

## 15. Beschreibung von Einleitungsvorgängen in Gewässern

H. Kobus

### 15.1 Einleitung

Für die Planung im Gewässerschutz ist es wesentlich, die Schadstoffkonzentrationen im Gewässer zu kennen. Man braucht Vorhersagemethoden, mit deren Hilfe die Schadstoffkonzentrationen an jedem Ort des Gewässers und zu jedem Zeitpunkt als Folge der jeweils vorgegebenen Einleitungsverhältnisse bestimmt werden können. Hierzu sind Dispersionsmodelle erforderlich, welche die komplexen Ausbreitungs- und Transportvorgänge in natürlichen Gewässern beschreiben. Die Kenntnis der grundlegenden Gesetzmäßigkeiten solcher Strömungsvorgänge ist als Basis jeglicher planerischer Gewässerschutzmaßnahme unerlässlich.

In der Planung ist man darauf angewiesen, komplexe Zusammenhänge vereinfachend zu erfassen und auf eine allzu ängstliche Beachtung des Details zu verzichten. Deshalb soll hier zunächst der Frage nachgegangen werden, weshalb Einleitungsvorgänge überhaupt im Einzelnen untersucht werden müssen, und welche Methoden zur Beschreibung von Ausbreitungs- und Transportvorgängen zur Verfügung stehen. Die Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen dieser Methoden sollen anhand von zwei Beispielen erläutert werden. Im ersten Beispiel wird gezeigt, welche Rolle der Beschreibung der Einleitvorgänge bei der Planung einer Abwassereinleitung ins Meer zukommt, und als zweites Beispiel wird die Einleitung erwärmten Kühlwassers in einen Fluß diskutiert. Anhand dieser beiden sehr unterschiedlichen Einleitungsarten in sehr unterschiedliche Gewässerkörper soll der derzeitige Wissensstand über Einleitungsvorgänge in Gewässer und deren Modellbeschreibung illustriert werden.

Die Bemühungen um die Reinhaltung unserer Umwelt müssen primär darauf ausgerichtet sein, die anfallenden Schmutzmengen durch verfahrenstechnische und siedlungswasserwirtschaftliche Maßnahmen zu reduzieren. Selbst bei noch so intensiven Bemühungen in der Abwasserreinigung wird dennoch stets ein erheblicher Anteil von Stoffen übrig bleiben, der in der natürlichen Umgebung zur Dispersion gelangen muß. Dies wird deutlich, wenn man sich die verschiedenen Möglichkeiten der Handhabung und Beseitigung von Schmutzstoffen in flüssiger, gasförmiger oder fester Form vor Augen hält (Abb. 1). Schmutzstoffe müssen gesammelt werden und – mit oder ohne Behandlung, beispielsweise in einer Kläranlage – entweder einer Wiederverwendung zugeführt, abgelagert, oder in der natürlichen Umgebung, also in der Atmosphäre oder in Gewässern, dispergiert werden. Auch bei der Verbrennung werden die Schmutzstoffe letztlich zum Teil in der Atmosphäre dispergiert und zum Teil abgelagert. Unabhängig von den jeweiligen Wegen gibt es grundsätzlich nur zwei mögliche Endstationen:

die Schmutzstoffe müssen entweder in geeigneter Art und Weise abgelagert oder aber wieder der natürlichen Umgebung zugeführt werden, wobei lokale exzessive Anreicherungen vermieden werden müssen [1]. Unabhängig von allen Bemühungen der Abwasserreinigung wird man sich deshalb auch zukünftig mit der Einleitung und Ausbreitung von Schmutzstoffen in natürlichen Gewässern befassen müssen.

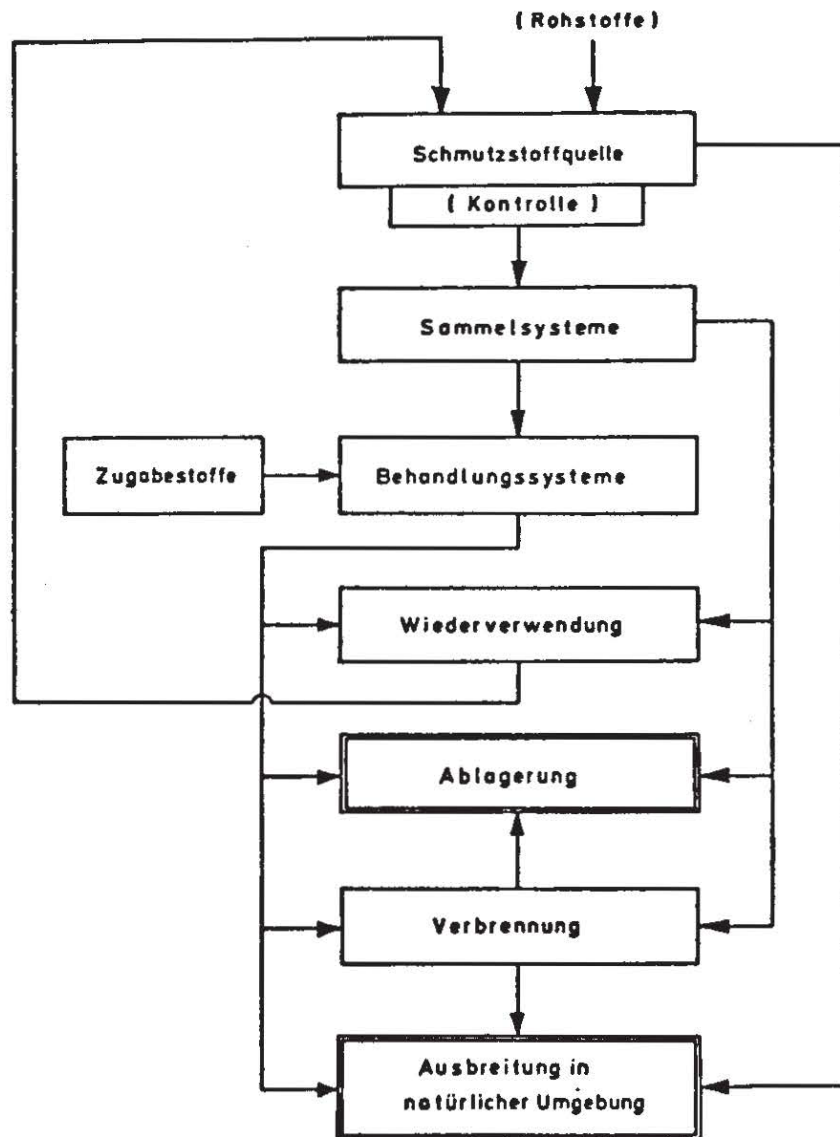


Abb. 1: Schmutzstoff-Flußdiagramm

Hierbei stellen sich vielfältige Aufgaben (Abb. 2): Die Gesetzmäßigkeiten müssen erforscht werden, nach denen der Transport in der Umgebung erfolgt, welche Kontakte sich hieraus mit Mensch, Tier und Pflanze ergeben, und welche kurz- oder langfristigen Auswirkungen diese Kontakte haben. Hieraus lassen sich Kriterien für die Anforderungen an die Wassergüte formulieren. Solche Kriterien werden im allgemeinen in Form von Grenzwerten für Schmutzstoffkonzentrationen ausgedrückt, die aufgrund naturwis-

senschaftlich-medizinischer Erkenntnisse unter Berücksichtigung volkswirtschaftlicher Gesichtspunkte festgelegt werden müssen. Dem Ingenieur stellt sich hier vorrangig die Frage, wie sich geeignete Einleitungsbestimmungen formulieren lassen: die Frage also, wie, wo und wann wieviel Schmutzstoffe eingeleitet werden dürfen, ohne daß die geforderte Gewässergüte ungebührlich beeinträchtigt wird. Diese Kernfrage läßt sich nur beantworten, wenn die Gesetzmäßigkeiten bekannt sind, nach denen der Transport und Abbau der Schmutzstoffe erfolgt.

