

# Natur- und Modellmessungen der Stoffausbreitung in Ästuarien

Von F. Ohlmeyer und D. Berndt

## Zusammenfassung

Die zunehmende Industrialisierung des Küstenraumes erfordert Methoden, die eine Voraussage von Konzentrationen bei Abwasser- oder Kühlwassereinleitungen gestatten. Der Bericht behandelt vornehmlich hydraulische Modellversuche. Vergleiche zwischen Natur und Modell dienen der Verifikation von Modellversuchen. Die Ergebnisse bestätigen, daß ein bestimmtes Verzerrungsverhältnis für die Simulierung der turbulenzbedingten Ausbreitung im Modell erforderlich ist. Die Bestimmung der Konzentration bei abbaubaren Stoffen ist möglich.

## Summary

*The increasing industrial settlement in coastal regions requires for methods to predict the concentration rates of sewage and thermal pollutants. This paper focusses on hydraulic modelling. Comparisons between prototype and model data serve to verify model tests. The results confirm the relation of distortion to be necessary for a good simulation of the turbulence induced spreading process in the model. Estimations of decaying pollutants are possible.*

## Einleitung

Die Küstenzonen der Industrieländer Westeuropas und anderer vergleichbarer Gegenden der Welt sind ein bevorzugtes Feld für industrielle Neuansiedlung. Die wirtschaftlichen Gründe hierfür sind:

1. Lage am tiefen Wasser, erreichbar durch größte Schiffe und 2. die zunehmende Größe der Einheiten von Wärmekraftwerken und chemischen Industriebetrieben erfordert große Wassermengen.

So sind heute Kühlwassermengen von 200 bis zu 500 m<sup>3</sup>/s keine Utopie mehr. Im allgemeinen sind derartig große Mengen nur noch in Küstenregionen verfügbar, besonders in Ästuarien, wo die Wasserbewegung hauptsächlich tidebedingt ist. Abbildung 1 zeigt die Neuansiedlung von Kraftwerken und Industrien im Bereich der Deutschen Bucht. Die schattierten Flächen bezeichnen die bestehenden Tidemodelle.

Zur Vermeidung von Umweltschäden durch die Einleitung industrieller, häuslicher oder thermischer Abwässer und um die Wirkung eines thermischen Kurzschlusses der Wärmekraftwerke zu minimalisieren, ist es erforderlich, genaue Informationen über die Konzentrationen bzw. Temperaturen zu erhalten, die in diesen Gebieten auftreten werden.

Die Wege zu dieser Information sind bekannt:

1. direkte Messungen in der Natur
  2. mathematische Modelle
  3. hydraulische Modelle
- } oder hybride Modelle

Direkte Messungen sind zu einem gewissen Grade eine notwendige Voraussetzung für die beiden anderen Wege. Sie bieten darüber hinaus noch die Möglichkeit, die Ergebnisse

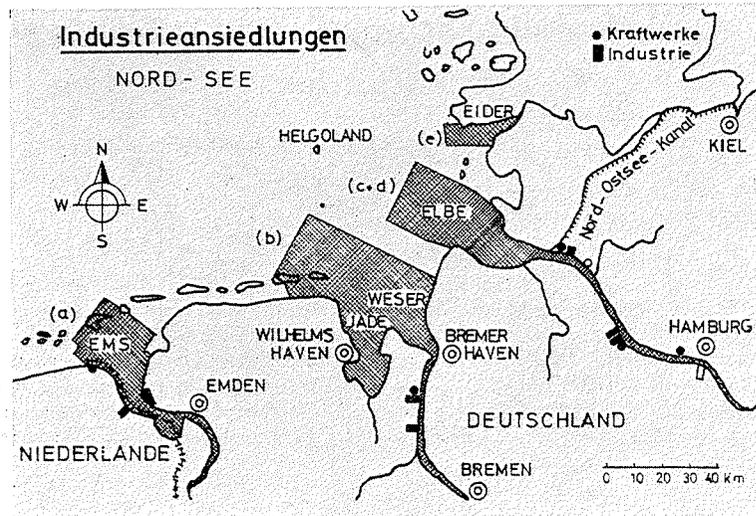


Abb. 1. Industriensiedlung in der Deutschen Bucht

der Modellversuche zu überprüfen. Aber oft sind hierfür dann keine Mittel vorhanden.

