Die Matrix der Fische

II.

Untersuchungen über die Vitalität von Fischen

Von ULRICH A. CORTI und MAX WEBER

(Vorläufige Mitteilung aus der Eidg. Anstalt für Wasserversorgung,
Abwasserreinigung und Gewässerschutz und dem Institut für Geophysik an der
Eidg. Technischen Hochschule in Zürich)

Eingegangen am 17. August 1948

1. Einleitung

Im Jahre 1946 begann die Biologische Abteilung der Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz mit der Untersuchung der Ursachen und des Ausmaßes der in natürlichen Gewässern immer wieder vorkommenden Fischvergiftungen¹⁾. In diesem Zusammenhang wurde von U. A. CORTI die Frage nach der qualitativen, eventuell quantitativen Messung der Vitalität oder, physikalisch gesehen, der Bewegung von Fischen aufgeworfen. Die Messungen versprechen z. B. wertvolle Aufschlüsse über den zeitlichen Verlauf von Fischintoxikationen, oder über die Wirksamkeit mancher Pharmaka, oder über die biologische Wertigkeit von Nahrungs- und Futtermitteln, oder über die Empfindlichkeit gegenüber elektrischen, optischen und thermischen Reizquellen.

**2. Theoretische Grundlagen
zum Aufbau einer Versuchsanordnung**

Mit den derzeit zur Verfügung stehenden Mitteln kann nur eine indirekte Messung der Bewegung Aussicht auf Erfolg haben. Dazu wählt man z. B. einen kreisrunden, flachen Behälter mit niedrigem Rand vom

¹⁾ K. WUHRMANN, H. WOKER, *Beiträge zur Toxikologie der Fische. II: Experimentelle Untersuchungen über die Ammoniak- und Blausäurevergiftung*, Schweiz. Z. Hydrol. 11, 219–244 (1948).

Typus der bekannten Kristallisierschalen als Aquarium, das mit Hilfe von vier symmetrisch auf den Rand verteilten dünnen Drahtseilen (ohne Biegesteifigkeit) frei aufgehängt wird. Wird nun, aus irgendeinem Grunde, ein sich im Aquarium befindlicher Fisch in «äußere Unruhe» versetzt, so wirkt, vermöge des Prinzips von Aktion und Reaktion, seine Schubkraft $\mathfrak{P}$ bzw., da das Wasser kein idealer Überträger ist, der Bruchteil α

Abb. 1. Versuchsaquarium mit aufmontierten Beschleunigungsmessern.

Es bedeuten: A = Versuchsaquarium; B = Beschleunigungsmesser; D = dünne Drahtseile.

der Schubkraft, also $\mathfrak{R} = \alpha \mathfrak{P}$ auf dasselbe und versetzt es in kleine Schwingungen (auch Erschütterungen genannt).

Die Versuchsanordnung ist also so gewählt, daß Fisch und Aquarium praktisch nur noch über drei Freiheitsgrade verfügen, nämlich: zwei Translations- und einen Rotationsfreiheitsgrad (um die Vertikalachse des Versuchsaquariums). Abb. 1 vermittelt ein Bild.

Die Differentialgleichungen der Bewegung des Aquariums lauten:

$$\ddot{x} + D_1 \dot{x} + v_0^2 x = \frac{K_x}{M} \quad (1)$$

$$\ddot{y} + D_1 \dot{y} + v_0^2 y = \frac{K_y}{M} \quad (2)$$

$$\ddot{\varphi} + D_2 \dot{\varphi} + v_1^2 \varphi = \frac{N}{\Theta} \quad (3)$$

Es bedeuten:

