

# Eine neue Methode zur lokalen und momentanen Bestimmung der Wiederbelüftungsraten von Gewässern

## A New Method Measuring Water Reaeration Locally and Fast

doi: 10.5281/zenodo.13129

### Kurzfassung / Abstract

Es wird ein Meßsystem vorgestellt, das lokal und momentan Austauschkoefizienten an der Phasengrenze zwischen den Gewässern und der Atmosphäre bestimmen kann. Die bisher nicht gekannte räumliche und zeitliche Auflösung wird durch das neue Konstantfluß-Meßverfahren erreicht. Als Tracer dient Wärme. Mit dem neuen feldgängigen Verfahren kann erstmals die Wiederbelüftungsrate in situ bestimmt und parametrisiert werden.

*A new system is presented on how to measure, both locally and momentarily, the tracer exchange rates across an air/water interface, which are controlled by the water sided boundary layer. A never before achieved resolution in space and time is obtained by the new Forced-Flux-Method. The tracer heat will be used. In first time, the new method allows the determination and parametrisation of the reaeration rate under field conditions.*

### 1 Einleitung

Die Gewässergüte von Flüssen und Seen wird maßgeblich durch deren Sauerstoffgehalt bestimmt. Um die Regenerierungskräfte der Gewässer und somit die Notwendigkeit wasserbaulicher Eingriffe in das natürliche System besser beurteilen zu können, sind verlässliche Sauerstoffbilanzen erforderlich. In diese Bilanzen geht neben den Zu- und Abflüssen sowie Produktions- und Zehrungstermen in der Freiwasser- und in der Bodenzone der Austausch mit der Atmosphäre ein [1]. Er wird durch eine dünne, sog. Grenzschicht direkt unterhalb der Wasser-Luft-Phasengrenze kontrolliert, die wegen ihres mikroskopischen Charakters einer Messung mit Sonden nicht zugänglich ist. Der Gasaustausch hängt stark von durch Scherkräfte im Wasserkörper erzeugten Turbulenzen ab, die sich aus den Geschwindigkeitsgradienten an den Grenzflächen Luft-Wasser und Wasser-Boden ergeben [2]. Sie werden gemäß ihrer Ursache als boden- oder lufttreibungsinduziert bezeichnet. In Flüssen wirken unterhalb einer Windstärke von ca. 5 m/s bodenreibungsinduzierte Wirbel austauschbestimmend [3]. Für größere Windgeschwindigkeiten dominiert der lufttreibungsinduzierte Term. Beide Terme sind bislang weder zufriedenstellend parametrisiert noch modelliert. Literaturwerte verschiedener Autoren variieren um fast eine Größenordnung [3, 4].

Bei rein windinduziertem Austausch konnte beim Einsetzen von Wellen ein sprunghaftes Ansteigen der Austauschrate festgestellt werden. Dieser Effekt läßt sich weder durch die Beschreibung der Wasseroberfläche als statische Rauigkeit noch nach der Theorie einer festen Wand erklären. Letztlich ist diese Erhöhung bis heute unverständlich [5, 6]. Es konnte lediglich gezeigt werden, daß sich die mittlere quadratische Neigung der Wellen  $s^2$  als empirischer Parameter zur Beschreibung des Welleneinflusses eignet und seine Verwendung durch Plausibilitätsüberlegungen begründbar ist [6]. Somit bedarf das Zusammenspiel von Wind, Wellen und Bodenreibung bei wasserseitig kontrollierten Austauschprozessen dringend einer genaueren Untersuchung.

### 2 Grundlagen

Der Transport stofflicher und nichtmaterieller Tracer durch eine Phasengrenze erfolgt in flüssigen und gasförmigen Medien durch turbulente sowie durch molekulardiffusive Prozesse. In hinreichender Entfernung von der Phasengrenze transportieren Turbulenzen um mehrere Größenordnungen effizienter als die molekulare Diffusion. Erst nahe der Phasengrenze, durch die die Wirbel nicht hindurchgreifen können, wird molekulare Diffusion bestimmend, da die turbulente Diffusionskonstante  $K(z)$  durch Dämpfung und Abnahme der Wirbelradien stark abnimmt. Dieser Bereich wird Grenzschicht genannt (Bild 1). Während die Stromdichte  $j$

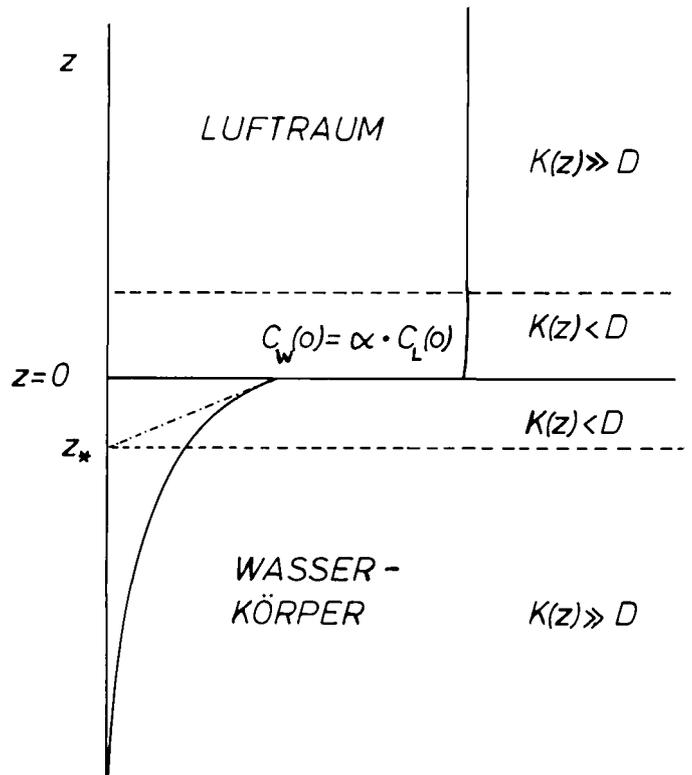


Bild 1: Transport in der Nähe einer Luft-Wasser-Phasengrenze. Das Konzentrationsprofil eines typischen Gastracers (wie  $O_2$ ) und  $z^*$  als Extrapolation des Konzentrationsgradienten bei  $z = 0$  auf die  $z$ -Achse sind eingezeichnet. Unterschiedliche Löslichkeiten des Tracers in Luft und Wasser führen zu einer Unstetigkeit an der Phasengrenze.