Natürlich ist es nicht erforderlich, das gesamte Gebiet durch Messungen zu erfassen – das wären dann Modellversuche im Maßstab 1:1 –, sondern es genügen lediglich einige spezifische Werte.

Derartige Vergleiche konnten von der *Bundesanstalt für Wasserbau* gemacht werden, die Modellversuche und Naturmessungen in den Ästuarien der Elbe und Ems ausgeführt hat. Diese Ästuarien gehören dem gut durchmischten Typ (ohne Schichtung) an, der Tidenhub beträgt 2,5 bis 3,5 m.

### Rezirkulation

Ein Gegenstand der Untersuchungen war die Rezirkulation von Kühlwasser. Abbildung 2 zeigt das Schema eines Kühlkreislaufes: Für die Dauer einer halben Tide ist direkte Rezirkulation kaum vermeidbar. Der Temperaturanstieg betrug in einem untersuchten Fall etwa 5° C bei einer Temperaturspanne von  $T_0 = 10^\circ \text{C}$  am Kondensator.

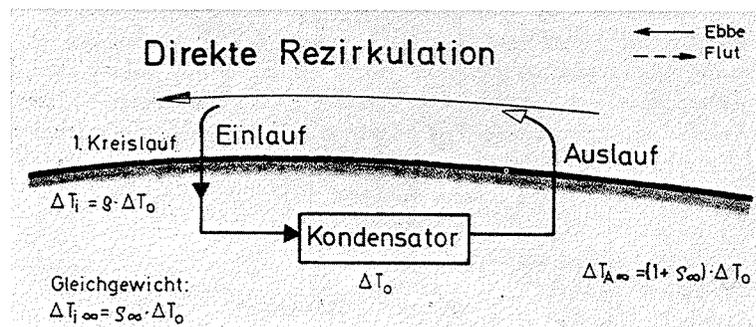


Abb. 2. Kühlwasserkreislauf eines Wärmekraftwerkes

Der Rezirkulationsfaktor  $\zeta = \frac{\Delta T_i}{\Delta T_0}$  (mit  $\Delta T_i$  = Temperaturanstieg am Einlauf nach dem ersten Kreislauf) kann ausgedrückt werden als  $\zeta = \frac{\zeta_\infty}{1 + \zeta_\infty}$ , worin  $\zeta_\infty = \frac{\Delta T_{i\infty}}{\Delta T_0}$  und  $\Delta T_{i\infty}$  der maximale Temperaturanstieg nach unendlich vielen Kreisläufen bedeutet. Für ein  $\Delta T_{i\infty} = 5^\circ \text{C}$  ergibt sich also ein  $\zeta = 0,33$ . Diese Beziehung ist von der geometrischen Reihe  $\zeta_\infty = \sum_{n=1}^{\infty} \zeta^n$  abgeleitet. Es ist zulässig, mit  $\zeta_\infty$  zu rechnen, da die Reihe sehr rasch konvergiert und bereits nach wenigen Kreisläufen der Endwert  $\zeta_\infty$  praktisch erreicht wird.

Der Rezirkulationsfaktor kann auch als Mischungsbeiwert aufgefaßt werden. Die Temperaturkurven (Abb. 3) zeigen zwei charakteristische Spitzen, die kurz vor bzw. nach den Stromkenterungen auftreten, wenn nämlich die Geschwindigkeit im Tidefluß gegen Null geht und daher die Querausbreitung im Fluß vorherrschend wird. Ohne Mischung würde totale Rezirkulation erfolgen ( $\zeta = 1$ ;  $\zeta_\infty \rightarrow \infty$ ).

