonders geeignet, im Bereich geringer Konzentrationen zu arbeiten. Steigt dagegen die Konzentration zu hohen Werten, so fällt der Meßwert wieder, weil die Streuung des einfallenden Lichtes auf dem Weg zum Meßraum und die des austretenden Lichts nicht mehr vernachlässigt werden kann, ebensowenig wie die Mehrfachstreuung im Meßraum. Dieses Verhalten zeigen ALBERT u. SMIRICZ (1976) am Beispiel des *Formazin*. Durch einen Kunstgriff kann man zwar den Zusammenhang von Trübung und Signal linearisieren (FISCHER u. SCHNABEL, 1976), aber dieses Verfahren ist durch die größtmögliche Leistung der Lichtquelle auch beschränkt.

2.3.2 Attenuationsmessung

Die zweite Gruppe von Geräten mißt die Lichtschwächung, die ein Lichtstrahl entlang einer Meßstrecke der Länge L durch Streuung und Absorption erfährt. Der ungestört hereintretende Strahlungsfluß F_t wird gemessen und durch F_0 geteilt, Transmission T genannt. Der negative Logarithmus der Transmission ist, bezogen auf die Streckenlänge L , der Attenuationskoeffizient c .

$$T = F_t/F_0 \quad (2)$$

$$c = (-\ln T)/L \quad (3)$$

Seine Einheit ist m^{-1} . So wie der totale Streukoeffizient b bei einer Partikelgröße proportional zur Teilchendichte ist, ist es auch der Absorptionskoeffizient a und mit Gleichung (1) auch c . Einen typischen Strahlengang zeigt Abb. 3.

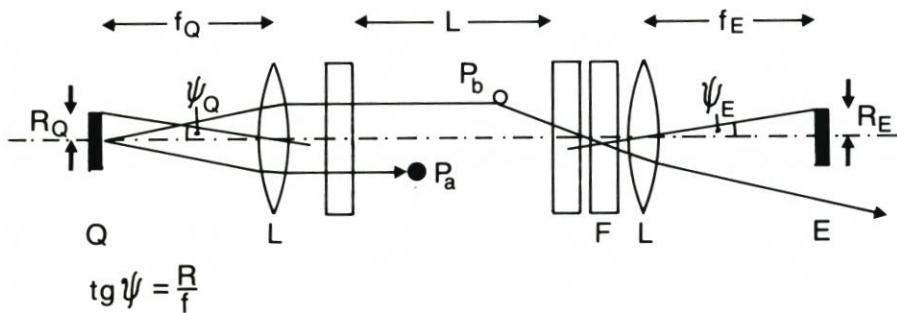


Abb. 3. Strahlengang eines Attenuationsmeßgerätes. Q und E sind Lichtquelle bzw. Empfänger mit dem Radius R , f die Brennweiten der Linsen L , ψ die Öffnungswinkel der Systeme. Das Filter F vermindert das Streulicht aus der Umgebung

Die monochromatische Lichtquelle Q ist wie der Empfänger E im Brennpunkt der Linsen angebracht, die Strahlen verlaufen im Meßraum parallel. Lichtstrahlen, die auf absorbierende Partikeln P_a oder streuende P_b treffen, erreichen nicht den Empfänger.