des molekulardiffusiven Transports durch das 1. Ficksche Gesetz

$$j = -D \frac{dc}{dz} \quad (1)$$

gut beschrieben wird, wobei  $c$  die Tracerkonzentration,  $z$  den Abstand zur Phasengrenze und  $D$  die mol. Diffusionskonstante angibt, gestaltet sich die Einbeziehung der turbulenten Diffusion schwierig. Im Rahmen von Modellen läßt sich

$$K(z) \sim z^l \quad (2)$$

ansetzen, wobei  $l$  luftseitig bei etwa 3 [7], wasserseitig je

nach Wellenbild zwischen 2 und 3 liegt [6]. Wegen der starken z-Abhängigkeit von  $K(z)$  ist der Transferwiderstand

$$R = \int_{\text{Luft}}^{\text{Wasser}} \frac{1}{D + K(z)} dz \quad (3)$$

auf die Grenzschicht konzentriert. Zudem liegt  $R$  für Gase, die wenig wasserlöslich und chemisch inert sind (wie  $\text{CO}_2$  und  $\text{O}_2$ ), fast vollständig im Wasserkörper [8]. Der Gasaustausch wird somit von der wasserseitigen Grenzschicht kontrolliert, deren typische Dicke  $z_*$  30 bis 300  $\mu\text{m}$  beträgt (Bild 1).

Üblicherweise wird die Austauschrate als Austauschkoefizient

$$k = R^{-1} = \frac{j}{\Delta c} \quad (4)$$

angegeben. Er läßt sich als die Geschwindigkeit interpretieren, mit der sich  $\Delta c$ , die Konzentrationsdifferenz zwischen dem gut durchmischten Wasserkörper (Bulk) und der Atmosphäre, durch die Grenzschicht schiebt. Aus  $k$  läßt sich die Dicke  $z_*$  der Grenzschicht und die Zeitkonstante  $t_*$  nach

$$z_* = D/k \quad \text{und} \quad (5)$$

$$t_* = z_*/k \quad (6)$$

berechnen. Die Gleichberechtigung von  $k$ ,  $z_*$  und  $t_*$  als beschreibende Größen von Austauschvorgängen ist später für das Verständnis der Konstantflußmethode wichtig.

Theorien zum Gasaustausch führen trotz unterschiedlicher Ansätze zu der einheitlichen Lösungsstruktur

$$k \sim Sc^{-n}, \quad (7)$$

wobei die Stärke der z-Abhängigkeit von  $K(z)$  im Exponenten  $n$  der Schmidtzahl  $Sc = \nu/D$  zum Ausdruck kommt [6].  $\nu$  bezeichnet die kinematische Viskosität. Für Gase liegt  $Sc$  deutlich über den Werten von Wärme (z.B. bei  $T = 20^\circ\text{C}$ :  $Sc(\text{O}_2) = 470$ ,  $Sc(\text{CO}_2) = 598$ ,  $Sc(\text{Wärme}) = 7$  [8, 9]).

Gleichung 7 erlaubt die Umrechnung von Austauschkoefizienten verschiedener Tracer, wobei außer der Stoffkonstanten  $Sc$  nur der Schmidtzahl exponent  $n$  bekannt sein muß.  $n$  ist durch ausführliche Untersuchungen gut bekannt. Je nach Oberflächen- und Strömungsbedingungen liegt  $n$  zwischen  $2/3$  und  $1/2$  und strebt beim Einsetzen von Wellen [6] oder zunehmender Strömung [10] gegen  $1/2$ . Somit kann  $k$  indirekt mit Hilfe besser geeigneter Tracer bestimmt werden, wenn der Tracer wegen meßtechnischer Probleme nicht direkt gemessen werden kann. Einschränkend gilt, daß die Transportverhältnisse für beide Tracer gleich sein müssen. Dies ist gewährleistet, wenn der Hauptwiderstand beider Tracer im gleichen Medium und in der viskosen Grenzschicht liegt [8].

### 3 Massenbilanzmethode (MB)

Gewöhnlich werden Austauschraten mit Hilfe von Einboxmodellen bestimmt, wobei für die Box eine Massenbilanz erstellt wird. Als Box wird das zur Verfügung stehende Tracerreservoir, z.B. der gut durchmischte Wasserkörper betrachtet, in dem sich die Quellen und Senken des Tracers im Gleichgewicht mit den Tracerströmen durch die Boxgrenze kompensieren. Bei Labormessungen, häufig aber auch durch geeignete Tracerwahl bei Feldmessungen, lassen sich Quellen und Senken sowie Ströme über die Wasser-Boden-Phasengrenze ausschließen.

Mit Hilfe der Kontinuitätsausgleichung und (4) erhält man aus dem gemessenen zeitlichen Verlauf der Tracerkonzentration

$$k = h_e \cdot \frac{c}{\Delta c}, \quad (8)$$

wobei die effektive Boxhöhe  $h_e = V/F$  durch die Austauschfläche  $F$  und das Wasservolumen  $V$  gegeben ist. Die Meßzeit

ergibt sich aus der Zeitkonstante zur Einstellung des Gleichgewichts

$$t_e = h_e/k. \quad (9)$$

Bei der MB-Methode bestimmt somit die räumliche Integration über die gesamte Box das zeitliche Integrationsverhalten. Im Labor beträgt  $t_e$  von  $\text{O}_2$  etwa eine Stunde. Wegen der größeren Box erreicht  $t_e$  bei natürlichen Systemen Werte von Stunden (Flüsse) bis Tage (Seen) und Wochen (Ozean).

