# Strömungsbedingte Schwingungen

Autor(en): **Billeter, Peter**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **83 (1991)**

Heft 9

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-941021

**Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

**Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

**http://www.e-periodica.ch**

# Strömungsbedingte Schwingungen

## Messungen an einer Wehrschütze des Kraftwerks Eglisau

*Peter Billeter*


### Zusammenfassung

*Schwingungsprobleme an Stahlwasserbauten von Wasserkraftwerken können sowohl bei längst bestehenden als auch bei neu erstellten Anlagen auftreten. Sie beeinträchtigen den Betrieb und im schlimmsten Fall die Sicherheit der Anlage. Die Kenntnis der dynamischen Beanspruchung von Stahlwasserbauten ist deshalb für den projektierenden Ingenieur und den Kraftwerksbetreiber gleichsam bedeutend. Nach einer knappen Einführung in die Grundlagen strömungsbedingter Schützenschwingungen, werden Messungen vorgestellt, die im Sommer 1989 an einer Schütze der Wehranlage beim Kraftwerk Eglisau am Rhein durchgeführt wurden. Die daraus gewonnenen Resultate erlauben es, das hydrodynamische Verhalten der Schütze detailliert zu beschreiben.*

### Résumé

*Les problèmes posés par la vibration des structures hydrauliques en métal peuvent être rencontrés tant dans les anciens que dans les nouveaux aménagements. Ils portent préjudice à l'exploitation, voire à la sécurité de la construction. La connaissance de la sollicitation dynamique de ces constructions est importante pour le réalisateur, de même que pour l'utilisateur de l'ouvrage.*
*Après une brève énumération des notions de base liées au phénomène de vibration des vannes induite par l'écoulement, les résultats des mesures effectuées en été 1989 sur une vanne du barrage d'Eglisau sont présentés. Ils permettent de décrire le comportement dynamique de la vanne d'une manière détaillée.*

### Summary

*Flow-induced vibrations of hydraulic control devices may occur in both old and new power plants. These vibrations could not only interfere with the operation practice, but could also cause damages affecting the safety of the power plant. Therefore, the knowledge of the hydrodynamic forces acting on control devices is of great interest to engineers involved in either designing, constructing or operating hydro power plants.*
*Following a short introduction to the basics of flow-induced gate vibrations, extended data of a prototype investigation is presented. This investigation has been carried out at a weir gate of the Eglisau power plant, located on the river Rhine, on the Swiss border to Germany. The results of the investigation made it possible to give a detailed description of the gate behaviour under hydrodynamic loads.*


## 1. Einleitung

Schwingungsphänomene bei Abschluss- und Regulierorganen von Wasserkraftanlagen wurden erstmals um 1930 systematisch untersucht und sind noch heute Gegenstand vieler analytischer und experimenteller Forschungsarbeiten. Das Auftreten strömungsbedingter Schwingungen setzt eine fluiddynamische Anregung und einen elastischen Resonator voraus. Da zwischen diesen beiden Teilen des Schwingsystems komplexe Kopplungsmechanismen spielen können, existieren auch heute kaum analytische oder numerische Methoden, die das Problem unter Berücksichtigung variierender Randbedingungen zu erfassen vermögen. Es ist deshalb nach wie vor notwendig, wasserbauliche Schwingungsphänomene anhand von physikalischen Modellen oder von Messungen «in situ» zu untersuchen. Die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich (VAW) ist verschiedentlich mit Modellversuchen über strömungsbedingte Schwingungen von Wehr- und Grundablassschützen beauftragt worden; im Rahmen einer Untersuchung zuhanden der Nordostschweizerischen Kraftwerke AG (NOK) ergab sich die Gelegenheit, Naturdaten über das hydrodynamische Verhalten einer Wehrschütze aufzunehmen.

## 2. Situation Wehranlage des Kraftwerks Eglisau

Das in den Jahren 1915 bis 1920 erbaute Rheinkraftwerk Eglisau besteht im wesentlichen aus dem am Südufer errichteten Maschinenhaus mit sieben vertikalachsigen Francis-Turbinen und der gegen Norden hin angeschlossenen Wehranlage mit sechs Öffnungen. Die Anlage bewirkt einen Aufstau des Rheins auf die Kote von 343,48 m ü. M., daraus werden bis ca. 400 $m^3/s$ des Rheinabflusses (Ausbauwassermenge) über eine Fallhöhe von ca. 9 bis 11 m (bei Hoch- bzw. Niederwasser) turbiniert. Das Wehr besteht aus sechs Öffnungen mit einer lichten Weite von 15,5 m, die mit genieteten Doppeltafelschützen abgeschlossen sind. Das Wasser kann über diese Schützen entweder durch reines Unter- bzw. Überströmen oder durch eine Kombination dieser beiden Betriebsarten abgeführt werden (Bild 1). Die Haupttragelemente der beiden Schützentafeln sind horizontale, parabelförmige Fachwerkträger, die in vertikaler Richtung über Querträger verbunden sind. Die Wasserlast wird über die sechs Hauptträger auf die vertikalen Seitengurtungen und auf die Rollenlager in den Nischen der Wehrpfeiler übertragen. An der Sohle wird die Schütze mit einem Eichenbalken von 34 cm Breite gedichtet (Bild 2). Dieser Sohlbalken ist durch die Abrasionswirkung der Strömung an den Kanten stark abgeschliffen. Die Schützen werden vom ca. 16,5 m über der Staukote auf die Wehrpfeiler aufgesetzten Dienststeg aus angetrieben. Die Aufzugsvorrichtung besteht aus sogenannten Gallschen Ketten und den in die Tragstruktur des Dienststeges eingebauten Windwerken.

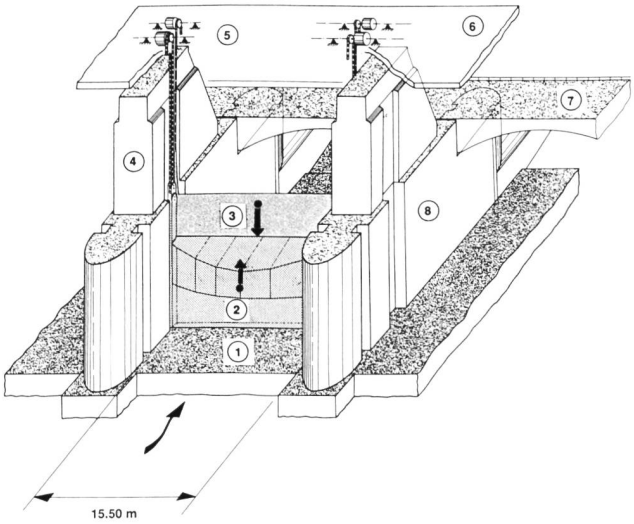



Bild 1. Schemaskizze einer Wehröffnung der Kraftwerkanlage Eglisau: 1 Wehrsohle, 2 Untere Schützentafel, 3 Obere Schützentafel, 4 Aufzugsketten, 5 Windwerke, 6 Dienststeg, 7 Wehrbrücke, 8 Wehrpfeiler.

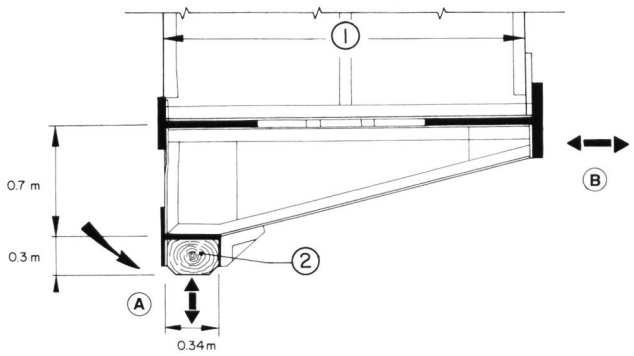



Bild 2. Detail der Schützenlippe der unteren Schützentafel. 1 Parabel-förmiger Hauptträger, max. statische Höhe 2,4 m, 2 Sohldichtungsbalken aus Eiche. Mit A und B sind die Positionen und Anregungsrichtungen des Exzenters bezeichnet, der für die Anregung der frei in der Luft hängenden Schütze verwendet wurde.

## 3. Theoretische Überlegungen

Strömungsbedingte Vibrationen von Strukturen im allgemeinen und Schützen im besonderen können als Folge von Druckschwankungen in der Grenzschicht des Fluids entlang den Rändern der Struktur betrachtet werden. Werden diese Druckschwankungen und somit die auf die Struktur wirkenden Fluidkräfte periodisch und wirken sie auf eine schwingfähige Struktur entweder in deren Eigenfrequenzbereich oder wird deren Schwingfrequenz durch die Fluidkräfte mit der Erregerfrequenz synchronisiert, so kann diese Struktur in einen Schwingungszustand versetzt werden. Für den Fall Eglisau sind im wesentlichen zwei Schwingungsformen denkbar (Bild 3): vertikale Schwingungen der Schütze in den Aufzugsketten (im folgenden als vertikale Masseschwingungen bezeichnet) und horizontale Biegeschwingungen der Schützentafeln.