Mit Hilfe von Modellversuchen konnte die Rezirkulation eines Wärmekraftwerkes von 0,52 auf 0,23 verringert werden, d. h. um mehr als 50 %. Die Lösung war eine 30 m lange Stahlspundwand unterhalb des Auslaufbauwerkes. Die Lage der Einlauf- und Auslaufbauwerke zeigt die Abbildung 4, eine Aufnahme des Kraftwerkes im Modell aus der

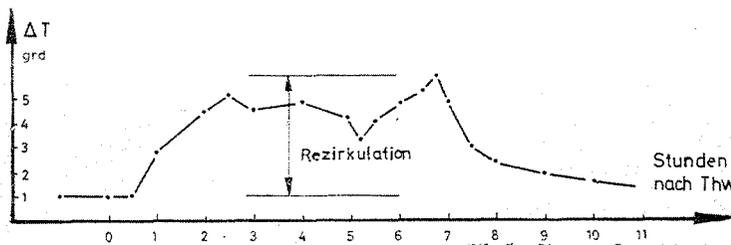


Abb. 3. Steigende Temperaturkurve während des Ebbstromes

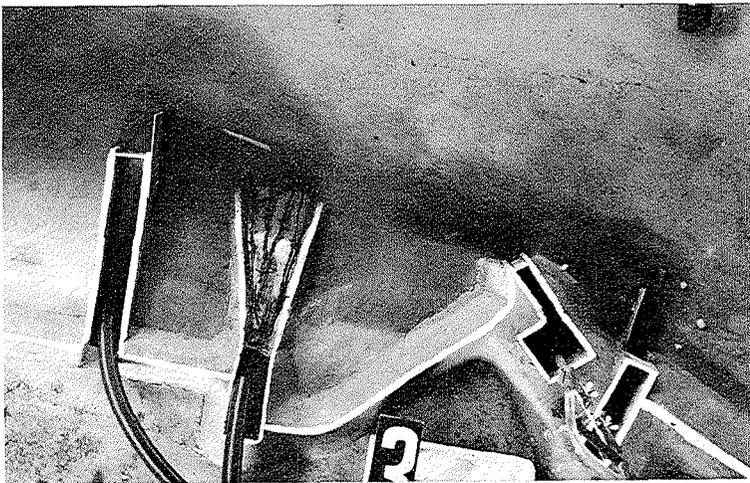


Abb. 4. Die Kraftwerke im Modell

Vogelperspektive; von links nach rechts: Einlaß, Auslaß des Kernkraftwerkes; Einlaß, Auslaß des Ölkraftwerkes.

Um den Einfluß des einen Kraftwerkes auf das andere bei den Untersuchungen zu trennen, wurde *Rhodamin-B* als Tracer verwendet. Dadurch konnte außerdem der Einfluß von Einleitungen aus früheren Tiden eliminiert werden.

### Ausbreitungsvorgang

Während der Kenterzeit kann eine bemerkenswert starke Querausbreitung beobachtet werden, die offenbar durch die größere initiale Strahlausbreitung hervorgerufen wird. Dabei weist die Fahne des eingeleiteten Wasserkörpers eine eigentümliche Form auf, die

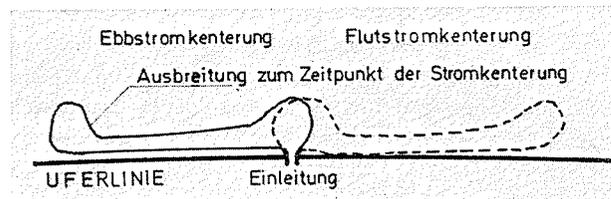


Abb. 5. Die Form der Fahne

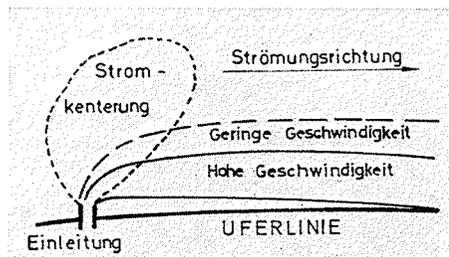


Abb. 6. Die Fahne bei verschiedenen Tidephasen

in Abbildung 5 wiedergegeben ist. Abbildung 6 zeigt die Verbreiterung der Fahne bei geringeren Fließgeschwindigkeiten. Aber die Querausbreitung ist auch im freien Strom während der Kenterungen wesentlich größer als bei hohen Fließgeschwindigkeiten des Flusses und beruht auf dem Vorhandensein großräumiger Wirbel. Das Zusammenwirken zwischen konvektivem Transport und turbulenter Diffusion beherrscht im wesentlichen den Ausbreitungsprozeß im Tidegebiet.