### 4 Die Konstantflußmethode (KF)

Die KF-Methode stellt eine alternative Möglichkeit zur Austauschmessung dar. Während bei der MB-Methode in (4)  $\Delta c$  vorgegeben wird und  $j$  sich entsprechend einstellt, wird bei der KF-Methode dem Wasserkörper ein konstanter Tracerstrom aufgeprägt.  $\Delta c$  erreicht nach der Einstellzeit  $t'_e$  gemäß (9) einen Gleichgewichtswert, der gemessen werden muß. Da ein nennenswerter Konzentrationsgradient jedoch nur in der Grenzschicht aufgebaut wird, ist nur deren Dicke für die Einstellung des Gleichgewichts relevant. Die Boxhöhe reduziert sich auf  $z_*$ . Folglich liefert

$$t'_e = z_*/k = t_* \quad (10)$$

direkt die Zeitkonstante des zu untersuchenden Luft-Wasser-Systems, die im Sekundenbereich liegt. In dieser Zeit bleibt neben der vertikalen auch die laterale Mischung im Wasserkörper klein [11]. Deshalb können prinzipiell nicht nur Zeit-, sondern auch Raumskalen bis in den Bereich der natürlichen Fluktuationen aufgelöst werden, was einen völlig neuen Zugang zu den Austauschprozessen ermöglicht.

Die Vorteile gegenüber der MB-Methode sind vielfältig:

- Die KF-Methode liefert  $k$  als lokale Meßgröße. Sie wird genau wie ihre bestimmenden Parameter durch unterschiedliche Überstreichlängen des Windes (Fetch), räumliche Inhomogenitäten wie lokale Windvariationen oder partielle Wellenglättung durch organische Oberflächenfilme beeinflusst. Die KF-Methode berücksichtigt dies implizit.
- Die Schnelligkeit der KF-Methode erlaubt auch Untersuchungen zeitlich instationärer Prozesse. Dies ist eine typische Feldapplikation, da in der Natur die austauschrelevanten Parameter im Verlauf von MB-Einstellzeiten oft stark fluktuieren. So kann bei limnologischen MB-Untersuchungen nicht einmal der Einfluß des Tagesgangs aufgelöst werden.
- Desweiteren entfällt das Problem, die Massenbilanz zu schließen, da die Boxhöhe  $h_e$  durch  $z_*$  ersetzt wird. Für Seen muß die Stabilität, Durchlässigkeit und Lage der Sprungschicht nicht bekannt sein, die das warme Epilimnion vom kalten Hypolimnion abschließt. Auch für Flüsse wäre die Festlegung von  $h_e$  schwierig, da die Wassertiefe über die gesamte Boxlänge  $l_e = v \cdot t_e$  ( $v$ : Fließgeschwindigkeit) als Wert eingeht. Bei Boxlängen von einigen km müßten Schwankungen der Wassertiefe sowie Nebenflüsse und Zuleitungen berücksichtigt werden.  $z_*$  hingegen ergibt sich als korrespondierende Größe zu  $k$  (5) automatisch als Meßwert.
- Schließlich liefert das Einstellverhalten des Gleichgewichts zusätzliche Informationen, auf die in 5.3 eingegangen wird.

### 5 Technische Realisierung der KF-Methode

Wiederbelüftungsraten lassen sich mit der MB-Methode direkt mit  $\text{O}_2$  oder eine Vielzahl anderer wasserseitig kontrollierter Tracer messen. Oft existieren kommerzielle Meßsysteme zur Bestimmung von  $\Delta c(t)$ . Die KF-Methode verlangt jedoch eine von konvektiven Einflüssen im Luftraum freie Tracerstromdichte, die dem Wasserkörper an der Oberfläche aufgeprägt wird sowie die Messung der dadurch verursachten Konzentrationserhöhung direkt an der Wasseroberfläche. Diese Anforderung wird erfüllt, wenn man den nichtstofflichen Tracer Wär-

me verwendet. In Form von IR-Strahlung, die durch einen starken, etwa 1000 K heißen Quarzstrahler erzeugt wird (Bild 2), durchdringt er als konstanter Strom der Luftraum

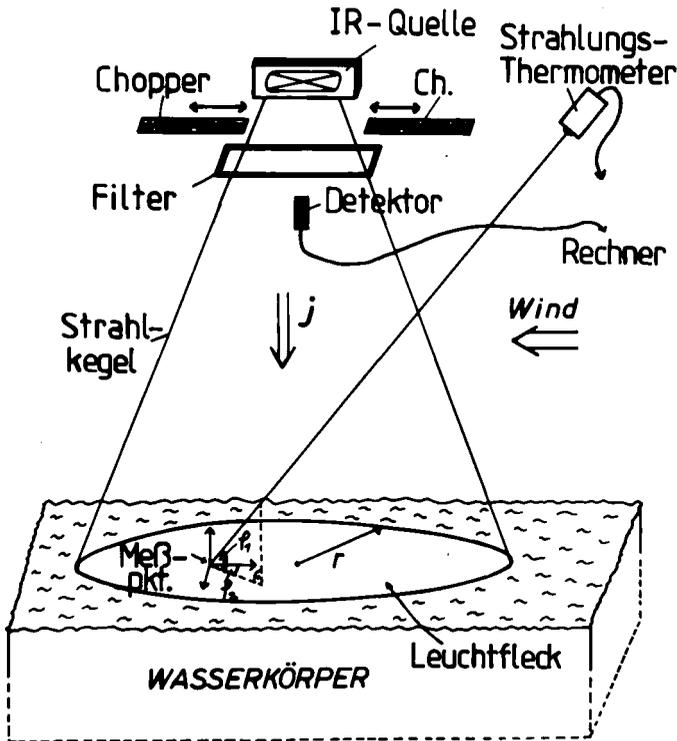


Bild 2: Meßaufbau des IR-Konstantflußsystems. Die gefilterte, periodisch variierende Quellstrahlung erwärmt die Wasseroberfläche auf einer Fläche mit einem Radius von 25 bis 50 cm. Die Winkel  $\varphi_1$  und  $\varphi_2$  deuten die geometrische Unterdrückung der Reflexe an. Die mit dem Detektor gemessene Strahlungsdichte  $j$  und das mit dem Strahlungsthermometer gemessene Signal  $\Delta T$  werden dem Datenerfassungsrechner zugeführt.