### *Vertikale Masseschwingungen der Schützentafeln*

Die beiden Schützentafeln und ihre Aufzugsketten bilden ein näherungsweises lineares Masse-Feder-System mit einem Verschiebefreiheitsgrad in vertikaler Richtung. Aus dem Impulssatz, bezogen auf den Schwerpunkt der Schützenmasse, folgt dann die Bewegungsgleichung:

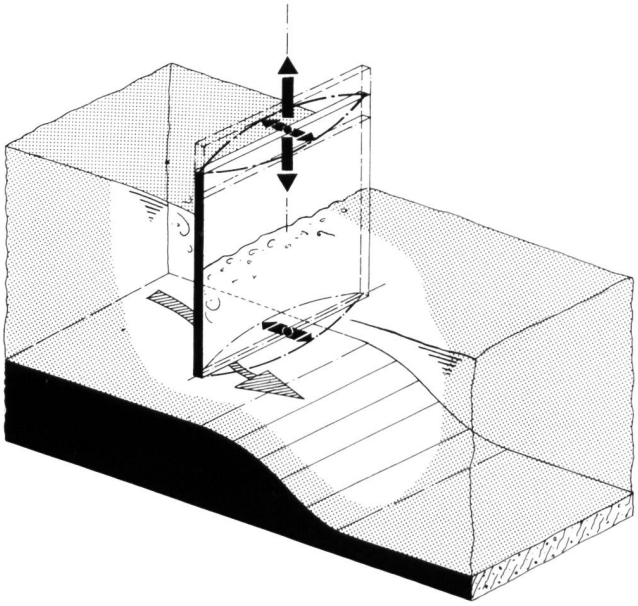


Bild 3. Prinzipskizze: Darstellung der beiden möglichen Hauptschwingungsformen der Schütze Eglisau. Aufgrund der Struktur des Tragwerks werden die beiden Schwingungsformen meist kombiniert auftreten und sich gegenseitig stark beeinflussen.

$$m\, d^2z/dt^2 + c\, dz/dt + k\, z = F(t, z, dz/dt, d^2z/dt^2) \qquad [1]$$

Mit $m$ = Schützenmasse, $c$ = Dämpfungskonstante bei viskoser Dämpfung, $k$ = Federsteifigkeit der Ketten, $z$ = vertikale Bewegungskoordinate der Schütze in Funktion der Zeit $t$ und $F$ = hydrodynamische Anregung. Die von der Bewegungsfunktion und deren Ableitungen abhängigen Komponenten der hydrodynamischen Anregung lassen sich auf die linke Seite der Gleichung [1] nehmen; diese schreibt sich dann:

$$(m + m_w)\, d^2z/dt^2 + (c + c_w)\, dz/dt + (k + k_w)\, z = F(t) \qquad [2]$$

Darin entspricht $m_w$ der mitschwingenden Wassermasse oder «added mass» und ist der von der Schützenbeschleunigung abhängige Anteil der hydrodynamischen Erregung. $c_w$ ist die hydrodynamische Dämpfung («added damping») und bezeichnet die von der Schützengeschwindigkeit abhängigen Strömungskräfte; im Falle von $(c + c_w) < 0$ (negative Dämpfung) besteht die Wahrscheinlichkeit selbsterregter Schwingungen. Die hydrodynamische Steifigkeit («added rigidity») $k_w$ hat im allgemeinen geringen Einfluss oder kann, da sie bei linearen Schwingsystemen um 180 Grad phasenversetzt mit der «added mass» wirkt, unter $m_w$ subsummiert werden. Der Term $m_w$ bewirkt eine Verschiebung der Eigenfrequenz des Systems im Wasser gegenüber der Eigenfrequenz des Systems in der Luft. Vereinfacht schreibt sich die Schwingfrequenz der freien vertikalen Schützenschwingung unter Berücksichtigung der mitschwingenden Wassermasse und unter Vernachlässigung der Dämpfung zu:

$$f = 1/2\pi\,(k/m + m_w)^{1/2} \qquad [3]$$

Anzufügen ist hier, dass in obiger Betrachtung ausschliesslich viskose Dämpfung angenommen wurde. In Wirklichkeit und vor allem im Fall der Schütze Eglisau ist zudem noch sogenannte Coulomb- oder Reibungsdämpfung vorhanden. Ein solcher, bewegungsunabhängiger Reibungsterm hat unter anderem einen Einfluss auf Amplitude und Resonanzfrequenz des Schwingsystems (vgl. *Thang* [12]).

### *Horizontale Biegeschwingungen der Schützentafeln*

Die Schützentafeln werden durch Strömungskräfte auf Biegung beansprucht und können, im Falle des Auftretens eines Erregermechanismus, zu schwach gedämpften elastischen Schwingungen in Strömungsrichtung angeregt werden. Das Schwingsystem «Schützentafel» ist ein zwei- oder, bei einer Beschränkung der Betrachtung auf die Hauptträger, ein eindimensionales Kontinuum und hat somit theoretisch unendlich viele Freiheitsgrade. Die Bewegungsgleichung für jeden Punkt des Biegeträgers unter Vernachlässigung der geringen strukturellen Dämpfung lautet analog zu Gl. [2]:

$$\partial^4 w/\partial y^4\, [EI(y) + EI_w(y)] + \partial^2 w/\partial t^2\, [\mu(y) + \mu_w(y)] = F_w(t, \partial w/\partial t) \qquad [4]$$

Darin ist $y$ die Längenkoordinate des Trägers, $w(y, t)$ die Durchbiegung als Funktion des Orts $y$ und der Zeit $t$, $EI(y)$ die Biegesteifigkeit, $\mu(y)$ die Trägermasse pro Längeneinheit, $(\partial^2 w/\partial y^2) \cdot EI(y)$ der innere elastische Widerstand, entsprechend der negativen Momentenbeanspruchung des Trägers, und $F_w$ die hydrodynamische Belastung pro Längeneinheit. Wiederum sind $EI_w(y)$ und $\mu_w(y)$ die von den Bewegungsfunktionen des Trägers abhängigen Fluidkräfte und werden entsprechend zu Gl. [2] als «added rigidity»

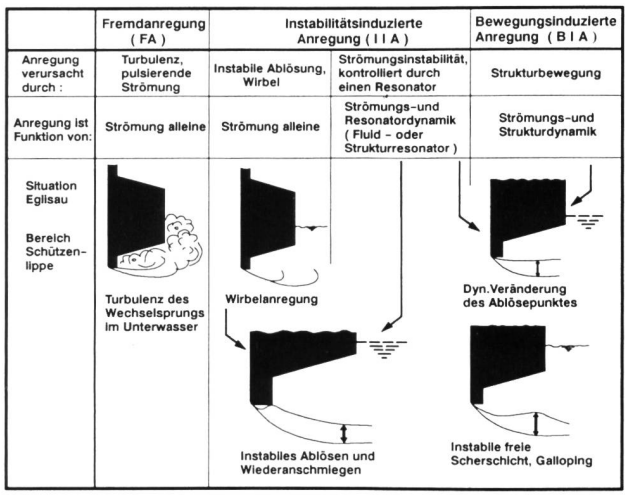



Bild 4. Klassifizierung der bei der Schütze Eglisau denkbaren Anregungsmechanismen. Die Kategorien wurden aus der Klassifizierung von *Naudascher* [10] übernommen.

bzw. als «added mass» bezeichnet. Unter Vernachlässigung des Einflusses von $EI_w(y)$ oder unter Subsummierung von $EI_w(y)$ unter $m_w(y)$ schreibt sich die $n$-te Eigenfrequenz des frei schwingenden Trägers im Wasser unter Vernachlässigung der Dämpfung zu:

$$f_{wn} = n\,C_1\,[EI(y)/\mu(y) + \mu_w(y)]^{1/2} \qquad [5]$$

Die Eigenfrequenz bei $n = 1$ entspricht der Frequenz der Grundschwingung, $C_1$ ist eine von geometrischen und statischen Randbedingungen abhängige Konstante.
Ein dimensionsloser Parameter, der zur Charakterisierung von Schwingungsphänomenen verwendet wird, ist die reduzierte Geschwindigkeit $v_r$:

$$v_r = v/f_n\,d \qquad [6]$$

mit $f_n$ = Schwingfrequenz der Schütze, $d$ = Sohllippenbreite, $v$ = Ausflussgeschwindigkeit unter der Schütze (bei kleinen Öffnungen und Unterströmen: $v = (2 \cdot g \cdot H)^{1/2}$, $H$ = Stauhöhe, g = Erdbeschleunigung). Die reduzierte Geschwindigkeit ist umgekehrt proportional zur auch gebräuchlichen Strouhal-Zahl. Im weiteren ist die relative Schützenöffnug $s/d$ ($s$ = Öffnung der Schütze, $d$ = Breite der Sohllippe) von Bedeutung.
Anregungsmechanismen, die zu strömungsbedingten Schwingungen führen, können z.B. nach *Naudascher* [10] in drei Hauptgruppen eingeteilt werden. Am Beispiel der Schütze Eglisau sind diese Hauptgruppen untenstehend kurz beschrieben (Bild 4):

*I. Fremdanregung (FA):* Erzwungene Schwingungen als Folge der Turbulenz der sich annähernden oder entfernenden Strömung. Bei dieser breitbandigen Anregung antwortet die Struktur in ihrer Eigenfrequenz. In Eglisau ist eine Anregung der Schütze als Folge der Einwirkung von periodischen Druckschwankungen aus dem Wechselsprung möglich, im Falle, dass dieser die Gurtungen berührt.