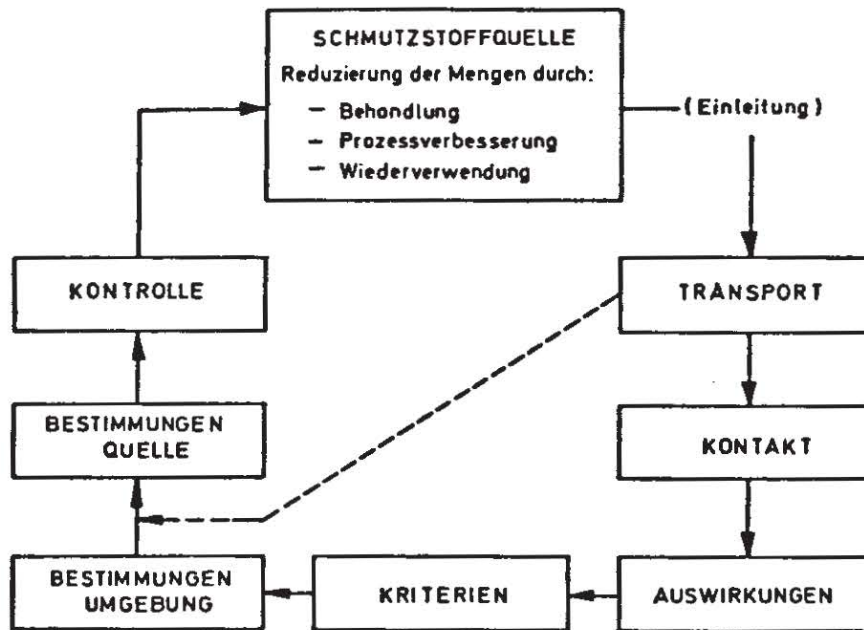


Abb. 2: Umweltbelastung durch Schmutzstoffe: Aufgabenkreise

Hierzu sei von vorneherein festgestellt, daß universelle Vorhersagemodelle nicht existieren, und daß eine einfache Antwort auf die gestellte Frage nur in wenigen Fällen möglich ist. Hierfür die notwendigen Grundlagen zu erarbeiten, ist eine Forschungsaufgabe in der Strömungstechnik, der sich eine Gruppe von Wissenschaftlern an der Universität Karlsruhe widmet [2]. Hierbei werden analytische und experimentelle Untersuchungen durchgeführt, mit dem Ziel, hydrodynamische (numerische oder physikalische) Modelle zu entwickeln, welche die Ausbreitungs- und Transportvorgänge möglichst naturnah beschreiben. Daß solche Modelle meist komplex sind und jeweils nur einen begrenzten Anwendungs- oder Teilbereich darzustellen vermögen, liegt in der Natur der Aufgabe: Es gibt sicher nur wenige Bereiche des Ingenieurwesens, in denen eine derartige Vielzahl von Einflußgrößen Berücksichtigung finden muß wie gerade die Untersuchung von Wassergütefragen. Wegen dieser Vielzahl von Einflußgrößen ist es besonders wichtig, die Voraussetzungen und Annahmen des jeweiligen Modells zu kennen und sorgfältig zu beachten [3].

## 15.2 Klassifizierung

Die Vielzahl der Einflußgrößen, die bei der Einleitung und Ausbreitung von Abwasser oder Warmwasser eine maßgebliche Rolle spielen können, ist in Abb. 3 dargestellt. Die Temperatur- bzw. Schmutzstoffverteilung in einem natürlichen Gewässer wird bestimmt durch die „natürlichen“ Gegebenheiten des Wasserkörpers (ohne menschliche Eingriffe) und durch Art, Menge und Ort der Warmwasser- bzw. Schmutzstoffeinleitungen. Ob und inwiefern die in Abb. 3 aufgezählten Parameter für das Konzentrations- bzw. Temperaturfeld von Bedeutung sind, hängt wesentlich vom Bezugsmaßstab der Betrachtung ab. Die aufgeführten Parameter verlieren mit zunehmendem Abstand von der Einleitungsstelle an Bedeutung, und zwar in der Reihenfolge ihrer Aufzählung. Dies ermöglicht, folgende Bereiche zu unterscheiden:

1. Unmittelbar bauwerksnaher Bereich (Ausdehnung bis ca.  $10D$ , wobei  $D$  die Hauptabmessung des Einleitungsquerschnitts ist). Hier müssen alle Einleitungsparameter berücksichtigt werden, während die Gewässerparameter bedeutungslos sind.
2. Nahfeld (Ausdehnung von ca.  $10 D$  bis einige  $100 D$ ). Neben den Einleitungsparametern  $Q_o$ ,  $M_o$  und  $W_o$  sind hier Wassertiefe, Quergeschwindigkeit und Dichtegradienten von Bedeutung.

(A) Einleitungsparameter:

Geometrie des Auslasses

Geometrie des Auslaßbauwerks

Massenfluß  $Q_o$

Impulsfluß  $M_o$  nach Größe und Richtung

Auftrieb  $W_o$  (gegeben durch den Massenfluß  $Q_o$  und die Dichtedifferenz zwischen eingeleitetem und Empfängerfluid)

(B) Gewässerparameter:

Gewässertiefe  $H$

Durchfluß  $Q_H$  oder Quergeschwindigkeit  $U_H$

Vertikale Dichteschichtung oder horizontale Dichtegradienten im Gewässer

Bodenreibung

Windeinwirkung

Abbauvorgänge (z.B. chemische Reaktionen, Wärmeaustausch an der Gewässeroberfläche, etc.)

Seitliche Begrenzung des Gewässers

Coriolisbeschleunigung (bei großräumigen Betrachtungen)

**Abb. 3: Einflußgrößen bei Einleitungsvorgängen in Gewässern**

3. Zwischenbereich (Bereich der Wechselwirkungen zwischen Nah- und Fernfeld). Hier sind zusätzlich Bodenreibung, Abbauvorgänge bzw. der Wärmeaustausch an der Oberfläche sowie die Windschubspannung von Bedeutung.

Die wesentlichen Merkmale des Nah- und Fernfeldes sind in Abb. 4 einander gegenübergestellt. Die maßgebenden Zusammenhänge im Nahfeldbereich lassen sich im physikalischen Modell zuverlässig vorhersagen bzw. in einfachen Fällen auch analytisch beschreiben. Fernfeld-Ausbreitungsvorgänge werden mit Hilfe von hydrodynamisch-numerischen Modellen untersucht. Schwierigkeiten bereitet vor allem der Übergangsbereich, der weder analytisch-numerisch noch im physikalischen Modell befriedigend simuliert werden kann [4].