unbeeinflusst von Wirbeln. Die Strahlung wird an der Wasseroberfläche absorbiert und in fühlbare Wärme umgewandelt, die gemäß den für Gase gültigen Diffusionsgesetzen die Grenzschicht durchdringt. Da sich für fühlbare Wärme im Gegensatz zu den meisten Gasen der Hauptwiderstand zu mehr als 99 % [8] im Luftraum befindet, muß die Wärme durch die wasserseitige Grenzschicht diffundieren, um dem erzeugten Temperaturgradienten entgegenzuwirken. Für die Aufprägung der Strahlung ist dagegen der luftseitige Transferwiderstand kurzgeschlossen, sodaß der Hauptwiderstand des Transportvorgangs in der wasserseitigen Grenzschicht sitzt. Die notwendige Gleichheit der Transportmechanismen beider Tracer ist gegeben. Es stellt sich eine Temperaturdifferenz

$$\Delta T = T_0 - T_w = \frac{j}{k \cdot \rho \cdot c_p} \quad (11)$$

zwischen Wasseroberfläche und Bulk ein, wobei  $c_p$  die spez. Wärme und  $\rho$  die Dichte angibt. Sie wird mit einem Strahlungsthermometer gemessen, wobei  $j$  mit einer festen Frequenz mechanisch gehoppert wird. Aus der Differenz der Oberflächentemperaturen, die sich nach dem Ein- und Ausschalten von  $j$  einstellen, ergibt sich  $\Delta T$ . (11) gilt aber nur dann exakt, wenn die IR-Strahlung direkt an der Oberfläche absorbiert wird. Dringt Strahlung in den Wasserkörper ein, so müssen Korrekturen vorgenommen werden, die mit zunehmender Eindringtiefe der Strahlung wachsen. Die bei einer Temperatur von 1000 K emittierte langwellige IR-Strahlung wird jedoch in Wasser sehr gut absorbiert. Ihre mittlere Eindringtiefe von ca. 20  $\mu\text{m}$  [13] ist verglichen mit  $z_*$  klein. Deshalb bleiben die Korrekturen gering [14].

Um austauschhemmende Temperaturschichtungen [15] zu vermeiden, sollte  $\Delta T$  einige  $1/10$  K nicht überschreiten. Die damit verbundene Meßgenauigkeit von einigen  $10^{-3}$  K ist

jedoch für Einzelmessungen nicht erreichbar, zumal für Feldmessungen nur Geräte in Frage kommen, deren Detektoren bei Normaltemperatur arbeiten. Außerdem verfälschen Reflexe der Strahlungsquelle am Wasserkörper dessen gemessene Oberflächentemperatur. Abhilfe schaffen die periodische Variation der IR-Strahlung und die Reflexunterdrückung, die im folgenden erläutert werden.

### 5.1 Die Chopperung der Strahlung

Durch periodische Variation der Strahlung wird erreicht, daß die gemessene Strahlungs- und  $\Delta T$ -Zeitreihen nur in der Grundfrequenz und den Obertönen der Chopperung auftreten. Sie werden durch Fouriertransformation in schmale Frequenzbänder abgebildet. Störungen außerhalb dieser Bänder können so eliminiert werden. Daher stören langsame Driften von  $\Delta T$ , wie sie bei Änderung der Verdunstung oder der

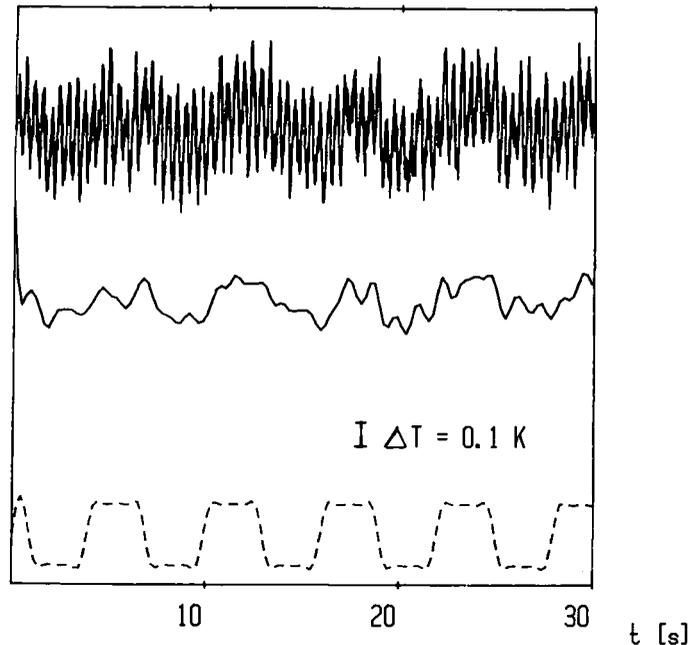


Bild 3a: Beispiel für eine ungefilterte (oben) und eine gefilterte (Mitte) Zeitserie der Oberflächentemperatur. Die Skalierung 0.1 Kelvin ist eingezeichnet. Zum Vergleich ist unten der Verlauf der Strahlungsdichte aufgetragen (gestrichelt).

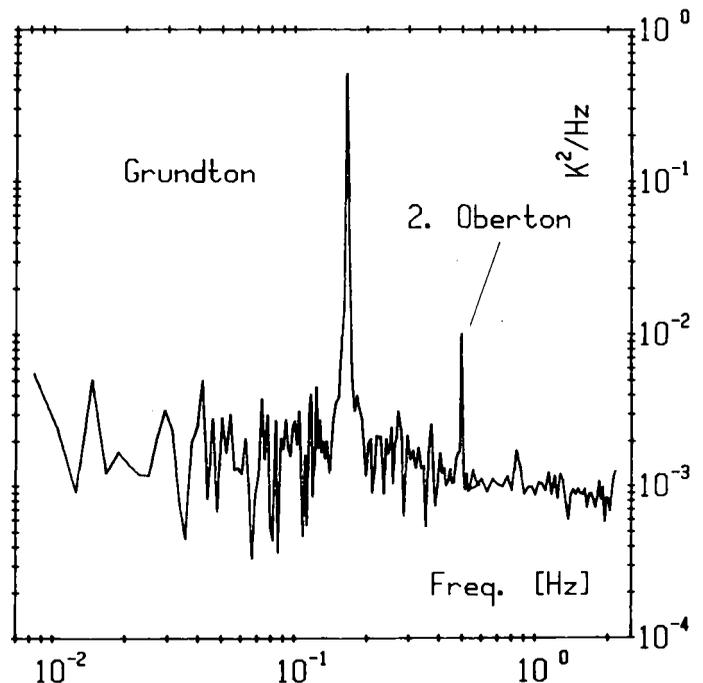


Bild 3b: Das aus der Zeitserie (Bild 3a) berechnete Spektrum

Temperaturen von Luft und Wasser auftreten, die Messung nicht. Auch vom Rauschen des Thermometers, das unterhalb der Grenzfrequenz des Detektors breit ins Spektrum streut [14], wird lediglich der Teil berücksichtigt, der im Frequenzband des Signals liegt. Schließlich werden konstante additive Wärmeströme wie Umgebungsstrahlung oder Verdunstungskühlung als Offset im Spektrum nicht erfaßt. Es wurden Meßgenauigkeiten von  $2/1000$  K für 8 Min. und  $6/1000$  K für 1 Min. Meßzeit erreicht (Bild 3).