*II. Instabilitätsinduzierte Anregung (IIA):* Darunter fallen selbsterregte oder -gesteuerte Schwingungen infolge instabiler Ablösungen an der umströmten Struktur. Eine Anregung kann als Folge von periodischen Ablösungen allein oder aufgrund einer durch den Resonator gesteuerten Instabilität auftreten. In Eglisau sind folgende Mechanismen denkbar:

a) Periodische Wirbelablösungen am breiten Sohlbalken im Falle, dass die Schützenlippe vom Unterwasser her eingestaut ist (Wirbelanregung, $v_r = 2 \div 3$, $s/d = 0{,}3 \div 1{,}5$).
b) Instabiler Ablösepunkt des freien oder eingestauten Ausflussstrahls am breiten Sohlbalken, evtl. gesteuert durch die Schützenbewegung ($s/d = 0{,}2 \div 2{,}0$).
c) Instabile, durch die Schützenbewegung gesteuerte Scherschicht zwischen Ausflussstrahl und eingestautem Unterwasser ($s/d = 0{,}2 \div 2{,}0$).

*III. Bewegungsinduzierte Anregung (BIA):* Dieser Begriff bezeichnet eine Gruppe von Mechanismen, die dann auftreten, wenn Strukturbewegungen die Strömungs- und Druckverhältnisse um den Körper verändern. Dazu gehören:

a) Galloping: Anregung durch negative Dämpfung; die bewegungsabhängige Fluidkraft ist primär proportional zur Schwinggeschwindigkeit und kompensiert die ebenfalls geschwindigkeitsabhängige Dämpfung, $v_r > 10$.
b) Durchflussgekoppelte Selbstanregung: Mechanismen, bei denen durch bewegungsbedingte Druckänderungen und/oder Variationen des Durchflusses die Frequenzeigenschaften des Schwingsystems verändert und Energie in dieses eingetragen wird, $v_r = 5 \div 12$, $s/d = 0{,}7 \div 3{,}0$).

Angefügt sei, dass bei den meisten Schwingungsphänomenen die Zuordnung eines eindeutigen Mechanismus im allgemeinen und die Unterscheidung zwischen den selbstgesteuerten Mechanismen IIE b) und c) und den selbsterregten Mechanismen BIA im besonderen schwierig ist.
Die oben geschilderten Mechanismen können eine Struktur sowohl in vertikaler (Quer-)Richtung wie auch in Strömungsrichtung anregen. *Müller* [8] erkannte bereits 1933, dass eine Schütze unter hydrodynamischer Anfachung im allgemeinen räumliche Schwingungen ausführt. Diese Schwingungen setzen sich meist aus den verschiedenen, den Freiheitsgraden des Systems entsprechenden Eigenschwingungsformen zusammen. Die obenstehende Beschreibung von Schwingungsmechanismen beschränkt sich auf den Bereich der Schützenlippe. Auch Welleneffekte im Oberwasser, ein instabiler Überfallstrahl infolge schlechter Belüftung und Spaltströmungen durch die Führungsnuten oder durch die Dichtungen können Schwingungen anregen oder verstärken. Aus der hier vorgestellten Untersuchung ging jedoch hervor, dass für die Schütze Eglisau die, hinsichtlich hydrodynamischer Einwirkungen, kritischen Elemente der breite Sohlbalken und die auf geringer Höhe ab Wehrsohle weit in das Unterwasser ragende Tragkonstruktion sind (Bild 2). Detailliertere Angaben über strömungsbedingte Schwingungen und die sie verursachenden Anregungsmechanismen sind u.a. bei *Hardwick* [2] und *Kolkmann* [5, 6], *Miller* [7], *Naudascher* und *Rockwell* [9], *Thang* [12] und *Thang* et al. [13, 14] zu finden.

## 4. Messkonzept

Wie im Abschnitt 3 beschrieben, wirken in einem Schwingsystem Massenträgheits-, Dämpfungs-, Feder- und Erregerkräfte zusammen. Ein Schwingsystem lässt sich hinreichend beschreiben, wenn wenigstens zwei dieser vier Kraftgrössen messtechnisch erfasst werden. Mit untenstehendem Messkonzept (Bilder 5 und 6) wurde diese Bedingung zumindest für die vertikalen Massenschwingungen berücksichtigt.

### *Datenerfassung*

Die Beschleunigungen auf den Schützentafeln wurden mit gesamthaft zehn induktiven Beschleunigungsmessgebern

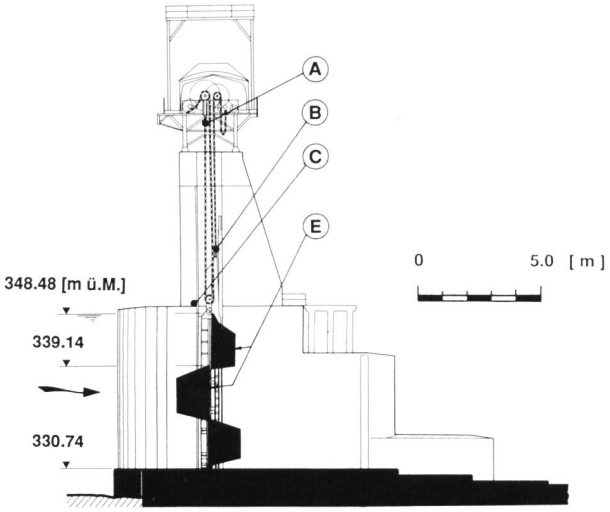



Bild 5. Anordnung der Messstellen an der Schütze und an den Ketten, dargestellt im Schnitt durch die Wehröffnung. A Aufzugsketten der unteren Schützentafel; Kraftmessung mittels DMS, B Aufzugsketten der oberen Schützentafel; Kraftmessung mittels DMS, C und E Beschleunigungsmessungen an total zehn Stellen auf den Schützentafeln.

von Hottinger, Baldwin Messtechnik, Darmstadt, (Typ B 12/200 und B 12/500) gemessen, die so eingesetzt wurden, dass aus den Signalen das räumliche Bewegungsverhalten der Tafeln rekonstruiert werden konnte. Die Messgeber wurden in wasserdichten Edelstahlgehäusen kraftschlüssig auf den Tragelementen der Schütze montiert. Die Kettenkräfte wurden mittels Dehnmessstreifen gemessen, deren Signale mit dem Eigengewicht der Schütze in der Luft geeicht wurden. Die Messstellen an den Ketten der oberen Schütze befanden sich am Übergang von den hochgezogenen Randgurtungen zu den Ketten, die Dehnmessstreifen an den Ketten der unteren Tafel wurden auf der Lamellenschmalseite knapp unterhalb der Kettenverankerung am Dienststeg angebracht (Bild 5). Die optimale Position der Dehnmessstreifen hinsichtlich der Linearität der Übertragung von Dehnungen auf Kräfte wurde an einer Modellamelle im Massstab 1:1 ermittelt.

Die analogen Signale aller Messsonden wurden mit digitalen Trägerfrequenz-Messverstärkern verstärkt. Die Signale wurden bei 200 Hz gefiltert, für alle Kanäle zeitgleich digitalisiert und auf eine IEEE-488(parallele)-Schnittstelle übergeben. Die Steuerung der Messverstärker, das Lesen der Daten an der Schnittstelle sowie die Speicherung und Auswertung der Daten erfolgten mittels eines Macintosh IIx mit dem Datenerfassungs- und Auswerteprogramm «LabVIEW». Eine Messserie aller 18 synchron erfassten Kanäle bestand pro Kanal aus 4096, mit einer Abtastrate von 600 Samples/s digitalisierten Messwerten, was eine Länge der Zeitreihen von 6,8 s ergibt (Bild 6).