<b>NAHFELD</b>	<b>FERNFELD</b>
<b>Einleitungsparameter dominieren</b>	<b>Gewässerparameter dominieren</b>
<b>Starke , aktive Durchmischung</b>	<b>Schwache , passive Durchmischung</b>
<b>Impulsfluß und Auftrieb beeinflussen das Strömungsfeld</b>	<b>Einleitung hat keine dynamischen Auswirkungen auf das Strömungsfeld</b>
<b>Durchmischung infolge Einleitungsbedingungen : durch Menschen beeinflussbar</b>	<b>Durchmischung infolge natürlicher Prozesse : durch Menschen nicht beeinflussbar</b>

Abb. 4: Einflußbereiche bei Einleitungen

Einleitungs- und Ausbreitungsvorgänge können entweder nach der Einleitungsart oder nach dem Gewässerkörper klassifiziert werden, in den die Einleitung erfolgt. Daß sich je nach Gewässertyp sehr unterschiedliche Problemstellungen ergeben, wird direkt ersichtlich, wenn man die Größenordnung der Aufenthaltszeiten – einfach definiert als das Gewässervolumen dividiert durch den Durchfluß pro Zeiteinheit – für verschiedene Gewässerarten betrachtet (Abb. 5). Während der gesamte Wasserinhalt eines Flusses innerhalb von Tagen oder Wochen vollständig erneuert und ausgetauscht wird, erfordert dieser Austausch in Seen oder Grundwasserleitern sehr viel größere Zeiträume, und die Verweilzeit im Meer muß nach geologischen Zeitmaßstäben gemessen werden. Die Verweilzeiten dienen gleich-

zeitig als Zeitmaßstab dafür, wie rasch sich Verschmutzungserscheinungen durch konservative Substanzen (oder Sanierungsmaßnahmen) in einem Gewässer insgesamt bemerkbar machen: Während ein Fluß sehr rasch reagiert, kann dies in einem See oder einem Grundwasserleiter sehr lange dauern.

Eine Klassifizierung nach den Einleitungsparametern ist in Abb. 6 gegeben. Kühlwasser- oder Abwassereinleitungen erfolgen fast ausnahmslos als Auftriebsstrahlen in der einen oder anderen Form. Das Strömungsfeld bei Einleitung in ein ausgedehntes ruhendes Medium ohne Dichteschichtung wird durch den Impuls und den Auftrieb des eingeleiteten Strahls bestimmt. Eine stabile Dichteschichtung hat drastische Auswirkungen auf das Strömungsfeld, weil sich der Auftrieb des Strahlfluids mit der Höhe ändert. Auch eine Grundströmung bewirkt eine Umlenkung und damit eine vollständige Veränderung des Strömungsfeldes. Einfache axial- oder plansymmetrische

Flüsse	$10^{-3} - 10^{-1}$	Jahre	Abb. 5: Typische Verweilzeiten in Gewässern
Ästuarien	$10^{-1} - 10^0$	Jahre	
Seen	$10^{-1} - 10^2$	Jahre	
Grundwasserbecken	$10^0 - 10^4$	Jahre	
Gletscher	$10^2 - 10^4$	Jahre	
Meer	$\rightarrow \infty$ ( $\sim 10^6$ )	Jahre	

Empfänger-Fluid Strahl	Homogenes, ruhendes Medium	Einfluß einer Dichteschichtung	Einfluß einer Grundströmung
	$q_e = \text{const}$ $U_H = 0$	Stabile Schichtung $\rho(z)$ $U_H = 0$	$q_e = \text{const}$ $U_H = \text{const}$
Impulsstrahl ( $M_0$ maßgebend)			
Auftriebstrahl mit Impuls ( $M_0$ und $W_0$ maßgebend)			
Auftriebstrahl ( $W_0$ maßgebend)			

Abb. 6: Einteilung von Auftriebstrahlströmungen

Strahlströmungen lassen sich analytisch behandeln. Für alle dreidimensionalen Strömungsfelder ist es jedoch unerlässlich, die auftretenden Ausbreitungsvorgänge experimentell zu untersuchen. Numerische Lösungen der (vereinfachten) Gleichungen sind zwar möglich, bedürfen jedoch gleichwohl des Experiments zur Ermittlung der turbulenten Austauschkoefizienten bzw. äquivalenter Beiwerte [5, 6].

### 15.3 Methoden

Als Behandlungsmethoden und Hilfsmittel zur Beschreibung von Einleitungsvorgängen stehen grundsätzlich physikalische und mathematische Modelle zur Verfügung [7]. Ein Vergleich der beiden Methoden (Abb. 7)

SCHRITT	MATHEMATISCHES MODELL	PHYSIKALISCHES MODELL
1	Definition der Aufgabenstellung	
2	Identifizierung der wesentlichen wirksamen Kräfte	
3	Aufstellung des Gleichungssystems	Aufstellung der Ähnlichkeitsforderungen
4	Formulierung der Randbedingungen	
5	Entwicklung eines numerischen Lösungsverfahrens	Bau eines Modells
6	"Einspielen": Eichen des Modells (Variation der Beiwerte)	(Variation der Rauigkeit o.ä.)
7	Rechnung → Lösung	Messung → Lösung
8	Optimierung der Lösung gemäß Aufgabenstellung (Variation der Eingabedaten)	(Modellumbauten)
9	Umrechnung auf Naturverhältnisse und Überprüfung	

Abb. 7: Einsatz mathematischer und physikalischer Modelle zur Lösung von Ingenieurproblemen

macht deutlich, daß physikalische und mathematische Modelle sehr vieles gemeinsam haben. Beiden muß eine konzeptionelle Phase vorausgehen, in der die fundamentalen physikalischen Zusammenhänge identifiziert werden, die das Modell simulieren soll. Dem Aufwand für die Konstruktion eines physikalischen Modells steht der Aufwand zur Ausarbeitung eines Lösungsschemas für das mathematische Modell gegenüber. Beide Methoden müssen sich gewisser Vereinfachungen und Näherungen bedienen und müssen auf die tatsächlichen Naturgegebenheiten erst „eingespielt“ werden

– im einen Fall durch Anpassung der empirischen Beiwerte, im anderen durch Änderung der Modellrauhigkeit. Der wesentliche und prinzipielle Unterschied zwischen den beiden Verfahren besteht darin, daß ein mathematisches Modell die Formulierungen der Gleichungen erfordert, die das Strömungsfeld beschreiben – was immer nur dann zuverlässig geschehen kann, wenn ein klares physikalisches Verständnis der zu untersuchenden Strömungsvorgänge vorliegt. Im Gegensatz hierzu erfordert ein physikalisches Modell nur die ungleich einfachere Identifizierung der wesentlichen wirksamen Kräfte und hieraus die Formulierung von Ähnlichkeitsparametern. Für nicht eindeutig geklärte Strömungskonfigurationen stellt daher das physikalische Modell stets den zuverlässigeren Weg dar.

DER TURBULENTE DISPERSIONSKOEFFIZIENT  $K_L$   
 IN EINDIMENSIONALEN MATHEMATISCHEN  
 MODELLEN ENTHÄLT:

- molekulare Diffusionsvorgänge;
- Diffusion infolge turbulenter Schwankungen;
- Dispersion zufolge vertikaler Geschwindigkeitsgradienten;
- Dispersion zufolge horizontaler Geschwindigkeitsgradienten;
- Dispersion zufolge Sekundärströmungen oder Strömungsrichtungsänderungen im Querschnitt;
- Effekt von Ablösezonen (formbedingte Zirkulation)
- im Modell nicht erfasste Schwerkrafteinflüsse (vertikale und/oder horizontale Zirkulation);
- im Modell nicht erfasste Windeinwirkungen (vertikale und/oder horizontale Zirkulation);
- aktive Dispersion (einleitungsbedingte Zirkulation);

Abb. 8: Dispersionskoeffizient  $K_L$

Jedes mathematische Modell einer turbulenten Strömung muß notwendigerweise einen Ansatz für die Wirbelviskosität (oder die Reynold-schen Scheinspannungen) enthalten, welcher die Qualität des Modells insgesamt bestimmt. Es ist meist schwierig, für die turbulenten Diffusionskoeffizienten realistische Annahmen zu treffen – insbesondere in den vereinfachten ein- oder zweidimensionalen Gleichungssystemen, in denen diese Koeffizienten zu einem Sammelbecken für eine Reihe nicht erfaßter physikalischer Einflüsse werden (Abb. 8).