### 5.2 Die Unterdrückung der Reflexe

Die Temperaturdifferenz zwischen Strahler und Wasser übersteigt  $\Delta T$  um 3 Größenordnungen. Obwohl Wasser nur ca. 2% der IR-Strahlung reflektiert [12], liegt die Störung wegen der  $T^4$ -Abhängigkeit der Strahlungsleistung um 2 Größenordnungen über dem max. Meßsignal. Der Temperaturunterschied zwischen IR-Quelle und Wasser erlaubt aber eine weitgehende spektrale Separation ihrer IR-Strahlungen (Bild 4),

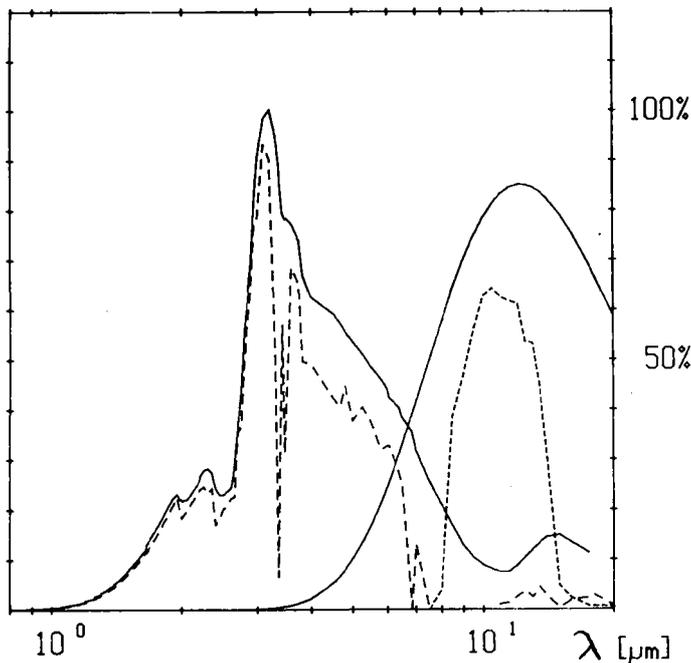


Bild 4: Spektrale Verteilung eines 300 Kelvin Strahlers (entspricht in etwa dem Spektrum von Wasser) und der von einer Wasseroberfläche reflektierten Strahlung [12] eines 1000 Kelvin Strahlers. Die durchgezogenen Linien stellen die ungefilterten Strahlungen dar. Die gestrichelten Linien zeigen ihre Modifizierung durch geeignete Filtermaterialien. j wurde auf das Maximum der ungefilterten Reflexstrahlung normiert.

wenn man die Grenze bei 6 bis 8  $\mu\text{m}$  wählt. In Strahlungsthermometern sind 8 bis 14  $\mu\text{m}$  Bandpaßfilter unproblematisch und meist standardmäßig integriert. Wegen Größe und Leistung der Quelle erweist sich jedoch die selektive Unterdrückung der Strahlung oberhalb 8  $\mu\text{m}$  als schwierig. Der Filter muß unterhalb  $\lambda = 8 \mu\text{m}$  gute Transmissionseigenschaften zeigen und zudem konvektiv gekühlt werden, damit er sich nicht erwärmt und als Störstrahler fungiert. Er muß Temperaturen über 400 K aushalten. In Tests haben sich Folien der organischen Fluorverbindung Hostafion (Hoechst) als beste und kostengünstige Lösung erwiesen.

Zusätzlich wurde durch die geometrische Anordnung von Strahlungsquelle und Thermometer die Häufigkeit der Reflexe in dem vom Thermometer erfaßten Raumwinkelbereich reduziert.

### 5.3 Dynamische Meßgrößen der KF-Methode

$\Delta T$  zeigt als Antwort auf die Flußdichte j einen durch  $t_*$  geprägten Verlauf. Aus dem Funktionsverlauf  $\Delta T(t)$  ergeben sich neben k zwei weitere Größen, die den Gasaustausch be-

schreiben. Wird  $t_*$  kleiner als die Periodendauer des Choppers, kann die Strahlung nicht mehr die gesamte Grenzschicht durchdringen. Die Amplitude von  $\Delta T$  wird gedämpft.