### Modellversuche

Eine gute Übereinstimmung zwischen Modell und Natur setzt sowohl eine genaue Nachbildung des Geschwindigkeitsfeldes als auch eine verhältnismäßig gute Übereinstimmung der turbulenten Diffusion während aller Tidephasen voraus.

Das letztere ist nur mit Hilfe eines bestimmten Maßstabsverhältnisses möglich, wobei

der Tiefenmaßstab  $\lambda_2 = \lambda_1^{3/4}$  sein muß (Beziehung der Verzerrung für turbulentes Fließen im rauhen Bereich,  $\lambda_1 =$  Längenmaßstab).

Diese Beziehung wird mittels der Dimensionsanalyse aus folgenden Gleichungen abgeleitet: der Gleichung von KOLMOGOROFF (1), der Gleichung der turbulenten Diffusion (2) und der Rauigkeitsbedingung  $\lambda_r = 1$  unter Verwendung der MANNING-STRICKLER-Formel (3), die für den turbulenten Abfluß im hydraulisch rauhen Bereich ( $Re > 1200$ ) maßgebend ist.

$$(1) \quad E = c \cdot G^{1/3} \cdot l^{4/3} \quad (\text{KOLMOGOROFF})$$

$E =$  Diffusionskonstante  
 $G =$  Energiedissipation pro Masseneinheit  
 $l =$  charakteristische Länge  
 $c =$  Konstante

$$(2) \quad -\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( E_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left( E_y \frac{\partial c}{\partial y} \right)$$

$$(3) \quad u = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2} \quad (\text{MANNING-STRICKLER})$$

Die Energiedissipation und die Reibung sind in diesem Bereich nur von  $\frac{h}{d}$  abhängig ( $h =$  Höhe des Widerstandes,  $d =$  Wassertiefe), das heißt nur von geometrischen Parametern, die leicht im hydraulischen Modell zu simulieren sind. Modelle im Maßstab 1:100 (Tiefen) und 1:500 (Höhen) erfüllen diese Bedingungen und haben gute Ergebnisse gezeigt.

### Vergleich von Modellergebnissen mit Naturmessungen

Verschiedene Naturmessungen wurden ausgeführt, um die Ergebnisse der Modellversuche bezüglich der Querausbreitung der Abwasser- bzw. Abwärmefahne zu verifizieren. Abbildung 7 zeigt die Querverteilung der Fahne  $1\frac{1}{2}$  Stunden vor Niedrigwasser, 90 m unterhalb des Auslasses und 3 m unter der Oberfläche (Test im Nahbereich). Sowohl Temperaturen als auch Rhodamin-Konzentrationen wurden in Natur und Modell gemessen. Letztere wurde mit einem Turner Fluorometer bestimmt. Die Ergebnisse der Natur-