Das Hauptanliegen der Grundlagenforschung zur Entwicklung numerischer Dispersionsmodelle liegt deshalb darin, verbesserte Turbulenzmodelle zu entwickeln, welche universell für eine Vielzahl bzw. letztlich alle Strömungskonfigurationen Gültigkeit haben sollen. Erst wenn solche universell gültigen Turbulenzmodelle verfügbar sind und durch Labor- und Naturmessungen ihre Bestätigung gefunden haben, wird es möglich sein, echte numerische Vorhersagemodelle zu erstellen. Bis dahin werden wir uns damit begnügen müssen, daß unsere numerischen Modelle der Justierung der Bewerte anhand von Naturmessungen oder Labordaten bedürfen und deshalb keinen echten Vorhersagecharakter haben können.

Physikalische Modelle bieten eine wertvolle Alternative und Ergänzung zu den mathematischen Modellen. Die Einsatzmöglichkeiten und Grenzen solcher Modelle lassen sich am deutlichsten anhand der Ähnlichkeitsforderungen aufzeigen, denen solche Modelle genügen müssen. In Abb. 9 sind die Ähnlichkeitsforderungen für den Fall einer Kühlwassereinleitung zusammengestellt. Die wesentlichen Aussagen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Geometrische Gegebenheiten sowie Oberflächenspannungs- und Zähigkeitseinfluß bestimmen das größtmögliche Längenverhältnis (im allge-

Abb. 9: Modellgesetze für Kühlwassereinleitungen

Darzustellende Grösse	Kenngröße	Ähnlichkeitsgesetz	Angenäherte Ähnlichkeit	Modellregeln	Modellmaßstäbe
Geometrie Trägheitsreaktionen und Druckkräfte	$l_r = \frac{l_p}{l_m}$ $y_r = \frac{y_p}{y_m}$	$l_r = \text{const}$ $y_r = \text{const}$	—	(Überhöhung) max 1:10	bestimmen Wahl der Längenmaßstäbe
Oberflächen- Spannung	$W = \frac{\sigma}{\sqrt{\delta/\rho l}}$	$W_r = \frac{W_p}{W_m} = 1$	$W_m > W_{\text{krit}}$	$y_m > 2 \div 3 \text{ cm}$	
Zähigkeit	$R = \frac{\sigma l}{\mu/\rho}$	$R_r = 1$	$R_m > R_{\text{krit}}$	Strahl: $\frac{u_s d_s}{\mu/\rho} > 3000$ Gerinne: $\frac{\bar{u} \cdot y}{\mu/\rho} > 500$	
Schwerkraft	$F = \frac{\sigma}{\sqrt{g y}}$	$F_r = 1$	bei $F \rightarrow 0$ (Seen, Becken) ohne Bedeutung	$\bar{u}_r = y_r^{1/2}$	diktiert Geschwindigkeits- maßstab $\bar{u}_r$
Auftrieb	$F_D = \frac{\sigma}{\sqrt{\frac{\rho}{\rho_f} g y}}$	$F_{Dr} = 1$	—	$\left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)_r = u_r^2 y_r^{-1} (=1)$	diktiert Dichtemaßstab $\left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)_r$
Reibung	Rauhigkeit $k_r$ oder $\lambda_r (R_i, \frac{4 R_h}{k})$	$k_r = 1$ oder $\lambda_r = 1$	entsprechend $R_m$ geringere Modellrauhigkeit	kann Überhöhung des Modells notwendig machen	diktiert Modellrauhigkeit bzw. Überhöhungsfaktor(1)
Wärmeabgabe	Exponent des Abkühlgesetzes: $\frac{K \cdot l}{(\rho c_p) y \bar{u}}$	$\frac{K_r \cdot l_r}{y_r \cdot \bar{u}_r} = 1$ (mit $(\rho c_p)_r = 1$ )	—	in Froude-Modell $K_r = y_r^{3/2} \cdot l_r^{-1}$ $(K_r \approx \frac{4}{3})$	diktiert einen Überhöhungsfaktor (2) (Nachbildung der atmosphärischen Bedingungen)

meinen einige hundert für unverzerrte und ca. 1000 für überhöhte Modelle.). Insbesondere muß sichergestellt werden, daß die Turbulenz der Strömung modellgerecht simuliert wird.

- In Fließgewässern bestimmt die Froude-Zahl  $Fr$  den Geschwindigkeitsmaßstab, und die Einhaltung der densimetrischen Froude-Zahl  $Fr_D$  erfordert identische Dichteunterschiede in Modell und Natur. In stehenden oder sehr langsam fließenden Gewässern kann  $(\Delta\rho/\rho)_r$  von 1 verschieden gewählt werden: Der Geschwindigkeitsmaßstab wird dann durch die densimetrische Froude-Zahl bestimmt.
- Korrekte Nachbildung der Bodenreibung erfordert stets kleinere relative Rauigkeiten im Modell und kann häufig nur durch Wahl einer Modellüberhöhung erreicht werden.
- Korrekte Nachbildung der Wärmeabgabe an der Oberfläche erfordert eine Modellüberhöhung, die im allgemeinen nicht mit den Rauigkeitsforderungen übereinstimmt.

Durch die Ähnlichkeitsforderungen einerseits und die maximal realisierbare Modellgröße andererseits sind Grenzen für die Gebietsgrößen gesetzt, die im physikalischen Modell naturgetreu abgebildet werden können. Aufgrund der Wassertiefenverhältnisse (in der Natur einige Meter, im Modell einige Zentimeter) kann der vertikale Längenmaßstab bestenfalls in der Größenordnung (100) gewählt werden, und bei einer Höhenverzerrung der horizontale Längenmaßstab in der Größenordnung (1000). Setzt man als Größenordnung der maximalen Modellausdehnung 100 m an, dann ergibt sich hieraus als Anhaltswert für die maximal darstellbare Gebietsgröße die Größenordnung von 10 km im unverzerrten bzw. 100 km im überhöhten Modell.

Allerdings können Ausbreitungsvorgänge im überhöhten Modell nur unter stark einschränkenden Bedingungen simuliert werden; insbesondere lassen sich Einleitungen an Flüssen nur im unverzerrten Modell naturgetreu nachbilden [6].

Bei der Entwicklung von Vorhersagen für Einleitungs- und Ausbreitungsvorgänge haben sowohl das physikalische als auch das mathematische Modell ihren Platz und müssen sich gegenseitig ergänzen. Eine Kombination aus physikalischem Modell für den Nahbereich und mathematischem Modell für den Fernbereich hat sich bei der Bearbeitung zahlreicher praktischer Probleme gut bewährt, wenngleich unter Umständen im Übergangsbereich Formulierungs- bzw. Darstellungsschwierigkeiten auftreten können [8, 7].