- $P_x; P_y; K_x; K_y$ = Komponenten der Schubkraft $\mathfrak{P}$ bzw. $\mathfrak{R}$ in der x - und y -Richtung.
 $\nu_0/2\pi; \nu_1/2\pi$ = Reduzierte Eigenfrequenzen des Aquariums als Pendel.
 $D_1; D_2$ = Dämpfungskonstanten des Pendels.
 M = Masse des Aquariums inklusive Fisch und Zubehör.
 Θ = Trägheitsmoment des Aquariums inklusive Fisch und Zubehör, bezogen auf die vertikale Symmetrieachse.
 N = Moment der Kraft $\mathfrak{R}$, bezogen auf die vertikale Symmetrieachse.
 $x; y; \varphi$ = Auslenkungen bzw. Winkelauslenkung des Aquariums aus der Ruhelage.
 $\dot{x}; \dot{y}; \dot{\varphi}$ = Geschwindigkeiten bzw. Winkelgeschwindigkeit des Aquariums.
 $\ddot{x}; \ddot{y}; \ddot{\varphi}$ = Beschleunigungen bzw. Winkelbeschleunigung des Aquariums.

Im vorliegenden Fall entsteht die Dämpfung im wesentlichen durch den Luftwiderstand und kann daher ohne Einbuße an Genauigkeit vernachlässigt werden, d. h. es ist $D_1 = D_2 = 0$. Sind ferner die Kreisfrequenzen ω_n der Schubkraft des Fisches (im Fourier-Spektrum) groß im Vergleich zu den Eigenfrequenzen des Pendels, d. h. $\omega_n > \nu_0; \nu_1$, was, wie das Experiment zeigt, der Fall ist, so dürfen die Glieder $\nu_0^2 x; \nu_0^2 y; \nu_1^2 \varphi$ gegenüber den Gliedern $\ddot{x}; \ddot{y}; \ddot{\varphi}$ vernachlässigt werden. Damit gehen die Differentialgleichungen (1), (2), (3) über in

$$\ddot{x} \cong \frac{K_x}{M} \quad (4)$$

$$\ddot{y} \cong \frac{K_y}{M} \quad (5)$$

$$\ddot{\varphi} \cong \frac{N}{\Theta} \quad (6)$$

Mit Hilfe dieser Gleichungen (4), (5), (6) ist, wie aus einer Arbeit von F. GASSMANN¹⁾ zu entnehmen ist, die Messung der Komponenten und des Momentes der Schubkraft des Fisches folgendermaßen vorzunehmen.

¹⁾ F. GASSMANN, *Zur Bestimmung von Bodenbewegungen aus Registrierungen von Schwingungsmessern und Seismographen*, Festschrift SIA. der Eidgenössischen Technischen Hochschule (Zürich 1937).

Man montiert einen Beschleunigungsmesser des ersten Grundtyps, dessen Arbeitsrichtung mit der x -Richtung, und einen Beschleunigungsmesser des ersten Grundtyps, dessen Arbeitsrichtung mit der y -Richtung zusammenfällt, ferner einen Beschleunigungsmesser des zweiten Grundtyps in die Mitte des Aquariumbodens, wie aus Abb. 1 ersichtlich ist, und mißt damit den zeitlichen Verlauf der Beschleunigungen, z. B. während einer Fischintoxikation. Die erhaltenen Diagramme (Abb. 3 zeigt ein Beispiel eines Impulsiagrammes) werden mit M/α bzw. θ/α multipliziert, d. h. der Ordinatenmaßstab ist mit M/α bzw. θ/α zu erweitern. Die Zeitachsen bleiben unverändert. In bezug auf diese Koordinatensysteme zeigen nun die Diagramme den zeitlichen Verlauf der Komponenten und des Momentes der Schubkraft. Den Absolutwert der Schubkraft $\mathfrak{P}$, d. h. $|\mathfrak{P}|$, erhält man aus der Gleichung

$$|\mathfrak{P}| = \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \quad (7)$$

Sind $\bar{P}_x$; $\bar{P}_y$; $|\bar{\mathfrak{P}}|$ die zeitlichen Mittelwerte von P_x ; P_y ; $|\mathfrak{P}|$, so ergibt sich mit $\bar{P}_x = \bar{P}_y$, was aus Symmetriegründen zu erwarten ist, für $|\bar{\mathfrak{P}}|$:

$$|\bar{\mathfrak{P}}| = \sqrt{2} \bar{P}_x = \sqrt{2} \bar{P}_y \quad (8)$$

Bedeutet ferner:

I_x ; I_y = x - bzw. y -Komponente des Impulses des Fisches

t = Zeit

m = Masse des Fisches

ξ = x -Komponente der Geschwindigkeit des Fisches,

so gilt die Gleichung

$$\int_0^t P_x dt = \int_0^t m d\xi \quad (9)$$

oder

$$\int_0^t P_x dt = I_x(t) - I_x(0) \quad (10)$$

d. h. den zeitlichen Verlauf der x -Komponente des Impulses erhält man, sofern zu Beginn des Experimentes, also zur Zeit $t = 0$, der Fisch in Ruhe, d. h. $I_x(0) = 0$ ist, durch Integration der x -Komponente der Schubkraft. Diese Integration führt man am einfachsten, wie in der eben zitierten Arbeit von F. GASSMANN an einem Beispiel gezeigt wird, mit Hilfe eines Tischintegranten aus. Analog wie I_x ist I_y und analog wie $|\mathfrak{P}|$ ist der Absolutwert des Impulses zu bestimmen.

In diesen Berechnungen wurden die körpereigenen Bewegungen des Fisches vernachlässigt. Ferner verfälschen die mit jeder Fischbewegung verbundenen Oberflächenwellen, die relativ schwach gedämpft sind, die Meßresultate unter Umständen merklich. Diese Oberflächenwellen können aber, wie experimentell nachgewiesen wurde, durch sattes Aufsetzen einer Platte, z. B. einer Glasplatte, auf die Wasseroberfläche praktisch unterdrückt werden.

Gegenüber den bekannten «Zitterkäfigen», wie sie z. B. in Arbeiten von B. I. S. SCYMANSKY¹⁾ oder H. O. WAGNER²⁾ veröffentlicht wurden, ermöglicht die beschriebene Apparatur auch energetische Messungen, über die an anderer Stelle berichtet werden soll.

3. Aufbau einer Versuchsapparatur, Messung von Fischintoxikationen

Die nachstehend beschriebene Versuchsapparatur dient zur Messung des zeitlichen Verlaufes des Impulses. Um einen ersten Aufschluß über die Größe und den Frequenzumfang des Impulses zu erhalten, genügt es, eine Komponente, z. B. eine Translationskomponente des Impulses des Aqua-

Abb. 2. Versuchsapparatur zur Messung von Fischintoxikationen.

¹⁾ B. I. S. SCYMANSKY, Pflügers Arch 36 (1916) und Z. allg. Psychol. 18 (1918-1920).

²⁾ H. O. WAGNER, Z. vergl. Physiol. 12 (1930).

riums, zu messen. Dazu wurde das Aquarium an einem besonders hierzu gebauten Trägersystem mittels Stahlfedern aufgehängt (Abb. 2).

Zur Messung der Geschwindigkeit des Aquariums relativ zum Trägersystem dient ein Tauchspulensystem. Es besteht aus einer Drahtspule (Tauchspule), die am Aquarium befestigt ist und sich im Magnetfeld eines permanenten Magneten, der am Trägersystem befestigt ist, in einer Richtung frei bewegen kann. Jede Bewegung des Fisches führt damit zu einer Induktionsspannung in dieser Spule, die proportional zur Geschwindigkeit des Aquariums ist. Die induzierte Spannung hat im Mittel die

Abb. 3. Zeitlicher Geschwindigkeitsverlauf des Aquariums während einer Fischintoxikation.

Größenordnung Millivolt und wird mit Hilfe eines Meßverstärkers etwa 14000fach verstärkt. Die verstärkte Spannung wird einerseits einem Registriergerät, das sie proportional auf einem Filmstreifen aufzeichnet, und andererseits einem Kathodenstrahloszillographen, der eine unmittelbare Beobachtung des Spannungsverlaufes gestattet, zugeführt.