Aus Sicherheitsgründen wurden sämtliche Messungen, zusätzlich zur Erfassung mit dem Computer, ab den Analogausgängen der Messverstärker auf zwei PCM(digitalen)-Bandgeräten gespeichert. Die sorgfältig abgestimmte und betriebssicher eingerichtete Messkette funktionierte über die ganze Dauer der Untersuchung problemlos.

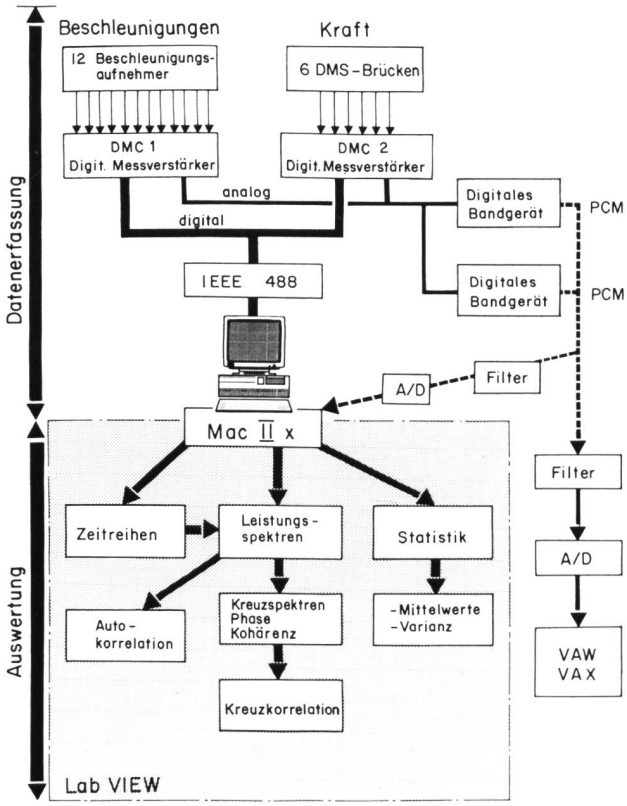



Bild 6. Schema der in Eglisau eingerichteten Messkette und der zur Auswertung verwendeten Rechenroutinen.

### *Datenauswertung*

Strömungsbedingte Vibrationen sind bei konstanten Randbedingungen im allgemeinen ergodische, d.h. auch stationäre Zufallsprozesse. Dies bedeutet, dass ein Ensemble einzelner, an bestimmten Stellen synchron aufgenommener Zeitreihen als repräsentativ für das Verhalten des ganzen Systems betrachtet werden kann. Die aufgenommenen Zeitreihen wurden hinsichtlich ihrer Mittelwerte, ihrer Varianz, ihres Frequenzgehalts (Leistungsspektren) und hinsichtlich ihres Verhaltens untereinander (Kreuzleistungsspektren, Phasengang, Kohärenz) ausgewertet. Näheres zur Aufnahme und Auswertung von stochastischen Daten («Random data») ist bei *Bendat* und *Piersol* [1] und *Hesselmann* [3] zu finden.

## *5. Eigenfrequenzen der Schütze in der Luft*

### *Vorberechnungen*

Für die beiden im Abschnitt 3 beschriebenen Schwingungsformen wurden die Eigenfrequenzen der Schütze im Medium Luft rechnerisch abgeschätzt.

A. Masseschwingungen der Schützentafeln in vertikaler Richtung:

Eine realistische Abschätzung der Federsteifigkeiten $k$ der Aufzugsketten wurde dadurch erreicht, dass das Dehnungsverhalten einer einzelnen Kettenlamelle mittels eines Finite-Elemente-Programms berechnet und daraus die Federsteifigkeit eines prismatischen Zugstabes mit analogem Dehnungsverhalten abgeleitet wurde. Mit den bekannten Schützenmassen $m$ (30 t für die obere, 120 t für die untere Tafel) ergaben sich die Eigenfrequenzen zu $f_n = (k/m)^{1/2}$ unter Vernachlässigung der Dämpfung (Tabelle 1).

B. Elastische Biege- und Biegetorsionsschwingungen der Schützentafeln:

Die Grundfrequenz der Biegeschwingung des untersten Hauptträgers in Strömungsrichtung wurde nach dem Verfahren von *Vianello-Stodola* abgeschätzt. Unter der Annahme stückweise konstanter, den Werten in den Knotenpunkten des Fachwerkträgers entsprechenden Biegesteifigkeiten wurde die Grundfrequenz zu 26 bis 33 Hz ermittelt, je nach Schätzung der pro Träger mitschwingenden Schützenmasse und je nach Einfluss der vertikalen Tragelemente.

Tabelle 1. Berechnete Eigenfrequenzen der Schützentafeln bei vertikaler Masseschwingung.

| Untere Tafel | | Obere Tafel | |
|---|---|---|---|
| Oeffnung [m] | Frequenz [Hz] | Oeffnung [m] | Frequenz [Hz] |
| 0.4 | 5.4 | 0.0 | 6.5 |
| 1.0 | 5.5 | 1.0 | 6.2 |
| 2.0 | 5.7 | 2.0 | 6.0 |

Tabelle 2. Hydraulische Daten während der Naturmessungen vom 1. und 2. August 1989.

| Datum, Zeit | Rhein-Abfluss [$m^3/s$] | Brutto-Fallhöhe [m] |
|---|---|---|
| 1.8.89, 18.00 | 820 | 9.68 |
| 1.8.89, 21.00 | 875 (Spitze) | 9.50 |
| 1.8.89, 22.00 | 810 | 9.72 |
| 2.8.89, 10.00 | 630 | 10.12 |
| 2.8.89, 18.00 | 660 | 10.05 |

## *Experimentelle Bestimmung der Eigenfrequenzen*

Mittels eines Exzenters, der eine Masse über eine Wegamplitude von 10 cm mit einer Frequenz von 4,5 Hz bis 13 Hz bewegte, wurde versucht, die Eigenfrequenzen der unteren Schützentafel in der Luft in vertikaler und in Biegerichtung zu bestimmen. Dafür musste der Schützenbereich mit den Dammbalken abgeschlossen und trockengelegt werden. Der Exzenter wurde wie in Bild 2 dargestellt einerseits in der Mitte des Sohlbalkens (Bestimmung der Eigenfrequenz des Systems «Schützentafel + Ketten» mittels vertikaler Anregung; die Schütze wurde dafür ca. 1,0 m aufgezogen), andererseits am untersten Hauptträger (Bestimmung der Biegegrundfrequenz der Schützentafel bzw. deren Hauptträger mittels horizontaler Anregung in Strömungsrichtung) befestigt.

Das Auffinden der Eigenfrequenzen der vertikalen Masseschwingung gestaltete sich infolge der grossen Reibungsdämpfung der Schütze in ihren Führungsnuten als recht schwierig. In Bild 7 ist eine Resonanzkurve als Auswertung der Versuche mit vertikaler Anregung dargestellt. Für die Anregung mit verschiedenen Frequenzen wurden die Amplitudenwerte des Antwortspektrums der Kettenkräfte an der Stelle der Anregungsfrequenz mit dem Amplitudenwert der Anregungskraft normiert und diese so gewonnenen Verstärkungsfaktoren über der Anregungsfrequenz aufgezeichnet. Die deutliche Amplitudenverstärkung bei 5,3 Hz lässt die Eigenfrequenz des Systems «untere Schützentafel + Aufzugsketten» vermuten, was gut mit dem errechneten Wert von 5,5 Hz bei einer Öffnung der unteren Schütze von 1,0 m übereinstimmt (Tabelle 1).

Die Grundfrequenz der Biegeschwingung des Hauptträgers B konnte direkt aus dem Leistungsspektrum des horizontalen Beschleunigungsgebers *k* bestimmt werden. Infolge der geringen strukturellen Dämpfung des Stahlträgers ist im Antwortspektrum der Leistungswert der Biegegrundfrequenz von 32 Hz gegenüber dem Leistungswert der Anregungsfrequenz von 10,6 Hz deutlich verstärkt (Anregung durch die 3. Harmonische; Bild 8). Wiederum stimmt der

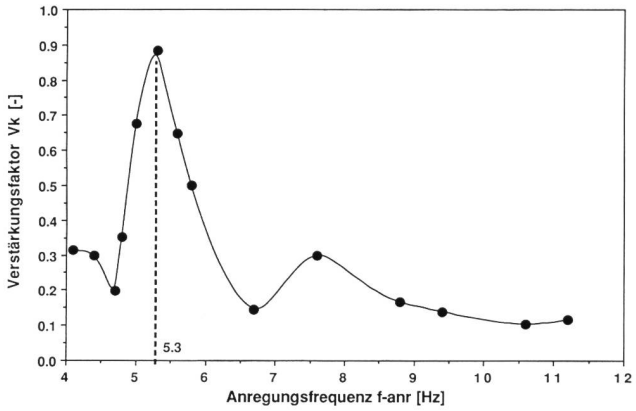



Bild 7. Resonanzkurve für die untere Schütze bei vertikaler Anregung. Die Schütze hängt frei in der Luft, die Öffnung der unteren Schütze beträgt ca. 1,0 m.