Eine Fehlerquelle soll im folgenden diskutiert werden: Durch die Fläche des Empfängers mit dem Radius R_E bedingt, erreicht allerdings auch das im Winkelbereich ψ_E vorwärtsgestreute Licht den Empfänger. Dadurch wird T systematisch zu groß und damit c zu klein gemessen. In gleicher Weise wirken auch die Größe der Lichtquelle und der Linsenfehler der sphärischen Aberration. Die Winkel ψ_Q und ψ_E können zwar klein, aber nie zu 0 gemacht werden, ebensowenig wie die Linsenfehler, so daß nie das wahre c gemessen werden kann, sondern immer ein zu kleines. Für das im Institut für Meeresforschung Bremerhaven (IfMB) entwickelte Gerät liegt eine Fehlerabschätzung vor (OHM, 1979). Diesem prinzipiellen Mangel der Definition von c als Grundlage einer Meßvorschrift steht eine günstige Eigenschaft gegenüber. Man kann an Hand der Meßwerte beim Vergleich zweier Geräte entscheiden, welches das – im optischen Sinn – bessere ist, nämlich das, welches für die gleiche Probe den größeren Wert für c liefert. Ein solcher Vergleich wurde zwischen dem Laborphotometer ELKO II und dem schon erwähnten Attenuationsmeßgerät des IfMB angestellt, indem der Attenuationskoeffizient von hohen Formazinkonzentrationen in beiden Geräten gemessen wurde. Abb. 4 zeigt, daß das ELKO II einen halb so großen bezogenen Koeffizienten mißt, was auch augenscheinlich gestützt wird, weil der Strahlengang stark divergent ist. Zum Vergleich wurde noch ein Wert aus der Literatur herangezogen, der noch kleiner ist, über dessen Zustandekommen aber nichts gesagt werden kann.

Gerät/Autor	λ /nm	Öffnungswinkel	Trübung TE/F	c/Trübung
ELKO II, Zeiss	Filter RG 610	?	200	0,2/m TE/F
Attenuationsmeßgerät, IfMB	665	1,5°	10-200	0,475 ± 0,055/m TE/F
ALBERT u. SMIRICZ (1976)	600	?	0,015	0,15/m TE/F

Abb. 4. Vergleich des auf Trübung bezogenen Attenuationskoeffizienten verschiedener Geräte mit einer Literaturangabe

Bis auf Abweichungen im Rahmen dieses Meßfehlers sind aber bei der Attenuationsmessung die Ergebnisse verschiedener Geräte vergleichbar, vorausgesetzt, sie arbeiten mit der gleichen Wellenlänge. Der resultierende Öffnungswinkel des Strahlengangs sollte zur Fehlerabschätzung bei der Beschreibung eines Gerätes angegeben werden.

Bei der Attenuationsmessung wird das maximale Meßsignal bei reinem Wasser erreicht und fällt mit zunehmender Konzentration gegen 0. Im Bereich des Vollausschlages hat aber auch die Drift der elektrooptischen Wandler den größten Einfluß, so daß dort nur ungenau gemessen werden kann, was die Brauchbarkeit des Verfahrens bei geringen Konzentrationen beschränkt. Um ein Gerät für einen Einsatzzweck mit geschätzten Attenuationskoeffizienten c zu dimensionieren, berechnet man die Transmission in Abhängigkeit von c mit der Meßstreckenlänge als Parameter (OHM, 1979). Für den Ästuarbereich kommen Streckenlängen von 100 bis 10 mm in Betracht, bei kürzerer Meßstrecke wird die Durchströmung behindert. Im IfMB sind eine Reihe von Geräten entstanden, die alle den gleichen Strahlengang aufweisen und je nach Einsatzzweck mit anderen Meßaufnehmern gekoppelt sind. Für die Erforschung des Schwebstofftransports hat sich neben der profilierenden Ästuarsonde für viele Meßgrößen als besonders nützlich eine Version erwiesen, die an den Strömungsmesser von Aanderaa gekoppelt ist (Abb. 5).



Abb. 5. Attenuationsmeßgerät des IfMB, gekoppelt an das Strömungsmessgerät von Aanderaa. Die Meßstrecke wird durch die Fahne quer zur Strömungsrichtung gestellt

Die Meßdaten werden im Strömungsmesser zusammen mit der Leitfähigkeit und der Temperatur gespeichert, so daß die eingangs geschilderte Multiplikation von Konzentration mit der Strömungsgeschwindigkeit durchgeführt werden kann (KRAUSE u. OHM, 1984).