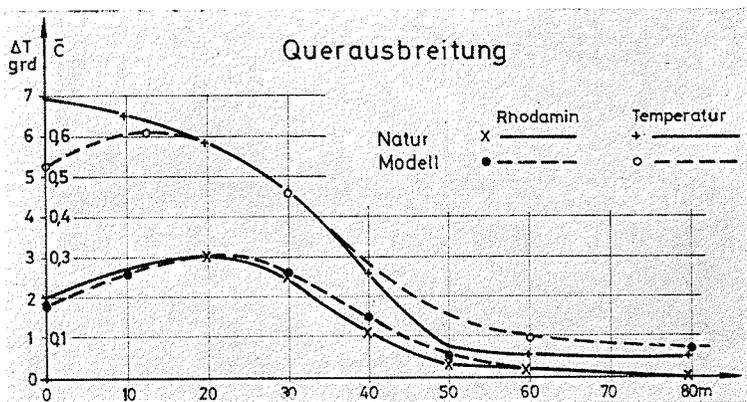


Abb. 7. Querverteilung  $1\frac{1}{2}$  Stunden vor Tnw

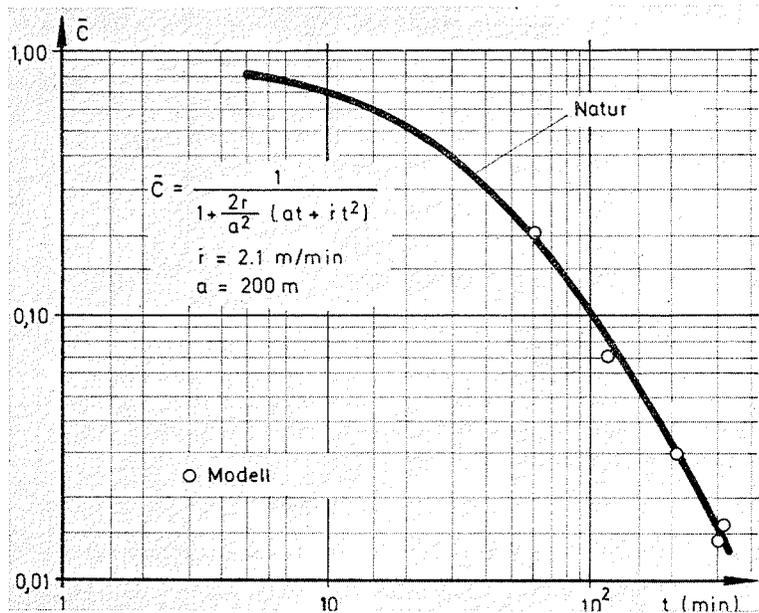


Abb. 8. Abnehmende Maximalkonzentration eines Farbflekes in Natur und Modell

messungen stimmen sehr gut mit den Modellmessungen überein. Der Vergleich zwischen der Ausbreitung eines Farbflekes in der Natur und im Modell wird durch das Diagramm der Abbildung 8 wiedergegeben. Abbildung 9 zeigt den *Rhodaminfleck* kurz nach der Einbringung durch ein Schiff von einem 200 m hoch fliegenden Flugzeug aus.

Die Registrierung von zeitabhängigen Temperatur- und Konzentrationskurven an festen Orten (Ganglinien) hat sich bei der Beurteilung von Einleitungen im Tidegebiet als vorteilhaft erwiesen, da hierbei Maximal- und Minimalwerte wiedergegeben werden (Abb. 10). Dadurch ist es auch möglich, den Einfluß aus früheren Tiden zu eliminieren. Die

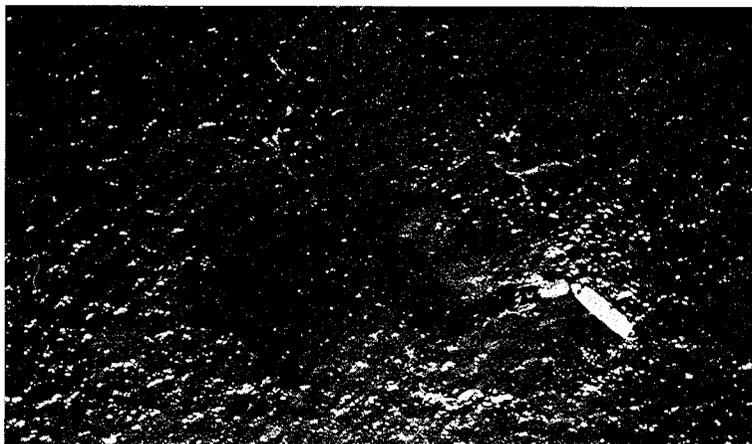


Abb. 9. Farbfleck aus 200 m Höhe

Schwingung rührt allein von der Tidebewegung her, und bereits nach etwa 5 bis höchstens 10 Tiden ist ein Gleichgewichtszustand praktisch erreicht.