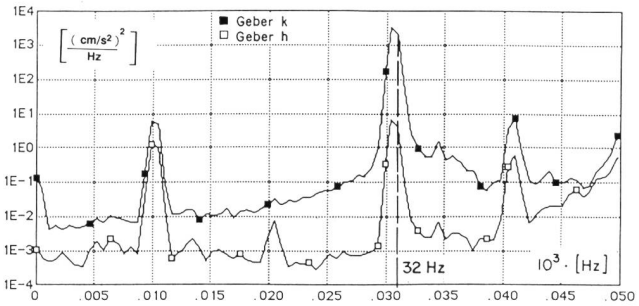



Bild 8. Leistungsspektren der Beschleunigungssignale der Geber h (untere Schütze, vertikale Messrichtung) und k (untere Schütze, Mitte unterster Hauptträger, horizontale Messrichtung) bei horizontaler Anregung durch den Exzenter mit einer Anregungsfrequenz von ca. 10,6 Hz. Ein starker Resonanzpeak tritt bei 32 Hz sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung auf, was ein Indiz für die Kopplung der beiden Bewegungsrichtungen ist.

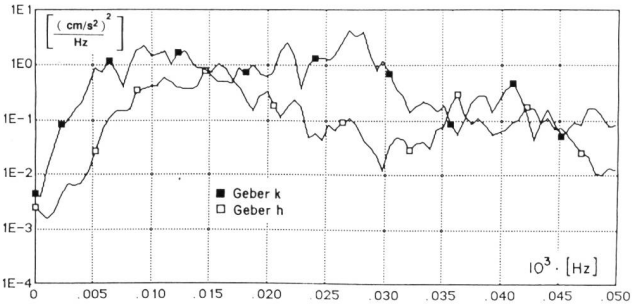



Bild 9. Naturmessungen: Leistungsspektren der Signale der Geber h (untere Schütze, vertikale Messrichtung) und k (untere Schütze, Mitte unterster Hauptträger, horizontale Messrichtung) bei einer Öffnung der unteren Schütze von 34 cm, obere Schütze geschlossen. Es sind keine prägnanten Frequenzspitzen zu finden.

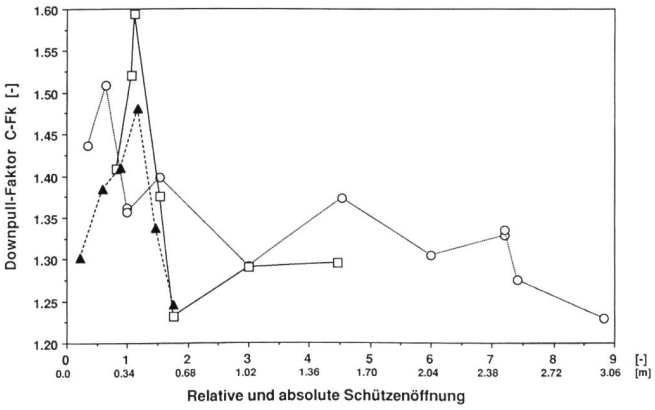



Bild 10. Naturmessungen: Vergrösserungsfaktor der Aufzugskräfte *C-Fk* (Downpull-Faktor) der unteren Schütze in Funktion deren Öffnung (relative Schützenöffnung: *s/d*, mit *s* = absolute Schützenöffnung, *d* = Sohlbalkenbreite [34 cm]). ○ obere Schütze geschlossen; □ obere Schütze 2,0 m, ▲ obere Schütze 2,5 m geöffnet. Der Wert *C-Fk* = 1,0 entspricht der Belastung unter Eigengewicht der unteren Schütze (120 t).

vorgängig rechnerisch bestimmte Wert recht gut mit dem experimentell bestimmten überein.

Bei beiden Anregungsrichtungen konnte in den Leistungs- und Kreuzspektren eine starke Kopplung zwischen vertikalen und horizontalen Bewegungen festgestellt werden. Eine vertikale Anregung bewirkte zum Beispiel, dass die auf dem obersten und dem untersten Hauptträger der unteren Schützentafel liegenden, in Strömungsrichtung zeigenden Geber starke, um ca. 150 Grad phasenversetzte Signale sowohl im Bereich der Anregungs- wie auch im Bereich der Biegegrundfrequenz der Hauptträger abgaben. In Folge der Ergebnisse der Ausschwingversuche lässt sich vermuten, dass durch eine vertikale Anregung am Sohlbalken, bedingt durch dessen exzentrische Lage bezüglich der statischen Mittelebene der als Tafel betrachteten Schütze, sowohl vertikale wie auch horizontale Bewegungen angefacht werden.

## 6. Untersuchungen bei verschiedenen Betriebszuständen

### Allgemeines

Anfang August 1989 wurden während eines mittleren Hochwassers im Rhein Messungen an der Schütze durchgeführt. Die wichtigsten hydraulischen Daten sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Gesamthaft wurden 46 Messserien bei den verschiedensten, auch im Betriebsreglement nicht vorgesehenen Schützenstellungen aufgenommen und damit das ganze Spektrum aller denkbaren Betriebsfälle der beiden Schützentafeln abgedeckt. Diese Betriebsfälle lassen sich folgendermassen einteilen:

1. Nur Unterströmen der unteren Schütze
2. Nur Überströmen der oberen Schütze

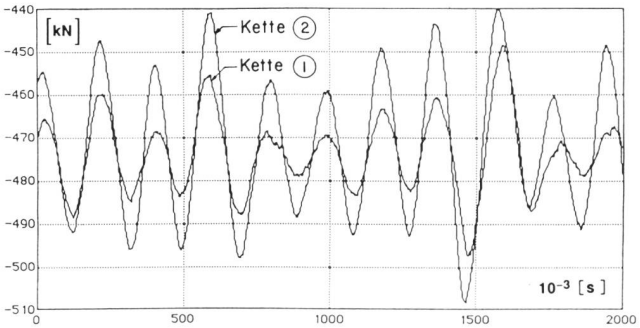



Bild 11. Naturmessungen, Schwingungszustand: untere Schütze 36 cm, obere Schütze 1,5 m geöffnet. Zeitreihen der Kraftsignale an je einem Strang der beidseitigen Aufzugsketten, die Signale sind ungefähr gleichphasig und zeigen praktisch einen sinusförmigen Verlauf. Die Kraftamplitude liegt bei ca. 30 kN.

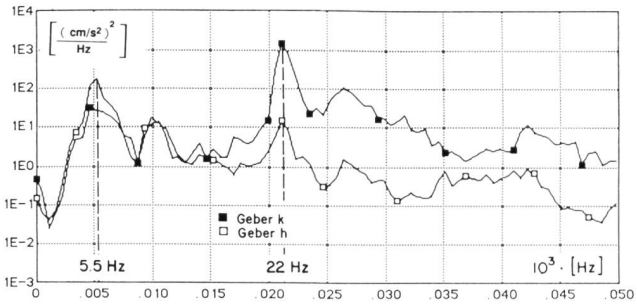



Bild 12. Naturmessungen, Schwingungszustand: untere Schütze 36 cm, obere Schütze 1,5 m geöffnet. Leistungsspektren der Geber h (untere Schütze, vertikale Messrichtung) und k (untere Schütze, Mitte unterster Hauptträger, horizontale Messrichtung). Die Spitzen bei den Frequenzen der beiden Hauptschwingungsformen (5,5 Hz vertikal und 22 Hz horizontal) sind deutlich sichtbar.

3. Kombiniertes Über- und Unterströmen der ganzen Schütze

Für die Betriebsfälle «nur Unterströmen» und «nur Überströmen» konnten keine beunruhigenden Phänomene festgestellt werden. Die dynamischen Schwankungen der Beschleunigungen und der Kettenkräfte (Standardabweichungen) lagen unter maximal 2% der Nominalwerte (Erdbeschleunigung bzw. Kettenkräfte unter Belastung durch das Schützeneigengewicht). Zudem zeigten die Spektren keine deutlichen Spitzen, was bedeutet, dass die geringen Vibrationen keine stark periodische Anteile enthalten (Bild 9).

Die Auswertung der mit der Schützenöffnung variierenden Mittelwerte der Kettenkräfte der unteren Schütze zeigte jedoch, dass dieser Kraftmittelwerte im Bereich von 0,2 bis 0,4 m Öffnung ($s_u/d = 0{,}6 \div 1{,}2$, $s_u$ = Öffnung der unteren Schütze, $d$ = Breite der Sohllippe) stark abfallen (Bild 10). Dies bedeutet, dass sich der durch die Fliesskräfte bedingte mittlere «Downpull» auf die Schützentafel mit steigender Öffnung stark verringert, was als Indiz für einen möglicherweise schwingungsgefährdeten Betriebsbereich gewertet werden kann (vgl. dazu *Thang* und *Naudascher* [13]: der Abfall des Downpulls ist identisch mit einer positiven Steigung des sogenannten «mean lift coefficient», beide in Funktion der Schützenöffnung dargestellt).