3. Zusammenhang von Stoffkonzentration und Attenuationskoeffizient

Nach dem Konzept der Attenuationsmessung kann also weitgehend unabhängig vom Gerätetyp der Koeffizient c gemessen werden. Um auf die Stoffkonzentration K zu schließen, wurden viele Messungen an natürlichen und an synthetischen Proben gemacht, z. B. von LÜNEBURG (1953), RAGUTZKI (1975), REINEMANN et al. (1982) und KRAUSE u. OHM (1984). Diesen Ergebnissen entnimmt man, daß das BEERSche Gesetz von der Proportionalität, also

$$K = e c \quad (4)$$

gut erfüllt ist, wenn man eine Probe mit konstanter Größenverteilung, von hohen Konzentrationen (1 g/l) ausgehend, verdünnt. Liegen dagegen Proben mit unterschiedlichen Größenverteilungen oder von unterschiedlichen Zusammensetzungen vor, so schwanken die Proportionalitätsfaktoren e beträchtlich.

3.1 Experimentelle Befunde und ihre Ursachen

Einer Darstellung von HAARDT et al. (1979) kann man für Schlicksuspension mit einer Konzentration von 5 mg/l die Werte der Tab. 1 entnehmen.

RAGUTZKI (1975) hat verschiedene natürliche Sedimente analysiert und zu Suspensionen zwischen 20 und 120 mg/l verarbeitet; die Ergebnisse sind in Tab. 2 wiedergegeben.

Tabelle 1
Abhängigkeit der Proportionalitätskonstanten e vom Durchmesserbereich der Partikeln d (nach HAARDT et al. [1979])

$d/\mu\text{m}$	$e/\text{g m}^{-2}$
< 2	2,1
2- 6	2,6
6-20	10

Tabelle 2
Abhängigkeit der Proportionalitätskonstanten e vom mittleren Korndurchmesser d_{50} (nach RAGUTZKI [1975])

$d_{50}/\mu\text{m}$	Korngrößen / %		$e/\text{g m}^{-2}$
	< 63 μm	< 2 μm	
3	100	40	2,7
12	99	9	5,4
21	89	3	7,6
70	0	0	45
160	4	0	25

Die Beobachtung von e während einer Tide bei Blexen ergab Schwankungen zwischen 1,8 und $4,2 \text{ g m}^{-2}$. Aus den erwähnten Veröffentlichungen sowie aus unveröffentlichten Messungen des Wasser- und Schiffsamtes Bremerhaven (WSA) sind die Proportionalitätskonstanten aus den Abbildungen ermittelt und in Tab. 3 zusammengefaßt worden. Die Extremwerte wurden ebenfalls graphisch geschätzt, wobei Ausreißer nicht berücksichtigt wurden. Man erkennt, daß die Werte bei jedem der Autoren stärker schwanken, als die Abweichung der Autoren voneinander beträgt.

Tabelle 3

Die von verschiedenen Autoren beobachteten Werte für die Proportionalitätskonstante e und ihr Schwankungsbereich

Autor/Gebiet	$e_{\min}/\text{g m}^{-2}$	$e/\text{g m}^{-2}$ bei K/g l^{-1}		$e_{\max}/\text{g m}^{-2}$
LÜNEBURG (1953) Unterweser	2,4	4,3	0,6	11
WSA Unterweser	2,6	5	1,4	7
REINEMANN (1982) Ems	2,5	6,3 13	0,25 0,5	20
RAGUTZKI (1974) Norderney	3,5	6,7	0,13	10

Die Diskussion dieser starken Schwankungen erstreckt sich auf apparative Einflüsse, zu denen auch die Art der Probennahme gerechnet werden muß, und auf die von der Natur vorgegebenen Ursachen. Der Hinweis auf den Einfluß der Bauart des Meßgerätes wurde bereits in Abb. 4 gegeben; allerdings sind dort extrem verschiedene Bauarten verglichen worden. In der Praxis sollten solche Unterschiede nicht vorkommen, zumal man sich durch das Ausmessen einer Formazinprobe leicht vergewissern kann, mit welchen Fehlern man zu rechnen hat. Das Ergebnis dieses Quotienten aus Attenuationskoeffizient und Trübung, gemessen mit Formazin, sollte – wie z. B. auch die Wellenlänge des Meßlichtes – zur Kennzeichnung der Geräteeigenschaften jede Methodenbeschreibung enthalten.