Das Registriergerät besteht aus drei Kristallzeigern, einer einfachen Optik (linearer Glühfaden, Hohlspiegel, Zylinderlinse) und einem Filmtransport. Die Filmgeschwindigkeit ist in vier Stufen regulierbar und kann dadurch den jeweiligen Versuchsbedingungen ohne großen Papierverschleiß angepaßt werden. Zur Kontrolle des Filmtransportes dient ein Zeitmarkierungsgerät. Zur Markierung besonderer Ereignisse ist es ferner jederzeit möglich, durch Betätigung des Episodenschalters einzelne Zeitmarken anzubringen.

Eine Kontrolle des p_H -Wertes, der Temperatur und anderer Eigenschaften des Mediums ist durch festen Einbau entsprechender Meßgeräte in das Aquarium ohne weiteres möglich.

Zur Untersuchung der Toxizität von Abwasser kann dieses direkt als Versuchsmedium verwendet werden.

Abb. 3 zeigt den zeitlichen Verlauf der Unruhe einer Regenbogenforelle, *Trutta iridea* Gibb., von 98,7 g Gewicht (Alter ab Schlüpftag 580 Tage, Länge total 18,5 cm, Höhe 4,5 cm), in Leitungswasser von $p_H = 7,4$ und von 13°C , dem pro Liter 74,7 mg NH_3 zugesetzt wurden (Filmgeschwindigkeit = 17 cm).

Abb. 4. Intoxikation von *Trutta iridea*.

In der obenstehenden Abb. 4, «Intoxikation von *Trutta iridea*», sind die Ruhe- und Erregungsphasen zweier gleichaltriger Regenbogenforellen (in Vivarium gezüchtet, Alter ab Schlüpftag 463 Tage), die beide, bei sonst gleichen Bedingungen, unter der Einwirkung von 74,7 mg NH_3 pro Liter Leitungswasser standen, vergleichsweise graphisch dargestellt. Die Zugabe des Ammoniaks (als Ammoniumhydroxyd) war im Zeitpunkt t_0 beendet. Die Abszisse stellt die Zeitachse dar. Auf ihr erkennt man die Ruhe und Erregungsphasen der Fische. Auf der Ordinate sind die mittleren Geschwindigkeiten $\dot{x}$ des vom Fisch in Bewegung gesetzten Aquariums (samt Zubehör) aufgetragen. Das Gewicht M des Aquariums inklusive Wasser, Fisch und Zubehör betrug etwa 21460 g. Die Höhen der schwarzen Flächen sind den von den Forellen erzeugten Impulsen $M\dot{x}$ proportional. Die Gewichte der beiden Versuchstiere betrugen 130,5 g (erste NH_3 -Vergiftung) bzw. 139,0 g (zweite NH_3 -Vergiftung).

Die erste Forelle zeigte nach 3'05", die zweite Forelle schon nach 12" die ersten Anzeichen von Unruhe. Beim ersten Tier trat der mutmaßliche Tod nach 6'25", beim zweiten Tier nach 6'43" ein. Auf weitere Einzelheiten, die aus der graphischen Darstellung hervorgehen, soll hier nicht eingetreten werden.

Die beschriebene Apparatur, die die Bewegung von Fischen kontinuierlich registriert und die man z. B. als *Tarachograph* (= Unruheschreiber) bezeichnen könnte, zeigt ferner einen Weg, wie auch an andern Lebewesen, sofern sich deren äußere Unruhe dynamisch manifestiert, Vitalitätsmessungen ausgeführt werden können.

SUMMARY

An apparatus has been developed and demonstrated, which may be used for measuring the motility and the vitality of fish and other animals under the action of different influences, for instance poisons. Under favorable experimental conditions, the energy can be estimated, which is shown by the animals in their *milieu extérieur*.

Die Verfasser sind Herrn O. GRETLER, Techniker der EAWAG., und der Firma HILFNER, BAUMANN & Co. (Atelier für Feinmechanik), Zürich, für ihre Mitarbeit bei der Konstruktion des Filmtransportes sowie Herrn R. BERGER, Feinmechaniker am Institut für Geophysik, für seine Mitarbeit bei den Vorversuchen und Frä. LILLY KELLER, Laborantin, für ihre Hilfe bei der Durchführung von Versuchen zu aufrichtigem Dank verpflichtet.