#### 15.4 Abwassereinleitung ins Meer

Die Rolle, die der Beschreibung von Einleitungsvorgängen in der Wasser-  
gütetechnischen Planung zukommt, soll am Beispiel einer Abwassereinlei-

tung ins Meer verdeutlicht werden. Betrachtet man die verschiedenen Möglichkeiten der Abwasserbehandlung und -beseitigung im Küstengebiet, dann stellt die jeweilige Kombination einer Kläranlage mit einem Einleitungsbauwerk ein System dar, das einerseits den Anforderungen an die Gewässerqualität gerecht werden muß und andererseits nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten optimiert werden muß. Bei Abwassereinleitung ins offene Meer kann eine sehr viel stärkere hydrodynamische Verdünnung erzielt werden als im Fluß oder Ästuar: Dies bedeutet auch, daß in diesem Fall eine vergleichsweise geringere Reinigungsleistung der Kläranlage ausreichend ist.

Der Entwurf eines Systems zur schadlosen Abwassereinleitung ins Meer stellt den Bauingenieur vor siedlungswasserwirtschaftliche, strömungsmechanische, konstruktive und bautechnische Aufgaben und erfordert zudem eine enge Zusammenarbeit mit Biologen und Ozeanographen (Abb. 10). Die

1. Festlegung der Wassergütebestimmungen und der Gebiete, in denen diese eingehalten werden müssen
2. Studie der ozeanographischen Verhältnisse (Strömungen, Dichteschichtungen, Topographie)
3. Standortwahl unter Berücksichtigung der Landnutzung
4. Strömungsmechanisch-ozeanographischer Entwurf
5. Strömungsmechanisch-hydraulischer Entwurf des Auslaßbauwerks und seiner Zuleitungen
6. Entscheidung aufgrund wirtschaftlicher und raumplanerischer Überlegungen

Abb. 10: Planung von Abwassereinleitungen ins Meer

strömungsmechanischen Entwurfsaspekte betreffen die ordnungsgemäße Funktion des Bauwerks und die Frage, ob unter den vorgegebenen Verhältnissen die Einleitung nach Ort und baulicher Gestaltung so ausgebildet werden kann, daß sie den gestellten Anforderungen an die Wassergüte (insbesondere in der Uferzone) gerecht wird. Das Ergebnis des vielschichtigen Planungsprozesses ist dann schließlich ein Einleitungsbauwerk der in Abb. 11 gezeigten Art. Es besteht aus einer am Meeresboden verlegten Pipeline, die im wesentlichen rechtwinklig zum Ufer angeordnet wird und im allgemeinen mehrere Kilometer lang ist. Am Ende der Pipeline schließt sich ein Diffusor mit zahlreichen kleinen Öffnungen an, durch die das Abwasser über eine große Länge dem Meer zugeführt wird. Für den Reinigungseffekt einer solchen Abwassereinleitung ist sowohl die Durchmischung und Verdünnung mit dem Meerwasser maßgebend, als auch chemisch-biologische Abbau- und Entkeimungsprozesse und Flockungs- und Absetzvorgänge [9].

Bei näherem Betrachten lassen sich bei Abwassereinleitungen ins Meer drei aufeinanderfolgende Phasen unterscheiden, die durch abnehmende In-

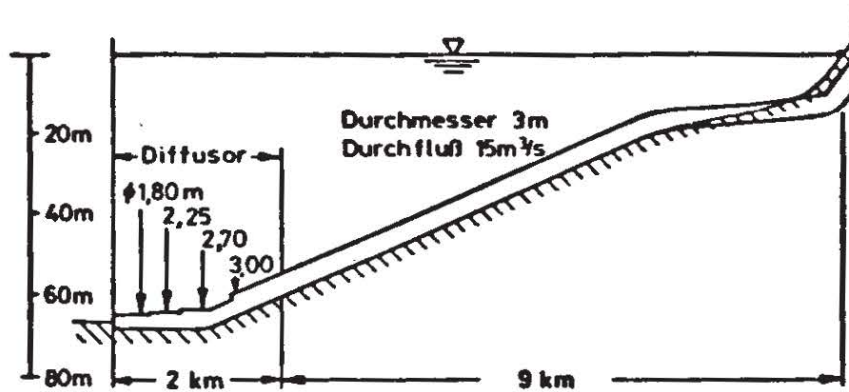
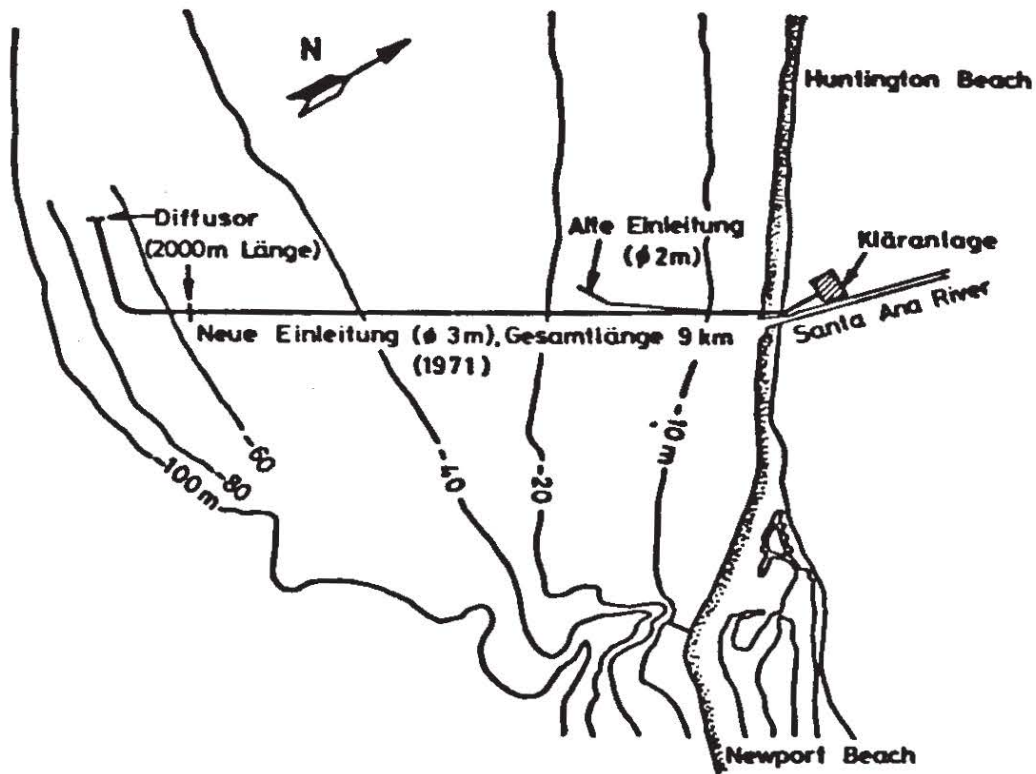