Durch die Probennahme für die direkte Konzentrationsbestimmung wird das Korngrößenspektrum verändert. CHRISTIANSEN (1974) hat das anhand von Untersuchungen von NICOLS und BENEDICT diskutiert für den Fall, daß das Probengut durch einen Stutzen abgepumpt wird. Eine Fehlerabschätzung für die Bestimmung von e läßt das Material aber nicht zu. Auf diese Weise haben REINEMANN et al. (1982) und das WSA gearbeitet. Dagegen wurden die Proben der beiden anderen Autoren der Tab. 3 mit einem WOHLBERG-Schöpfer genommen. Für die Veränderung des Korngrößenspektrums durch Schöpfer liegt kein Zahlenmaterial vor; sicher werden aber von einer verringerten Turbulenz die größeren und schwereren Anteile eher betroffen als die feineren Partikeln.

3.2 Eine empirische Korrektur des BEERSchen Gesetzes

Während die bisher diskutierten Einflüsse zur fehlerhaften Bestimmung der Proportionalitätskonstante e führen, verändern die im Ästuar natürlich auftretenden unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten die Zusammensetzung des Schwebstoffes und damit die Propor-

tionalitätskonstante. Es ist nicht sinnvoll, eine Beziehung zwischen ihr und der Strömungsgeschwindigkeit anzugeben, da bei den zeitlich veränderlichen Strömungsverhältnissen keine stationären Gleichgewichtszustände zwischen Turbulenz und Schwebstofffracht erreicht werden. Um der Tatsache Rechnung zu tragen, daß bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten niedrige Konzentrationen mit großem Anteil an kleinen Korngrößen vorliegen und damit die Proportionalitätskonstante zu klein gemessen wird, hat GRABEMANN (1985) aus 418 Kalibrierungsmessungen eines Jahres anstelle des BEERSchen Gesetzes die empirische Formel ermittelt

$$K = (1,39 + 0,23 \ln(c/c_0)) \text{ g m}^{-2} \cdot c; c_0 = 1/\text{m} \quad (5)$$

Hiermit errechnete Konzentrationen weichen von den gemessenen um nicht mehr als $\pm 15\%$ ab, ermittelt nach den gleichen Kriterien wie die Extremwerte der Tab. 3. Gleichung (5) gilt nur für Kornverteilungen, wie sie in der Unterweser bei Blexen auftreten, wo die Proben entnommen wurden.

Diskussion

Die Darstellung der Grundlagen der einfachen optischen Meßverfahren hat gezeigt, daß die Trübungsmessung für geringe Konzentrationen große Vorteile hätte, wenn man mittels eines einheitlichen Strahlenganges die Meßwerte vergleichbar machte. Die Attenuationsmessung ist für hohe Konzentrationen, wie sie für Transportbetrachtungen im Ästuar bedeutungsvoll sind, das geeignete Werkzeug. Leider sind auch hier die Ergebnisse verschiedener Geräte kaum vergleichbar, weil selbst in der neueren Literatur oft Daten über den Meßfehler durch die endlichen Öffnungswinkel der optischen Systeme fehlen. Sind die Angaben der Hersteller unzureichend, kann der auf Formazin bezogene Attenuationskoeffizient leicht gemessen werden; seine Größe ist ein Maß für die optische Qualität des Strahlenganges. Historische Messungen sind wegen fehlender Angaben nur bedingt mit neueren zu vergleichen, sosehr man die alten Werte zur Ermittlung von Trends auch braucht.

Die starken Schwankungen der Proportionalitätskonstanten e , die wesentlich größer als der Meßfehler des Attenuationskoeffizienten sind, werden auf die wechselnde Korngrößenverteilung zurückgeführt, die wiederum wesentlich von der Turbulenz gesteuert wird.