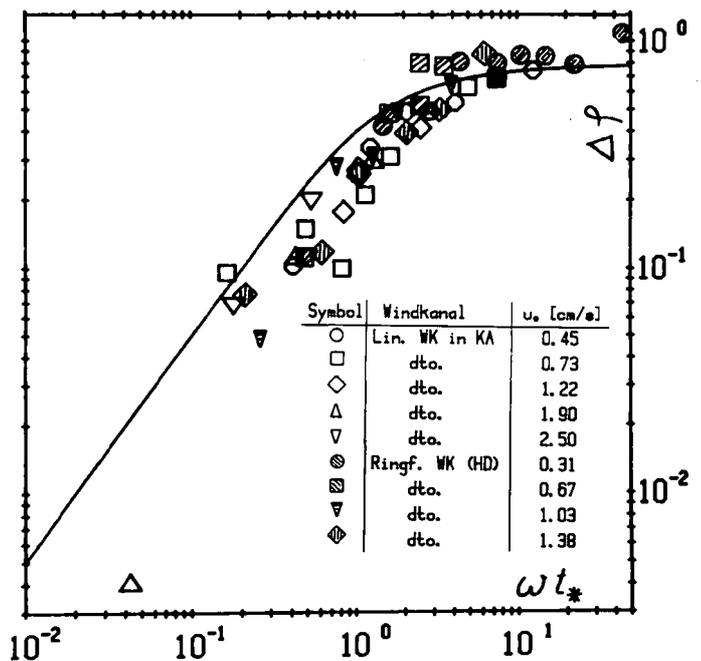
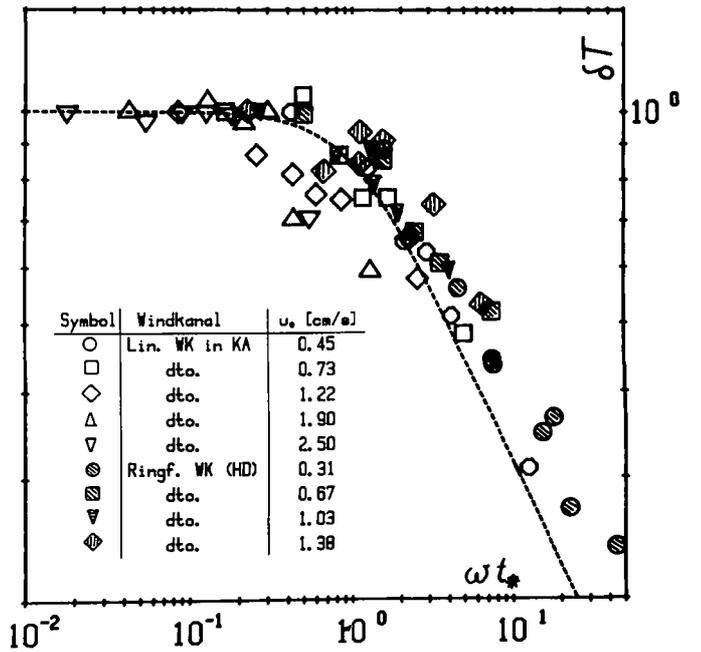


Bild 5a+b: Gemessene Dämpfungsfaktoren  $\Delta \varphi$  (b) als Funktion von  $\omega t_*$  für verschiedene Windstärken. Die schraffierten Werte wurden am ringförmigen Windkanal des IFU in Heidelberg, die anderen am linearen Windkanal des IHW in Karlsruhe durchgeführt. Die theoretischen Signalverläufe, berechnet nach dem Oberflächenenerneuerungsmodell, sind eingezeichnet.

Zudem sind  $\Delta T$  und j um einen Winkel  $\Delta \varphi$  phasenverschoben. Sowohl der Dämpfungsfaktor  $\delta T$  als auch die Phasenverschiebung  $\Delta \varphi$  hängen von der Chopperfrequenz  $\omega$  und  $t_*$  ab (Bild 5a). Unter Verwendung des Oberflächenenerneuerungsmodells, das den Gasaustausch über wellenbehafte Wasseroberflächen gut beschreibt [6], gilt:

$$\delta T = \left( \frac{1}{1 + \frac{1}{(\omega t_*)^2}} \right)^{1/4} \quad (12)$$

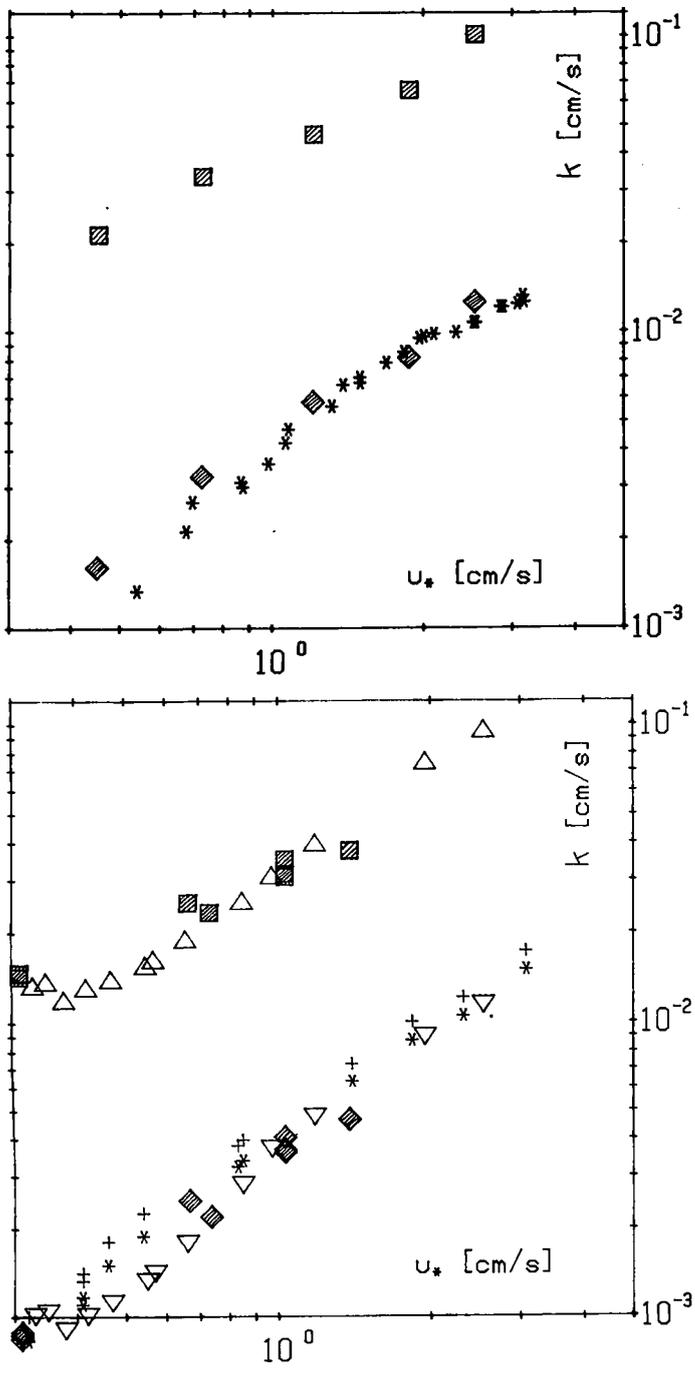
$$\Delta \varphi = \frac{1}{2} \arctg(\omega t_*) \quad (13)$$

Somit läßt sich  $k$  auf drei unabhängige Arten bestimmen. Für  $\omega t_* \ll 1$  wird  $k$  direkt aus dem gemessenen  $\Delta c$  berechnet (4). Erhöht man  $t_*$ , etwa durch Verringerung des Windes, oder  $\omega$ , so wird die Amplitude gedämpft. Ebenso tritt eine Phasenverschiebung ein. Aus beiden Größen läßt sich  $t_*$  und nach (6)  $k$  berechnen. Unter Zugrundelegung anderer Austauschmodelle ergeben sich geringe Unterschiede, die im wesentlichen vom Schmidtzahlenexponenten  $n$  bestimmt sind [14].