Abb. 11: Beispiel einer Abwassereinleitung ins Meer (Orange County Submarine Outfall, California, USA (9))

tensität der Durchmischung bei zunehmenden Bezugsmaßstäben für Ort und Zeit gekennzeichnet sind (Abb. 12). Das eingeleitete Abwasser besitzt sowohl kinetische Energie infolge der Austrittsgeschwindigkeit als auch potentielle Energie infolge des Dichteunterschieds zwischen dem spezifisch leichteren Abwasser und dem Meerwasser. Es entsteht eine impuls- und auftriebsbedingte Strahlströmung, bei der sich Fluid mit verhältnismäßig großer Geschwindigkeit relativ zum umgebenden Fluid bewegt. Infolge der turbulenten Durchmischung in Strahlrichtung wird ständig Fluid aus der Umgebung in die Strahlströmung eingemischt, was eine zunehmenden „Verdünnung“ des ursprünglichen Strahlfluids, also eine Abnahme der Schmutzstoffkonzentration mit wachsender Entfernung von der Zugabestelle bewirkt. In der Phase der Einschichtung (Bereich 2) breitet sich das verdünnte Abwasser in der Horizontalen aus – entweder an der Wasseroberfläche oder

im dichtgeschichteten Gewässer in Höhe seiner „neutralen Schicht“ (in der die Dichte in Strahl und in der Umgebung gleich groß ist), wobei die horizontale Ausbreitung mit einer Tendenz zur Verringerung der Schichtdicke verbunden ist. Nachdem die Einleitungsenergie aufgezehrt ist, bleibt das verdünnte Abwasser noch immer in einem „Feld“ konzentriert, verhält sich aber wie das umgebende Meerwasser und wird von den vorherrschenden Strömungen „passiv“ mittransportiert – etwa wie die Rauchfahne einer Schornsteinemission passiv vom Wind in der Atmosphäre mitgeführt wird. Auch in dieser dritten Phase findet noch eine Durchmischung infolge der natürlichen Turbulenz der Meeresströmung statt, doch ist diese sehr viel schwächer als im Bereich der aktiven Durchmischung.

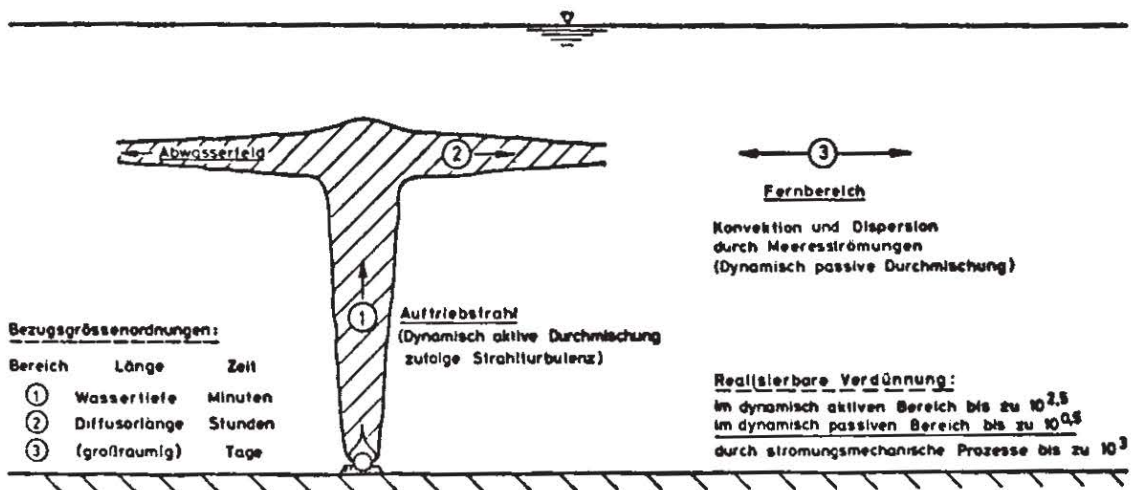


Abb. 12: Strömungsmechanische Prozesse bei der Einleitung von Abwasser ins Meer

Wenn man sich vor Augen hält, daß der in unmittelbarer Umgebung der Einleitungen in sehr kurzer Zeit erreichbare Verdünnungseffekt infolge der Strahlerturbulenz generell um zwei Größenordnungen über der Durchmischungswirkung natürlicher Prozesse liegt, dann wird ohne weiteres klar, daß der Behandlung dieses Bereichs hier die zentrale Bedeutung zukommt. Gerade dieser Nahfeldbereich läßt sich mit unseren heutigen Erkenntnissen zufriedenstellend beschreiben, so daß auch eine gezielte Optimierung von Diffusoren möglich ist. Über den Bereich der Einschichtung hingegen ist nur wenig bekannt; hier ist man zu einem gut Teil auf ingenieurmäßige Intuition und Abschätzung angewiesen. Für den Fernbereich schließlich existieren Vorhersagemodelle, die bei entsprechender Kenntnis der natürlichen ozeanographischen Strömungen eine ausreichend genaue Vorhersage des Transports und der Durchmischung von Abwasserfeldern erlauben [10].

In Situationen, in denen der Abtransport durch die Meeresströmung sehr gering ist, kann die Schichtdicke des Abwasserfeldes stark anwachsen und sich im Extremfall ( $U_H = 0$ ) über die gesamte Wassertiefe erstrecken.

Unter solchen Umständen ist klar, daß die Verdünnungswirkung der Auftriebsstrahlen nicht mehr zum Tragen kommen kann. Vielmehr wird jetzt die anfängliche Verdünnung gänzlich vom Abtransport des Abwassers durch die Meeresströmung kontrolliert, also durch die Wassertiefe und die Strömungsgeschwindigkeit  $U_H$ , und die Dynamik des Auftriebstrahls wird für die Verdünnung bedeutungslos. Dies ist beispielsweise bei Kühlwassereinleitungen mit großen Einleitungsmengen bei geringen Wassertiefen häufig der Fall.

Schließlich ist noch darauf hinzuweisen, daß Abwassereinleitungen sicher nicht aufgrund der hydrodynamischen Verdünnung allein zufriedenstellend funktionieren können. Eine ausreichende Reinigungswirkung kommt schließlich erst durch das Zusammenwirken mit chemisch-biologischen Abbau- und Entkeimungsprozessen zustande.

### 15.5 Warmwassereinleitung in Flüsse

Die Einleitung erwärmten Kühlwassers in einen Fluß soll als zweites Anwendungsbeispiel diskutiert werden. Die Zunahme des Energiebedarfs und die Entwicklungstendenz zu größeren Wärmekraftwerkseinheiten haben zur Folge, daß einem Fluß punktuell sehr große Abwärmemengen zugegeben werden. Neben den Fragen der kumulativen Auswirkungen solcher Einleitungen (Wärmelastpläne) treten auch lokale Probleme auf, deren Behandlung eine Vorhersage der Geschwindigkeits- und Temperaturverhältnisse erfordert. Während die Temperaturverteilung – Länge und Breite der Abwärmefahne sowie deren Tiefenausdehnung – vor allem den Wasserwirtschaftler und den Hydrobiologen interessiert, sind die Auswirkungen der Einleitungs-Quergeschwindigkeiten für die Schifffahrt von Belang. Bei der Planung von Kühlwassereinleitungen großer Kraftwerke stellen sich im wesentlichen folgende Fragen:

1. Welchen Abstand müssen Entnahme- und Rückgabebauwerk haben, um eine Rückströmung des warmen Wassers in die Entnahme (Kurzschlußströmung) zu vermeiden?
2. Welche Lage und Form sollen Entnahme- und Rückgabebauwerk erhalten, damit die Quergeschwindigkeiten zu keiner Gefährdung der Schifffahrt führen?
3. Welche Auswirkungen hat die Entnahme und Rückgabe auf den Feststofftransport und auf Erosions- und Verlandungserscheinungen?
4. Welche Temperaturverteilung wird sich unterhalb der Einleitung einstellen? Welche Auswirkungen ergeben sich hieraus für die Ökologie des Gewässers und für stromab liegende Wasserentnahmen oder -nutzungen?