Tatsächlich konnte ein Schwingungszustand bei kleiner Öffnung der unteren Schütze und gleichzeitiger grosser Öffnung der oberen Schütze festgestellt werden. Ausserhalb dieses, im Betriebsreglement nicht vorgesehenen Zustandes verhielt sich die Schütze auch im kombinierten Betrieb (Über- und Unterströmen) ruhig. Der klar begrenzte Bereich auftretender Schwingungen konnte von oben und von unten her problemlos durchfahren werden. Die Grösse des hydrodynamischen Downpulls und die daraus resultierende Mehrbeanspruchung der Aufzugsketten bis maximal 160% der Nominalbeanspruchung (Beanspruchung infolge des Schützeneigengewichts) ist beachtlich (Bild 10). Da jedoch die Aufzugsketten unter der Nominallast nur gering ausgelastet sind (gemessene Randspannung und damit maximale Zugspannung in den Kettenlamellen unter Schützeneigengewicht $s_{R,\,max}$ = 62,79 N/mm² bei einer nachgewiesenen Fliessspannung $s_f \geq 300$ N/mm²), kann diese hydrodynamische Mehrbeanspruchung problemlos aufgenommen werden.

### Schwingungszustand

Bei einer Öffnung der unteren Schütze von 36 bis 38 cm (eine Öffnung, die etwas grösser ist als die Breite des Sohlbalkens $d$ = 34 cm) bei gleichzeitiger Öffnung der oberen Schütze von 1,0 bis 2,0 m stellte sich ein stabiler Schwingungszustand ein, der mehrmals reproduziert werden konnte und auch bei veränderten hydraulischen Randbedingungen (Änderung des Abflusses im Rhein und damit Änderung des Unterwasserstandes zwischen 2,8 m und 3,18 m ab Wehrsohle, Bruttofallhöhe zwischen 9,98 m und 9,6 m) noch auftrat. Dieser Schwingungszustand setzt sich einerseits aus einer vertikalen Schwingung der Schützentafeln in ihren Aufzugskettem bei einer Frequenz von 4,6 bis 5,5 Hz, andererseits aus überlagerten Biegeschwingungen der Schützentafeln in Strömungsrichtung bei 21,1 bis 22,2 Hz zusammen (Bilder 11 und 12). Die beiden Schwingungsformen sind in Tabelle 3 näher beschrieben.

Die Veränderung der Öffnung der oberen Schütze bewirkt einerseits eine Änderung der Reibungsverhältnisse zwischen den beiden Schützentafeln, andererseits wird mit kleinerer Öffnung der oberen Schütze die Eintauchtiefe des gesamten Schützenkörpers verkleinert, was gemäss *Thang*

Tabelle 3. Beschreibung des Schwingungszustandes.

| Oeffnung der unteren Schütze ist immer 34 cm. | Vertikale Masse-Schwingung | Horizontale Biege-Schwingung |
|---|---|---|
| Schwingfrequenz | 4.6 Hz bei 2.0 m bzw. 5.5 Hz bei 1.0 m Oeffnung der oberen Schütze. | 22.2 Hz bei 2.0 m bzw 21.1 Hz bei 1.0 m Oeffnung der oberen Schütze, moduliert mit der Frequenz der vertikalen Schwingung. |
| Reduzierte Geschwindigkeit $V_r$ | 7.5 ÷ 9.0 | 1.86 ÷ 1.96 |
| Beschleunigungsamplituden | 0.6 ÷ 1.9 m/s², im Mittel ca. 1.0 m/s² = 10 % der Erdbeschleunigung g, gemessen auf der unteren Schützentafel. | 1.9 m/s² ÷ 3.1 m/s² in der Mitte des unteren Hauptträgers. Maximale Werte nach Frequenzen aufgeteilt:<br>21.1 ÷ 22.2 Hz: 2.2 m/s² = 22 % von g<br>4.6 ÷ 5.5 Hz: 0.9 m/s² = 9 % von g |
| Kettenkraft-Amplituden | 10.5 bis 44.8 kN, im Mittel ca. 30 kN pro Strang, entsprechend 10 % der Beanspruchung aus Eigengewicht. | |

[11] einen Einfluss auf die in Abschnitt 3 beschriebene «added mass» hat. Dieser «added mass»-Einfluss wie auch die Änderung der Reibungsverhältnisse bewirken die Verschiebung der Schwingfrequenz der vertikalen Masseschwingung zwischen 4,6 und 5,5 Hz. Vergleicht man zudem die Schwingfrequenzen im Betrieb mit der Eigenfrequenz des Systems «untere Schützentafel + Ketten» in der Luft (ca. 5,3 Hz), so wird ersichtlich, dass für den Fall Eglisau die Grösse der «added mass» $m_w$ eher klein und nicht nur positiv ist. Für die Annahme einer harmonischen Schwingung folgt aus Gl. [3]:

$$m_w = m_s\,(f_1^2/f_w^2 - 1) = +39{,}3 \text{ t bei } 4{,}6 \text{ Hz oder}$$
$$-8{,}6 \text{ t bei } 5{,}5 \text{ Hz}$$

Darin ist $f_1$ die Eigenfrequenz des Systems in der Luft, $f_w$ die Schwingfrequenz des Systems im Naturbetrieb und $m_s$ die Schützenmasse (entsprechend 120 t für die untere Schützentafel).

Bei der horizontalen Biegeschwingung bewegen sich der untere und der obere Hauptträger der unteren Schützetafel für die Frequenz von 21 bis 22 Hz entgegengesetzt, so dass die Tafel einer Art Biegetorsionsschwingung unterliegt. Diese Schwingung wird auch auf die obere Schützentafel, deren Biegegrundfrequenz ebenfalls bei ca. 21 Hz liegt, übertragen. Aus den Spektren wie auch aus den Zeitreihen der Beschleunigungssignale scheint hervorzugehen, dass die Biegeschwingungen entweder durch die 4. oder durch die 5. Harmonische der vertikalen Masseschwingung angeregt werden (Bild 12). Dies würde in Übereinstimmung mit den Erkenntnissen aus den Versuchen an der Schütze in der Luft stehen (Abschnitt 4). Die Kopplung zwischen der vertikalen Masseschwingung und der horizontalen Biegeschwingung ist beispielsweise in Bild 13 ersichtlich. In diesem Fall liegt die Frequenz der Biegeschwingungen nicht genau in einer Harmonischen der Masseschwingung, so dass sich die beiden Schwingungsformen gegenseitig verstimmen. Anzufügen ist, dass nebst der strukturellen auch eine hydrodynamische Kopplung zwischen den beiden Schwingungsformen denkbar ist.

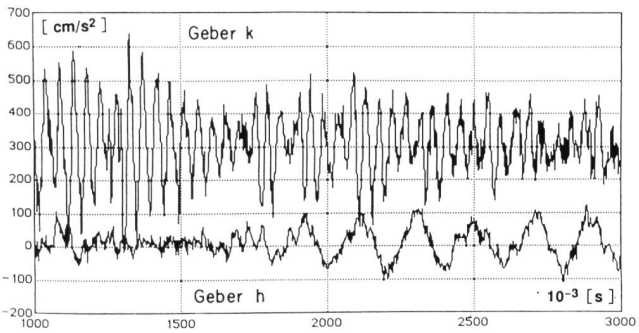



Bild 13. Naturmessungen, Schwingungszustand: untere Schütze 36 cm, obere Schütze 1,5 m geöffnet. Zeitreihen der Signale der Geber h (untere Schütze, vertikale Messrichtung) und k (untere Schütze, Mitte unterster Hauptträger, horizontale Messrichtung). Die gegenseitige Beeinflussung, ein Indiz für hydro- und/oder strukturdynamische Kopplungsphänomene, ist ersichtlich.