## 6 Ergebnisse und Planung

KF-Messungen wurden an den Windkanälen des Inst. für Hydrologie und Wasserwirtschaft (IHW) und des Inst. für Umweltphysik (IfU) bei stehendem Wasser und Windgeschwindigkeiten bis zu 13 m/s durchgeführt. Mit Hilfe von (7) wurden Wiederbelüftungsraten  $k_{O_2}$  bestimmt, wobei  $n$  nach [6] berechnet wurde. Folgende Ergebnisse sind festzuhalten:

– Die aus KF-Messungen berechneten  $k_{O_2}$ -Werte stimmen mit den Werten aus direkten (Bild 6a, [6]) und indirekten (Tracer:  $CO_2$ , Bild 6b, [16]) MB-Messungen überein.



– Ein direkter Vergleich von KF- und MB-Methode unter Verwendung des Tracers Wärme (Bild 6b) zeigt eine Übereinstimmung in den Austauschraten. Auch die MB-Messung wurde hier wasserseitig kontrolliert, da  $j_{Heat}$  durch Verdunstung an der Oberfläche erzeugt wurde [6].

–  $\delta T$  und  $\Delta \varphi$  zeigen den theor. erwarteten Verlauf (Bild 5). Bei allen Vergleichen von MB- und KF-Methode ist zu berücksichtigen, daß der Unterschied zwischen integralem und lokalem Charakter beider Methoden geringe Diskrepanzen der Werte erwarten läßt. Die Ergebnisse sind bei [14] ausführlich dargestellt. Aufbauend auf diesen und weiteren Laborexperimenten werden 1987 in einem gemeinsamen Projekt des IHW, der Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) und des IfU Messungen am Neckar durchgeführt. Die Bestimmung von Wiederlüftungsraten mit konventionellen Methoden bereitete im Rahmen des "Prognostischen Projekts Mittlerer Neckar" [1] Probleme, sodaß der Sauerstoffhaushalt nur ungenau bilanziert werden konnte. Die Messungen werden vom Forschungsschiff "Max Honsell" der LfU durchgeführt und durch Messungen der Austauschparameter ( $u_*$ ,  $s^2$  u.a.) begleitet. Aus den Daten werden zusammen mit Sauerstoffmeßdaten und den Ergebnissen biochemischer Untersuchungen im Gewässer Sauerstoffbilanzen erstellt.

## 7 Schlußwort

Die Bestimmung der Oberflächentemperatur wurde bei den bisherigen Untersuchungen mit Leihgeräten durchgeführt. Für die Leihgaben danken wir der Fa. Heimann (Wiesbaden), den Herren Miosga und Obermeier (DFVLR) sowie Herrn Tueg (Alfred Wegener Inst. für Polarforschung). Der DFG danken wir für die finanzielle Förderung der Voruntersuchungen.

## Schrifttum

- [ 1 ] Hoffmann, M., I. Pinter und W. Schmitz, 1980, Studien zum Gewässerschutz 3, Untersuchungen über den Sauerstoffhaushalt des Neckars, Studie der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
- [ 2 ] Plate, E., R. Friedrich, 1983, Austauschvorgänge an der Oberfläche von Gewässern, Wasserwirtschaft Jg. 73, 11/85, 427 bis 433
- [ 3 ] Plate, E. and R. Friedrich, 1984, Reaeration of open channel flow, in 'Gas transfer at water surfaces', W. Brutsaert and G. Jirka ed., Reidel Publishing Company, Dordrecht, 333 bis 346
- [ 4 ] Jähne, B., K.H. Fischer, J. Ilmberger, P. Libner, W. Weiss, D. Imboden, U. Lemmin, J.M. Jaquet, 1984, Parametrisation of air/lake gas exchange in 'Gas transfer at water surfaces', W. Brutsaert and G. Jirka, ed., Reidel Publishing Company, Dordrecht, 459 bis 466
- [ 5 ] Jähne, B., W. Huber, A. Dutzi, Th. Wais, J. Ilmberger, 1984, Wind/wave-tunnel experiment on the Schmidt number and wave field dependence of air/water exchange in 'Gas transfer at water surfaces', W. Brutsaert and G. Jirka ed., Reidel Publishing Company, Dordrecht, 303 bis 309
- [ 6 ] Jähne, B., K.O. Münnich, R. Bösinger, A. Dutzi, W. Huber, P. Libner, 1985, On the parameters influencing air-water gas exchange, submitted to Journal of Geophysical Research
- [ 7 ] Rödel, W., 1983, Einführung in die Physik der Atmosphäre als Umweltfaktor, Vorlesungsskript, Inst. f. Umweltphysik der Universität Heidelberg, unveröffentlicht

◀ Bild 6a+b: Vergleich von Austauschkoeffizienten, gemessen mit der MB- und mit der Kf-Methode.  
 a: Lin. Windkanal Karlsruhe [IHW]  
 \*  $k_{O_2}$  aus direkten MB-Messungen [16]  
 □  $k_{Heat}$  aus KF-Messungen, Tracer: Wärme  
 ◇ aus □ berechnete  $k_{O_2}$ -Werte  
 b: Ringf. Windkanal Heidelberg [IfU]  
 △  $k_{Heat}$  aus MB-Messungen, Tracer: Wärme (eig. Mess.)  
 ▽ aus △ berechnete  $k_{O_2}$ -Werte  
 □  $k_{Heat}$  aus KF-Messungen, Tracer: Wärme  
 ◇ aus □ berechnete  $k_{O_2}$ -Werte  
 \*  $k_{CO_2}$  aus MB-Messungen, Tracer:  $CO_2$  [6]  
 + aus\* berechnete  $k_{O_2}$ -Werte