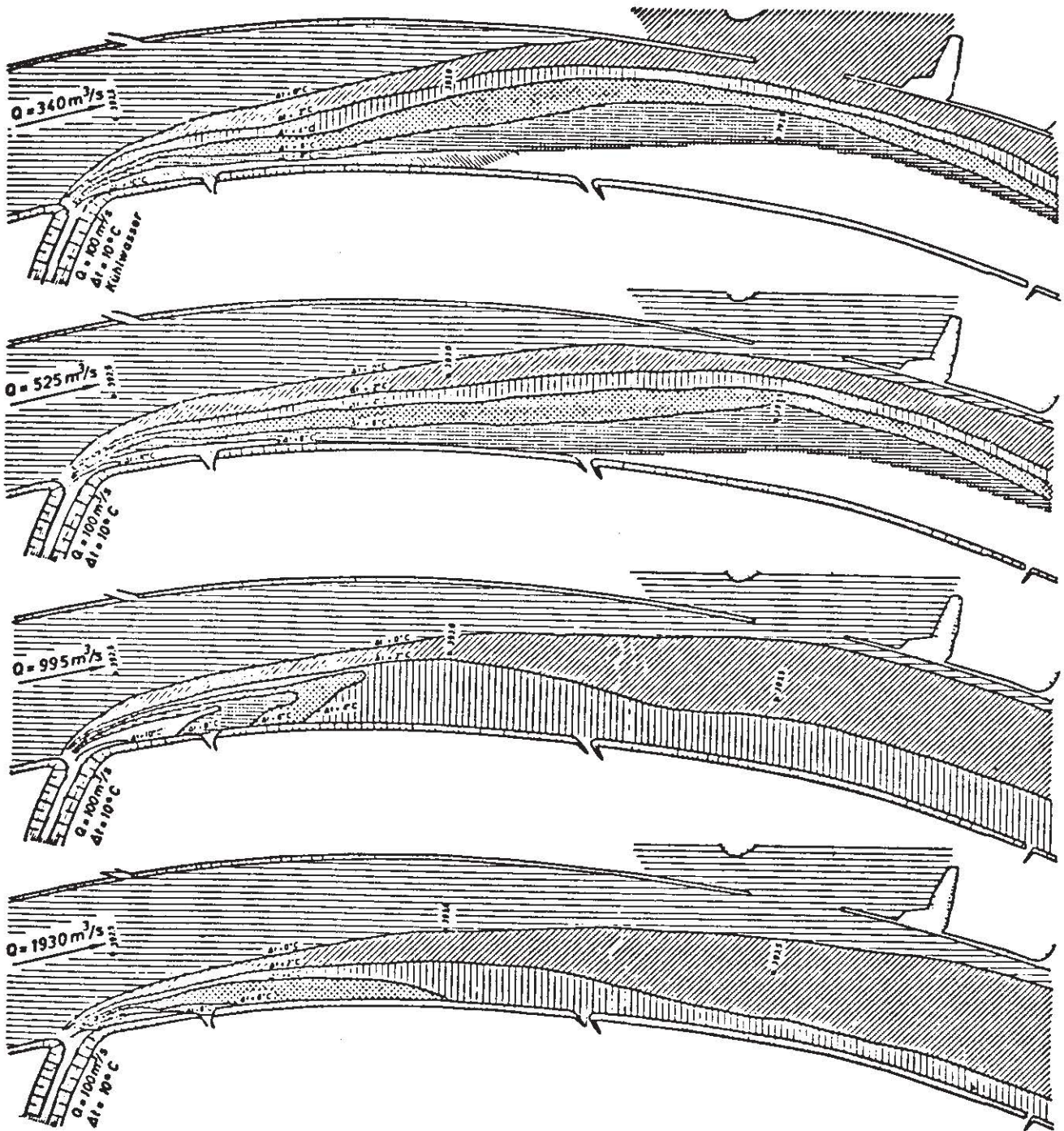


Abb. 13: Temperaturverteilung bei einer Warmwassereinleitung in einen Fluß

Diese Fragestellungen lassen sich heutzutage gut im hydraulischen Modellversuch beantworten. Die turbulente Durchmischung des Kühlwassers mit dem Flußwasser hängt in erster Linie vom Verhältnis der Einleitungs- zur Flußgeschwindigkeit (bzw. vom Verhältnis der Durchflüsse) ab. In Abb. 13 sind Meßergebnisse aus Modellversuchen der Bundesanstalt für Wasserbau für das Kernkraftwerk Philippsburg dargestellt. Der Verlauf der gemessenen Isothermen bei unterschiedlichen Abflußverhältnissen im Rhein zeigt, daß mit zunehmender Rheinwasserführung eine stärkere Durchmischung und Verdünnung des Kühlwassers auftritt, was eine entsprechende

Verkleinerung der Abwärmefahne bewirkt. Die Ergebnisse solcher Modellversuche lassen sich mit ausreichender Genauigkeit auf Naturverhältnisse übertragen. Wenngleich die im Modell und Natur gemessenen Temperaturfelder auch nicht in allen Details übereinstimmen, so ist doch eine vertrauenswürdige Aussage über die Hauptabmessungen und die Form der Wärmefahne möglich, wie Vergleichsmessungen gezeigt haben [11].

Je nach örtlichen Gegebenheiten läßt sich der Nahfeldbereich durch gezielte Maßnahmen beeinflussen. Bei Kühlwassereinleitungen sind sowohl der Durchfluß  $Q_0$  als auch die Temperaturdifferenz  $\Delta T_0$  (somit auch der Auftrieb  $B_0$ ) durch die Betriebsbedingungen vorgegeben. Die technischen Möglichkeiten zur Beeinflussung des Ausbreitungsverhaltens beschränken sich daher auf den Impulsfluß  $M_0$ , dessen Größe und Richtung durch geeignete Ausbildung des Auslaßquerschnitts und des Bauwerks variiert werden kann. Hiermit läßt sich die anfängliche Ausbreitung und Verdünnung steuern, ebenso wie durch die Wahl des Einleitungsortes, wie beispielsweise bei Anordnung am Innen- oder Außenufer einer Flußkrümmung oder in einem Ablösungsgebiet, wie hinter einer Buhne.

Für Wärmeeinleitungen in Flüsse sind auch eine Vielzahl mathematischer Modelle entwickelt worden. In Abb. 14 sind vier verschiedene mathematische Modelle für Oberflächeneinleitungen in Fließgewässer dargestellt. Mangels geeigneter Naturmeßdaten werden diese Modelle lediglich untereinander verglichen. Es zeigt sich, daß bei geeigneter Wahl der empirischen Beiwerte alle diese Modelle gegebene Naturbedingungen gleich gut oder gleich schlecht beschreiben können. Dies macht deutlich, daß diese Modelle für Simulationszwecke so gut oder so schlecht wie die hierfür gewählten Beiwerte sind, und daß sie als echte Vorhersagemodelle noch nicht eingesetzt werden können [12].