### *Anregungsmechanismus*

Im Fall Eglisau wird der Anregungsmechanismus primär durch die hydraulischen Verhältnisse an der Schützenlippe bestimmt. Im Schwingungszustand ist jedoch der Bereich der Lippe durch den Überfallstrahl verdeckt, was die Beschreibung des Mechanismus erschwert. Für den Betriebsfall «nur Unterströmen» konnte festgestellt werden, dass an beiden Messtagen (d.h. bei verschiedenen Unterwasserständen) ab einer Öffnung der unteren Schütze von ca. 30 cm die Lippe und der untere Hauptträger in der Mitte der Schütze nicht mehr eingestaut waren und nicht vom Wechselsprung berührt wurden. Es scheint aber, dass infolge der Energiedissipation des Ausflussstrahls an den seitlichen Führungsnuten der Wechselsprung in den Randzonen den Lippenbereich der Schütze einstaut (Bild 14). Unter Berücksichtigung der Messresultate können somit die in Abschnitt 3 beschriebenen Anregungsmechanismen IIA b) und BIA wirksam sein. Auf die Frage, warum der an eine bestimmte Öffnung der unteren Schütze (36 bis 38 cm) gebundene Anregungsmechanismus erst bei einer Öffnung der oberen Schütze im Bereich von 1,0 bis 2,0 m wirksam wird, sind zwei Antworten denkbar:

a) Mit dem Herunterfahren der oberen Schütze wird die Gesamtdämpfung des Systems und vor allem die Reibungsdämpfung zwischen der oberen und der unteren Schütze vermindert.
b) Der schlecht belüftete Überfallstrahl verändert die hydrodynamischen Verhältnisse im Lippenbereich so, dass Schwingungen auftreten können.

### *Beanspruchungsamplituden*

Für die vertikale Masseschwingung stimmen die Amplituden der Beschleunigungen des Schützenkörpers und die Kettenkraftamplituden recht gut überein und liegen bei ca. 10% der Erdbeschleunigung bzw. bei ca. 10% der Kräfte unter Eigengewicht der Schütze. Damit darf angenommen werden, dass die aus der Masseschwingung vertikal auf die Schützen und Aufzugsketten wirkenden Beanspruchungen allgemein bei ca. 10% der Beanspruchungen aus Eigengewicht liegen (Tabelle 3 und Bilder 11 und 13).
Die Beanspruchungsamplituden der Schützentafeln infolge der Biegeschwingungen können über die Durchbiegungen abgeschätzt werden. Die Biegeschwingung des unteren Hauptträgers kann als Überlagerung einer niederfrequenten harmonischen Schwingung (Index 1) bei $f_1 \approx 5{,}5$ Hz mit einer Amplitude von ca. $0{,}1 \cdot g$ ($= 1\ m/s^2$) und einer höherfrequenten harmonischen Schwingung (Index 2) bei $f_2 \approx 22$ Hz und einer Amplitude von $0{,}2 \cdot g$ beschrieben werden. Die Wegamplituden harmonischer Schwingungen können aus den Beschleunigungen durch eine Division durch das Quadrat der Drehfrequenz $\omega = 2\pi \cdot f$ berechnet werden. Somit ergeben sich die Durchbiegungsamplituden in Trägermitte bei maximaler Überlagerung:

$$w_1 = 0{,}84\ \text{mm},\ w_2 = 0{,}11\ \text{mm} \Rightarrow w_{max} \approx w_1 + w_2 = 0{,}95\ \text{mm}.$$

Für die Berechnung der Durchbiegung des unteren Hauptträgers unter hydrostatischer Belastung konnte die für die Vorberechnung aus den Konstruktionsunterlagen ermittelte Biegesteifigkeit des Trägers mit Hilfe der Exzenterversuche auf einen realistischen Wert korrigiert werden. Die mit dieser Biegesteifigkeit ermittelte Durchbiegung betrug in der Trägermitte $w_{stat} = 9{,}98$ mm. Unter der stark vereinfachenden Annahme, dass die Biegelinien des Trägers im Schwingungszustand und unter hydrostatischer Last geometrisch ähnlich sind, lässt sich die Biegebeanspruchung der Schütze abschätzen. Sie liegt in der Grösse von 10% der Beanspruchung aus hydrostatischer Belastung.

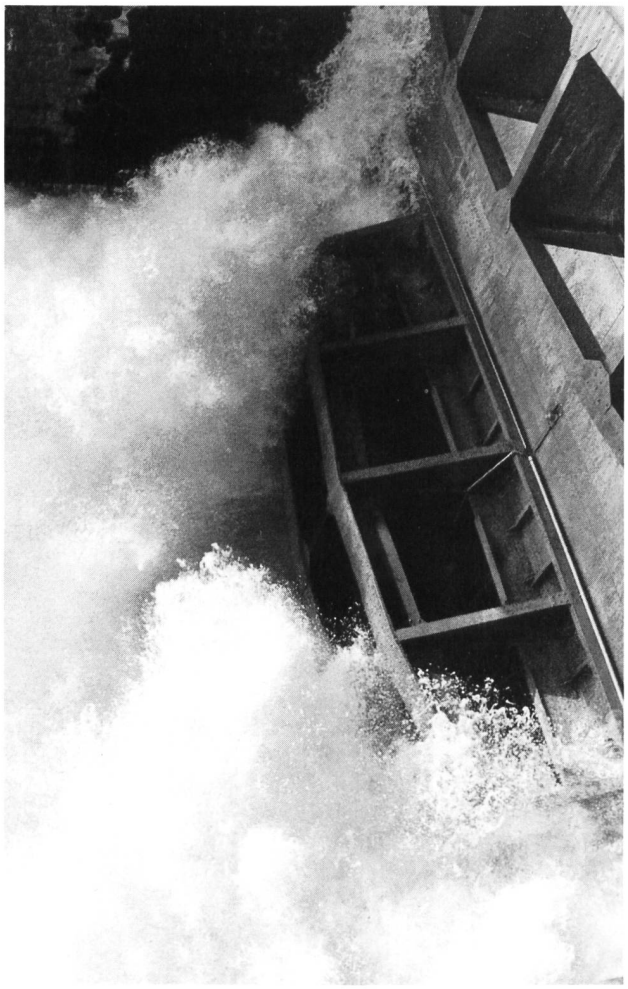


Bild 14. Naturmessungen 1. August 1989: Öffnung der unteren Schütze ca. 30 cm. Der Wechselsprung ist gekrümmt und berührt in der Mitte die Schützenkonstruktion nicht mehr.

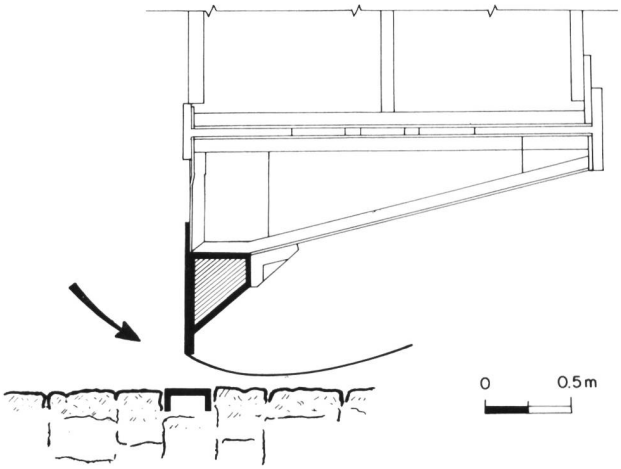



Bild 15. Mögliche Verbesserung der Geometrie der Schützenlippe. Der Ausflussstrahl wird sich bei dieser Ausbildung der Lippe an einem klar fixierten Punkt ablösen.

### *Verhinderung des Schwingungszustandes*

Da Schwingungen nur in einem kleinen und an sich nicht vorgesehen Betriebsbereich auftreten und die Schütze ausserhalb dieses Bereichs keiner gefährdenden hydrodynamischen Beanspruchung unterliegt, scheint es sinnvoll, den Schwingungszustand durch betriebliche Massnahmen zu verhindern. Dies würde zum Beispiel bedeuten, dass bei gleichzeitigem Unter- und Überströmen der Schütze der schwingungsgefährdete Bereich nur durchfahren und die untere Schütze nur mit einer Öffnung von mindestens 1,0 m betrieben wird. Bei Revisionen und Unterhaltsarbeiten muss dann darauf geachtet werden, dass die Reibungskräfte in den Führungsnuten und zwischen den beiden Schützentafeln nicht verkleinert werden. Die potentielle Schwingungsgefährdung könnte auch dadurch eliminiert werden, dass die breite Sohllippe mit der Holzdichtung durch eine Stahlschneide mit gegen das Unterwasser aufgesetzter Gummidichtung ersetzt würde (Bild 15). Die definitive Form dieser neuen Lippe müsste aus Sicherheitsgründen im hydraulischen Labor untersucht werden.