### Verwendbarkeit von physikalischen Modellen

Durch Vergleich zwischen Natur- und Modellmessungen wird bestätigt, daß es möglich ist, in *einem* Modell nicht nur die Ausbreitung im Fernbereich zu simulieren, wo der Vermischungsvorgang von der freien Turbulenz des Flusses und seinem heterogenen Geschwindigkeitsfeld bestimmt wird, sondern auch die initiale Ausbreitung des eingeleiteten Strahles im Nah- und Übergangsbereich. In diesem Bereich sollten Ausdehnung und Verteilungsbild der Fahne zu allen Tidephasen korrekt simuliert werden. Dies ist möglich durch die Verwendung künstlicher Rauigkeitselemente im Auslaß.

Ergänzend zu den Ausführungen FLÜGGE und SCHWARZE (Beitrag S. 124) muß hervorgehoben werden, daß die Modellverzerrung nicht nur einer guten Simulierung der Wärmeabgabe im Modell dienlich ist, sondern daß sie darüber hinaus eine notwendige Voraussetzung für die Nachbildung dispersiver Vorgänge in hydraulischen Modellen darstellt. Die Maßstäbe können daher nicht frei gewählt werden, sondern sie sind an bestimmte Beziehungen und Bedingungen gebunden.

Die Verwendung der „charakteristischen Länge“ in KOLMOGOROFFS Gleichung (siehe oben) geschieht nur relativ, d. h., ohne die wirkliche Größe zu kennen. Sie wird nur in dimensionsloser Form in der angewandten Analyse verwendet. Praktisch betrachtet ist die „charakteristische Länge“ gleich dem Durchmesser der größten Wirbel, welche die volle Breite des Stromes ausfüllen können.

### Abbau bei Einleitungen

Organische Abwässer, radioaktive Kontaminierungen und Kühlwasser sind einem „Abbau“ ausgesetzt. Dieser Abbau kann nicht in physikalischen Modellen nachgebildet werden, sofern beständige Tracer verwendet werden. Es gibt aber die Möglichkeit, diesen Abbau nachträglich in die Konzentrationswerte einzurechnen, die das Modell auf Grund der rein dispersiven Prozesse (Konvektion und turbulente Diffusion) geliefert hat.

Dazu muß noch die jeweilige Abbaukurve bekannt sein. Wie die Abbildung 11 zeigt, wird eine Einleitung simuliert, die nur eine Tide währt. Die auftretenden Konzentrations- oder Temperaturwerte müssen dann reduziert werden, indem man sie mit der jeweiligen Abbaurate multipliziert. Eine folgende Integration ergibt dann die gewünschte Kurve für die Einleitung eines unbeständigen Stoffes an dem betreffenden Meßpunkt im Ästuar. Der Zeitschritt der Integration ist bei dieser Rechnung eine Tide, also 12 Stunden und 25 Minuten.

### Zusammenfassung

FROUDESche Tidemodelle haben sich neben zweidimensionalen mathematischen Modellen als brauchbares Mittel erwiesen, um Informationen über die Konzentration von Stoffen (oder Wärme) zu erhalten, wenn diese in Tidegewässer eingeleitet werden. Der Abbau von unbeständigem Stoff (Abwasser, Wärme) kann durch die Verwendung der Abbaukurve berücksichtigt werden. Die Höhenverzerrung ist zur Nachbildung der Turbu-

lenz erforderlich. Eine Verzerrung von 1:500/1:100 und die Verwendung von speziellen Rauigkeitselementen hebt offenbar die Wirkung einer unterschiedlichen turbulenten Diffusion in horizontaler und vertikaler Richtung entsprechend der Theorie auf. Der Fließvorgang sollte auf jeden Fall turbulent sein und im hydraulisch rauhen Bereich liegen.

#### S c h r i f t e n v e r z e i c h n i s

1. CRICKMORE, 1972: Tracer tests of eddy diffusion in field and model, Proc. of the ASCE HY 10.
2. OHLMEYER/VOLLMERS, 1973: Thermal and sewage pollution in tidal areas, Proc. of the 15th IAHR Congress, Vol. 2, Istanbul.