## 15.6 Schlußbemerkungen

Aus den obigen Ausführungen zum heutigen Wissensstand über die Gesetzmäßigkeiten von Einleitungsvorgängen in Gewässern ist deutlich geworden, daß die Kenntnis der strömungsmechanischen Grundlagen solcher Vorgänge noch sehr lückenhaft ist. Um einen gezielten Beitrag zur Erarbeitung dieser Grundlagen zu leisten, hat sich an der Universität Karlsruhe eine Gruppe von Ingenieur- und Naturwissenschaftlern zusammengeschlossen und den Sonderforschungsbereich gegründet, der seit 1970 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert wird. Unter dem Thema „Ausbreitungs- und Transportvorgänge in Strömungen“ werden an sechs Hochschulinstituten und in der Bundesanstalt für Wasserbau in interdisziplinärer Zusammenarbeit Beiträge zur Erforschung von Einleitungsvorgängen erbracht [2]. So werden beispielsweise in der Bundesanstalt für Wasserbau im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 80 seit Jahren umfangreiche sy-



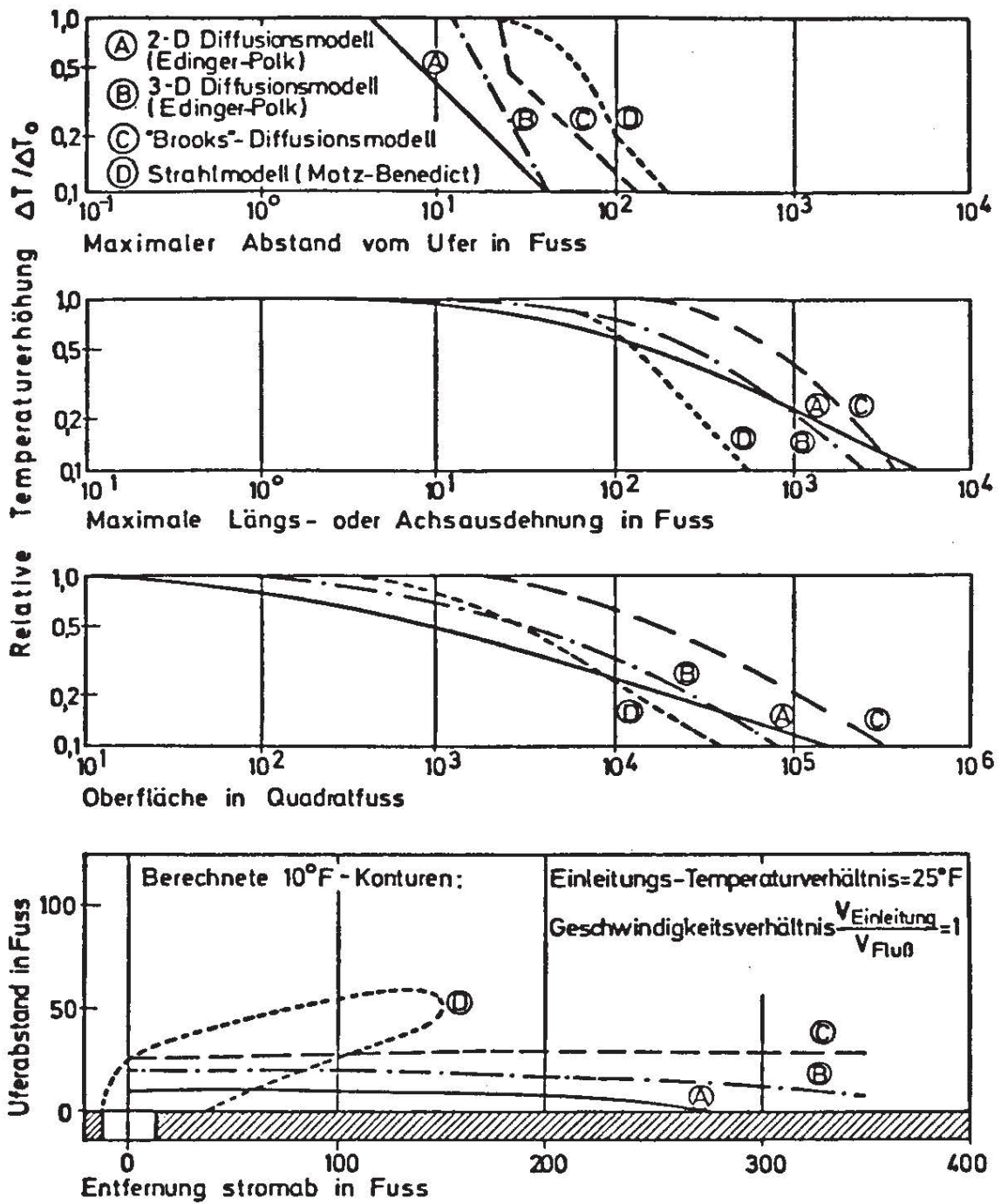


Abb. 14: Vergleich mathematischer Modelle für Oberflächeneinleitungen in Flüsse (nach Jones und Benedict, 1974 (5))

stematische physikalische Modelluntersuchungen an idealisierten Flußgeometrien und Einleitungskonfigurationen vorgenommen. Gleichzeitig werden analytische und experimentelle Grundlagenuntersuchungen zur Entwicklung von Turbulenzmodellen und von numerischen Dispersionsmodellen für Einleitungen vorangetrieben. Ziel der sich gegenseitig komplementierenden Teilprojekte des Sonderforschungsbereich 80 ist es, ein besseres Verständnis der komplexen Strömungs- und Wassergüteprobleme bei Fremdstoff- und Abwärmeeinleitungen in natürliche Gewässer zu ermöglichen und die Erarbeitung allgemein gültiger Vorhersagemodelle und Beurteilungskriterien für Ausbreitungs- und Transportvorgänge voranzutreiben. Damit soll ein Beitrag zur Beherrschung und Lösung heutiger und zukünftiger Gewässergüteprobleme geleistet werden.

## Literatur:

- [1] Brooks, N.H.: Hydrologic Transport of Wastes. Flow Studies in Air and Water Pollution, ASME, 1973.
- [2] Naudascher, E. (Hrsg.): Tätigkeitsberichte des Sonderforschungsbereichs 80. Ausbreitungs- und Transportvorgänge in Strömungen. Karlsruhe, 1972 und 1973.
- [3] Naudascher, E., Kobus, H.: Erforschung vom Strömungsproblemen der Umweltverschmutzung. Umschau in Wissenschaft und Technik, Heft 6, März 1973.
- [4] Kobus, H.: Ausbreitung und Durchmischung bei Warmwassereinleitungen in Gewässer. Kapitel IV. In: Wärmeeinleitung in Strömungen, Technischer Verlag Resch KG, Gräfelfing bei München, 1975.
- [5] Abraham, G.: Jets and Plumes Issuing into Stratified Fluid. Proc., International Symposium on Stratified Flows, Novosibirsk, 1972.
- [6] Kobus, H.: Ausbreitungsvorgänge in Gewässern. Ein Reisebericht über Forschungsarbeiten in den USA im Jahr 1973/74. Bericht Nr. SFB 80/T/43, Sonderforschungsbereich 80, Universität Karlsruhe, August 1974.
- [7] Zimmermann, C. u.a. (Hrsg.): Wärmeeinleitung in Strömungen. Technischer Verlag Resch KG, Gräfelfing bei München, 1975.
- [8] Harleman, R.F. u.a.: Engineering Aspects of Heat Disposal from Power Generation. Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, MIT, Cambridge, Mass., 1971.
- [9] Koh, R.C.Y., Brooks, N.H.: Fluid Mechanics of Waste-Water Disposal in the Ocean. Annual Review of Fluid Mechanics, Volume 7, Annual Reviews Inc., Palo Alto, California/USA, 1975.
- [10] Kobus, H.: Strömungsmechanische Grundlagen der Abwassereinleitung ins Meer. (Unveröffentlichter Vortrag), 1974.
- [11] Gehrig, W.: Simulation von Warmwassereinleitungen in einen Fluß im wasserbaulichen Modell, Kapitel VI. In: Wärmeeinleitungen in Strömungen. Technischer Verlag Resch KG, Gräfelfing bei München, 1975.
- [12] Jones, L., Benedict, B.: Predictive Models for Surface Discharges in Rivers. (Unveröffentlichtes Manuskript), 1974.