## *7. Schlussbemerkung*

Das Problem strömungsbedingter Schwingungen von Wehrschützen wurde einerseits in kurzer Form theoretisch dargestellt, anderseits mit der Untersuchung einer Schütze der Wehranlage Eglisau dokumentiert. Im Rahmen dieser Untersuchung zeigten Vorberechnungen und theoretische Überlegungen auf, dass die Schütze – falls sich ein Anregungsmechanismus einstellt – primär zwei Schwingungsformen unterliegen kann; vertikalen Masseschwingungen der Schützentafeln in ihren Aufzugsketten bei 5 bis 6 Hz und Biegeschwingungen der Tafeln in Strömungsrichtung bei 26 bis 33 Hz. Die experimentelle Bestimmung der Eigenfrequenzen an der in der Luft frei hängenden Schütze bestätigten diese Werte. Die Eigenfrequenz der vertikalen Schwingung ergab sich zu 5,3 Hz für die untere Schützentafel bei ca. 1,0 m Öffnung. Die Grundfrequenz der Biege-

frequenz betrug 32 Hz. Die Schütze unterlag in einem grossen Betriebsbereich keiner nennenswerten, hydrodynamischen Beanspruchung. Es zeigte sich jedoch, dass erstens der beim Unterströmen auf die untere Schütze wirkende «Downpull» bis zu 160 % der Aufzugskräfte aus dem Eigengewicht der Schütze beträgt, und dass zweitens die Schütze in einem eng begrenzten Bereich (Öffnung der unteren Schütze $s = 0{,}36 \div 0{,}38$ cm entsprechend $s/d \approx 1{,}1$, Öffnung der oberen Schütze $1{,}0 \div 2{,}0$ m) schwingungsgefährdet ist. Der in diesem Bereich auftretende Schwingungszustand setzt sich, wie vermutet, aus einer vertikalen Schwingung der ganzen Schütze bei 4,6 bis 5,5 Hz und Biegeschwingungen der Schützentafeln bei 21 bis 22 Hz zusammen. Beide Schwingungsformen bewirken Beanspruchungsamplituden der Schützenkonstruktion von ca. 10 % der Beanspruchung aus den Normallasten (Eigengewichte bzw. hydrostatische Lasten).

Mittels der aus dieser Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse und Werte ist es dem Kraftwerksbetreiber möglich, die Sicherheit der Wehranlage gegenüber hydrodynamischer Beanspruchung zu beurteilen und einen hinsichtlich Schwingungsphänomenen problemlosen Betrieb zu gewährleisten.

Verdankung

Der Verfasser dankt der Nordostschweizerischen Kraftwerke AG (NOK) in Baden für die Ermöglichung dieser Untersuchung und dem Personal des Kraftwerks Eglisau für die tatkräftige Unterstützung während der Vorbereitung und der Durchführung der Versuche.

Adresse des Verfassers: *Peter Billeter*, dipl. Bauing. ETHZ, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich, CH-8092 Zürich.

Literaturverzeichnis

[1] *Bendat, J. S.*, und *Piersol, A. G.*: Measurement and Analysis of Random Data; John Wiley & Sons, New York, 1967.

[2] *Hardwick, J. D.*: Flow-induced Vibrations of Vertical-Lift Gate; «J. Hydr. Div», ASCE, Vol. 100, No. HY5, 1974, pp. 631–644.

[3] *Hesselmann, N.*: Digitale Signalverarbeitung; Vogel Buchverlag, Würzburg, 1987.

[4] *Jongeling, T. H. G.*: Flow-induced Self excited In-flow Vibrations of Gate Plates; «J. of Fluids an Structurs», Vol. 2, No. 6, 1988, pp. 541–566.

[5] *Kolkman, P. A.*: Flow-induced gate vibrations; Delft Hydraulics Laboratory, Publication No. 164, 1976.

[6] *Kolkman, P. A.*: Development of Vibration-free gate Design: Learning from Experience and Theory; in [9], pp. 351–385.

[7] *Miller, C.*: Ein Beitrag zur Bestimmung der schwingungserregenden Kräfte an unterströmten Wehren; Mitteilung des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart, Heft 42, 1977.

[8] *Müller, O.*: Schwingungsuntersuchungen an unterströmten Wehren; Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau Berlin, Heft 13, 1933.

[9] *Naudascher, E.*, und *Rockwell, D.* (editors): Practical Experiences with Flow-induced Vibrations; IAHR/UTAM Symposium Karlsruhe, Springer, 1979.

[10] *Naudascher, E.*: On Identification and Preliminary Assessment of Sources of Flow-induced Vibrations; in [9], pp. 520–522.

[11] *Thang, N. D.*: Added Mass Behaviour and its Characteristics at Sluice Gates; «Proc. Int. Conf. on Flow-induced Vibrations in Fluid Engineering», BHRA Reading, England, 1982, pp. 13–28.

[12] *Thang, N. D.*: Strömungsbedingte Schwingungen unterströmter Schützen; Forschungsberichte der VDI Zeitschriften, Reihe 4, Nr. 66, 1984.

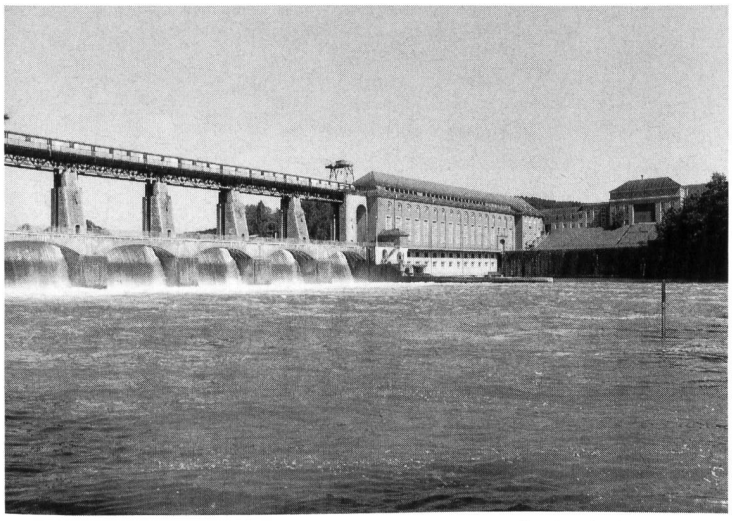
[13] *Thang, N. D.*, und *Naudascher, E.*: Self-excited Vibrations of Vertical-lift Gates; «J. Hydr. Research», IAHR, Vol. 24, No. 5, 1986, pp. 391–404.

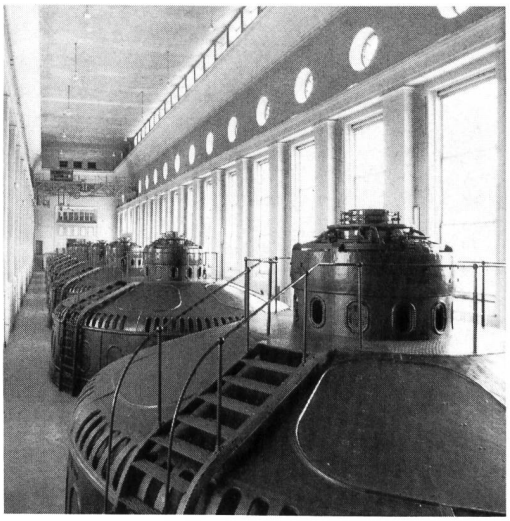
[14] *Thang, N. D., Lin, Q. H.*, und *Naudascher, E.*: Flexural Streamwise Vibration of Gate Plates under Vortex Action; «Proc. Int. Conf. on Flow-induced Vibrations», BHRA, Bowness-on-Widermere, 1987, pp. 171–184.

# *Das Kraftwerk Eglisau der NOK steht unter Denkmalschutz*

## *Aus der Baugeschichte*

Das Kraftwerk Eglisau in Rheinsfelden bei Glattfelden wurde 1915–1920 von den Nordostschweizerischen Kraftwerken (NOK), in deren Besitz die Anlage noch heute ist, erbaut. Das Projekt stammte von der Firma Locher & Cie., Zürich, von *Walter Wyssling* (1862–1945), Prof. ETH für angewandte Elektrotechnik, und *Gabriel Narutowicz* (1865–1922), Prof. ETH für Wasserbau. Die architektonische Gestaltung der Anlage entwarfen *Otto Pfister* (1880–1959) und *Werner Pfister* (1884–1950), die unter dem Firmennamen «Gebrüder Pfister» zu den wichtigsten Zürcher Architekten der 1. Hälfte des 20. Jahrhunderts gehörten. Mit der roten Farbe – einem Element des Nachkriegsexpressionismus – wurde eindeutig das stärkste Zeichen gesetzt. Der in seinen Funktionen gut ablesbare, im Stil des damals international aufkommenden Neuklassizismus gestaltete «Zweckbau» verfügt über ein vertraueneinflössend gestaltetes Wehr und ein langes Maschinenhaus, dessen geschickte Fenster-





Das 1915–1920 erbaute Rheinkraftwerk Eglisau wurde unter Denkmalschutz gestellt, was für die Erneuerung und den Ausbau auf höhere Leistung zur bestimmenden Randbedingung wurde. Links das Kraftwerk von Unterwasser her gesehen. Rechts die Maschinenhalle mit den 7 Turbinen-Generatoren-Einheiten, die erneuert weitere 80 (?) Jahre ihren Dienst versehen müssen.