- [ 8 ] Jähne, B. 1982, Trockene Deposition von Gasen über Wasser (Gasaustausch), in 'Austausch von Luftverunreinigungen an der Grenzfläche Atmosphäre/Erdoberfläche (trockene Deposition)', D. Flothmann ed., Batelle Institut Frankfurt a.M., BleV-R-64.284-2
- [ 9 ] Heinz, Gerhard 1986, Messungen der Diffusionskonstanten von in Wasser gelösten Gasen mit einem modifizierten Barrerverfahren, Diplomarbeit, Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg
- [10] Holmen, K. and P. Liss, 1984, Modell of air-water gas transfer: an experimental investigation, Tellus 36B, 92 bis 100
- [11] Imboden, D.M. and Th. Joller, 1984, Turbulent mixing in the hypolimnion of Baldeggersee (Switzerland) traced by natural radon-222, Limnol. Oceanogr. 29(4), 831 bis 844
- [12] Katsaros, K., 1980, Radiative sensing of sea surface temperature, in 'Air-sea interaction', F. Dobson, L. Hasse and R. Davis, eds., Plenum Press, New York and London, 293 bis 317
- [13] Irvine and Pollack, 1968, Infrared optical properties of water and ice spheres, Icarus 8, 324 bis 360

- [14] Jähne, B., P. Libner, E. Plate, R. Friedrich, 1986, A new, fast and locally measuring method to study transfer processes across the free aqueous viscous boundary layer, submitted to Tellus
- [15] Liss, P.S., P.W. Balls, F.N. Martinelli, M. Coantic, 1981, The effect of evaporation and condensation on gas transfer across an air-water interface. Oceanol. Acta, 4, 2, 129 bis 138
- [16] Wacker, J., 1985: Die Bedeutung des Wellenbildes für den Wiederbelüftungsprozeß, Vertiefungsarbeit, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe, unveröffentlicht.

Anschriften der Verfasser: Dipl. Phys. Peter *Libner*, Priv.-Doz. Dr. rer. nat. Bernd *Jähne*, Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg, Im Neuenheimer Feld 366, 6900 Heidelberg; Prof. Dr. ing. Erich *Plate*, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe, Kaiserstr. 12, 75 00 Karlsruhe.

# Einbanddecke zur WASSERWIRTSCHAFT

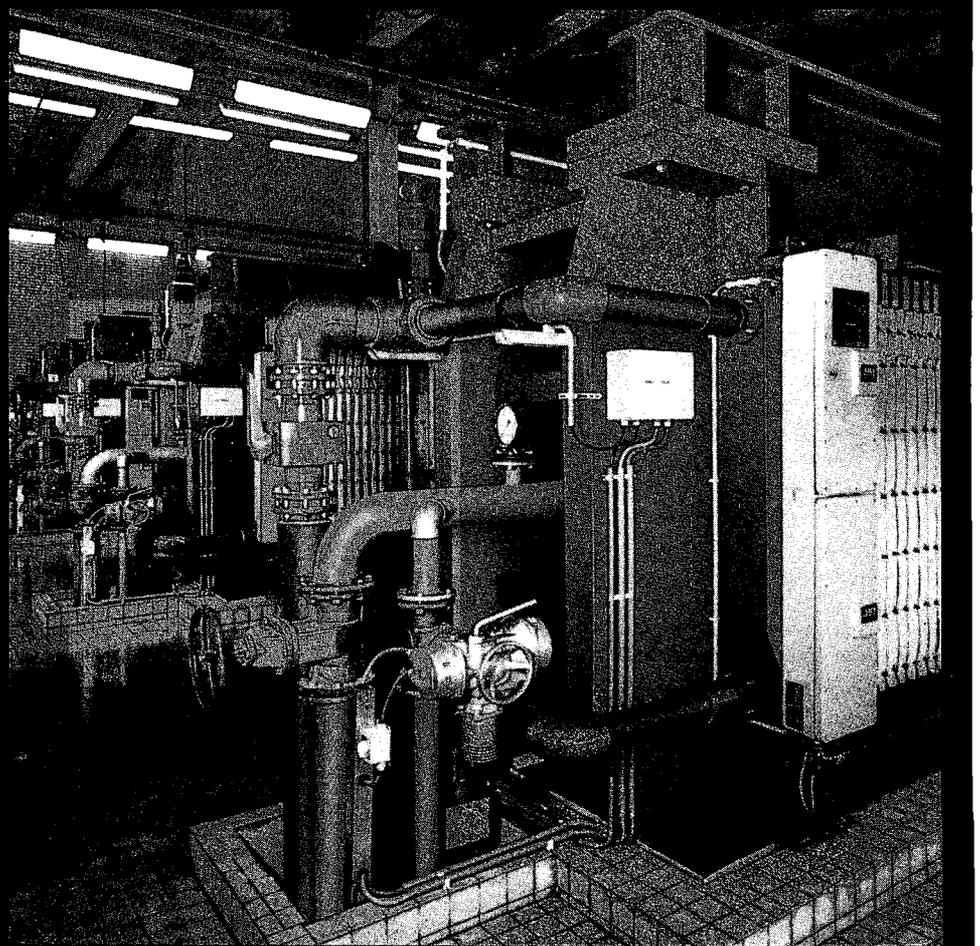
Leinen. DM 8,80  
Bestell-Nr. 570 177  
Franckh'sche  
Verlagshandlung  
Postfach 640, 7000 Stuttgart 1

## Netzsch geht neue Wege in der Schlamm- entwässerung

Erfolgreicher Start der Kommunalschlamm-entwässerung mit organischen (polymeren) Flockungsmitteln. Die erheblich niedrigeren Betriebskosten – im Vergleich zu einer konventionellen Schlammkonditionierung mit anorganischen Mitteln – verstärken den Trend zu neuen Verfahren!



Gebrüder Netzsch  
Maschinenfabrik GmbH & Co  
Gebrüder-Netzsch-Straße 19  
Postfach 1460  
D-8672 Selb/Bayern  
Bundesrepublik Deutschland  
Telefon 092 87 / 75-1  
Telex 6 43 535



Wir stellen aus: IFAT '87 München, 19. – 23. 5. 1987, Halle 3, Stand 308/328