Zur Beurteilung vieler Transportprobleme genügt ein Mittelwert dieser Konstanten. Will man aber im Ästuar mit wechselnden Transportrichtungen die Bilanz ermitteln, bei der die Differenz großer Zahlen gebildet werden muß, steigen die Anforderungen an die Genauigkeit der Proportionalitätskonstante beträchtlich. Auf dem bisher verfolgten Weg sind nennenswerte Steigerungen kaum noch zu erreichen. Um die Genauigkeit zu verbessern, müssen weitere optische Parameter gemessen werden, die Aufschluß über die Korngrößenverteilung geben. Einen Schritt in dieser Richtung taten die Arbeiten von KLOTZ (1978) und REUTER (1980), in denen diskrete Werte der Streufunktion ausgemessen wurden und aus ihnen auf die Korngrößenverteilung der vorliegenden Probe geschlossen wurde. Ob das auch mit einem robusten Instrument im hohen Konzentrationsbereich des Ästuars möglich ist, wo Streulichtmessungen Probleme aufwerfen, muß noch erforscht werden.

4. Schriftenverzeichnis

- ALBERT, G. u. SMIRICZ, G.: Physikalische Grundlagen der Trübungsmessung. In: Haberer u. Witt, 1976.
- CHRISTIANSEN, H.: Über den Transport suspendierter Feststoffe in Ästuarien am Beispiel der Elbmündung bei Neuwerk. *Hamburger Küstenforschung*, H. 28, 1974.

- DEUTSCHE EINHEITSVERFAHREN ZUR WASSER-, ABWASSER- UND SCHLAMMBEHANDLUNG. Trübung. 7. Lieferung, Weinheim, 1975.
- DIEHL, P. u. HAARDT, H.: Measurement of the spectral attenuation to support biological research in a "plankton tube" experiment. *Oceanol. Acta*, Vol. 3, No. 1, 1980.
- FISCHER, H. J. u. SCHNABEL, D.: Trübungsmessungen und Bestimmung der ungelösten Stoffe in Abwässern. In: Haberer u. Witt, 1976.
- GRABEMANN, I.: Untersuchungen zum Schwebstofftransport in der Unterweser. (Unveröff.), 1985.
- HAARDT, H., DIEHL, P. u. KNOPPERS, B.: Messungen des spektralen Attenuationskoeffizienten an Latexsuspensionen, Phytoplanktonkulturen und natürlichen Wasserproben aus der Ostsee. Reports Sonderforschungsbereich 95, Wechselwirkung Meer-Meeresboden, Kiel, Nr. 52, 1979.
- HABERER, K. u. WITT, K.: Trübungsmessung in der Wasserpraxis. DVGW, Eschborn, 1976. (DVGW-Schriftenreihe Wasser, Nr. 12)
- JERLOV, N. G.: *Marine Optics*. Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York, 1976.
- KLOTZ, R.: Untersuchungen über Streufunktionen im optischen Spektralbereich an künstlichen und natürlichen marinen Partikelsuspensionen mit Beispielen aus der Kieler Bucht. Reports Sonderforschungsbereich 95, Wechselwirkung Meer-Meeresboden, Kiel, Nr. 46, 1978.
- KRAUSE, G. u. OHM, K.: A Method to Measure Suspended Load Transports in Estuaries. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, Vol. 19, 1984.
- LÜNEBURG, H.: Die Probleme der Sinkstoffverteilung in der Wesermündung. Veröff. Inst. Meeresforsch. Bremerh., Bd. 2, 1953.
- MIE, G.: Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen. *Ann. Phys.*, Bd. 25, 1908.
- OHM, K.: An In-Situ-Attenuance Meter for very Turbid Waters. *Dt. Hydrogr. Z.*, Bd. 32, 1979.
- RAGUTZKI, G.: Untersuchungen zur Ermittlung suspendierter Feststoffe durch Trübungsmessungen. Jahresber. Forschungsstelle Norderney, 1975.
- RAYLEIGH, Lord: On the scattering of light by small particles. *Philos. Mag.*, Vol. 41, 1871.
- REINEMANN, L., SCHEMMER, H. u. TIPPNER, M.: Trübungsmessungen zur Bestimmung des Schwebstoffgehalts. DGM, Bd. 26, H. 6, 1982.
- REUTER, R.: Characterization of marine particle suspensions by light scattering. I. Numerical predictions from Mie theory. II. Experimental results. *Oceanol. Acta*, Vol. 3, No. 3, 1980.