

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Gebhardt, Michael; Deutscher, Martin; Metz, Walter

Fluid-Struktur-Wechselwirkung im Stahlwasserbau: Ursachen, Auswirkungen und Abhilfemaßnahmen bei strömungsinduzierten Schwingungen

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102275>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Gebhardt, Michael; Deutscher, Martin; Metz, Walter (2015): Fluid-Struktur-Wechselwirkung im Stahlwasserbau: Ursachen, Auswirkungen und Abhilfemaßnahmen bei strömungsinduzierten Schwingungen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Wasserbauwerke - Vom hydraulischen Entwurf bis zum Betrieb. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 59-66.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Fluid-Struktur-Wechselwirkung im Stahlwasserbau: Ursachen, Auswirkungen und Abhilfemaßnahmen bei strömungsinduzierten Schwingungen

Dr.-Ing. Michael Gebhardt, Bundesanstalt für Wasserbau
Dipl.-Ing. Martin Deutscher, Bundesanstalt für Wasserbau
Dipl.-Ing. (FH) Walter Metz, Bundesanstalt für Wasserbau

1. Einleitung

Die Vermeidung von Schwingungen bzw. die Berücksichtigung der dadurch verursachten dynamischen Belastungen ist bei der Planung von luft- oder wasserumströmten Hoch- und Tiefbauten von zentraler Bedeutung. Berühmte Schadensfälle, wie die winderregten Schwingungen an der Tacoma Bridge in den USA, zeigen, dass eine Nichtberücksichtigung nicht nur die Funktionsfähigkeit beeinträchtigen, sondern auch im Resonanzfall zur vollständigen Zerstörung der Konstruktion führen können. Auch im Wasserbau waren Schadensfälle, wie z.B. an der Staustufe Poppenweiler am Neckar (Bild 1) oder an der Staustufe Kachlet an der Donau (Ackermann, 1962), Anlass für intensive Untersuchungen zum Schwingungsverhalten von unter- und überströmten Wehrverschlüssen.

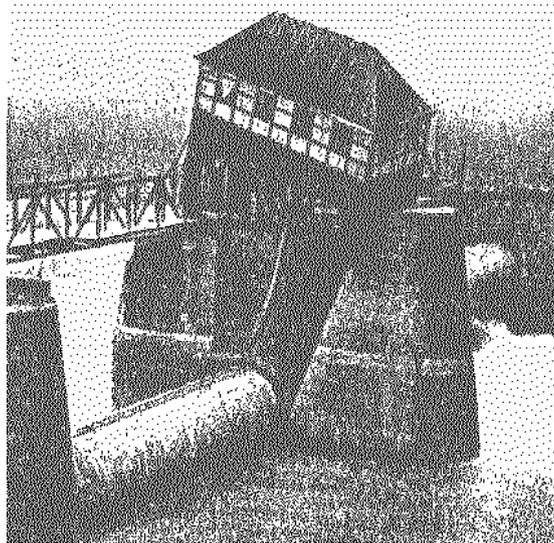


Bild 1: Die alte Wehranlage Poppenweiler nach dem Unfall im Jahre 1912 (Ackermann, 1962)

2. Zur Entstehung von Schwingungen

Strömungsinduzierte Schwingungen treten dann auf, wenn ein elastischer oder elastisch gelagerter Körper derart umströmt wird, dass zeitliche oder örtliche Druckschwankungen in der Strömung oder entlang der Strömungsberandung zwischen Körper und Fluid schwingungsanfachende Kräfte verursachen. Wie bei allen Schwingungsproblemen besteht das schwingfähige System aus einer

oder mehreren diskreten oder kontinuierlich verteilten Massen, die selbst elastisch oder elastisch gelagert sind, sodass die Auslenkung der Massen Rückstellkräfte in Abhängigkeit von der Auslenkung bewirkt (Billeter, 1998). Schwingungsuntersuchungen sind Bestandteil der Untersuchungen von Müller (1933), Petrikat (1955) oder eben Billeter (1998), um nur einige zu nennen. In Naudascher (1991) und Naudascher & Rockwell (1994) wird ein Klassifikationssystem für die strömungsbedingte Schwingungsanfachung vorgestellt (Bild 2), bei dem zwischen folgenden drei Hauptkategorien unterschieden wird:

- Fremdanregung (Extraneously Induced Excitation, EIE)
- Instabilitäts- bzw. wirbelbedingte Anregung (Instability Induced Excitation, IIE)
- Bewegungsinduzierte Anregung (Movement Induced Excitation, MIE)

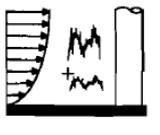
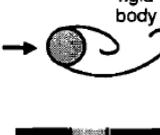
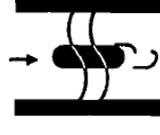
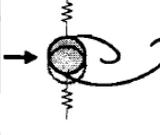
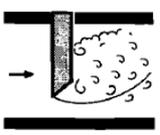
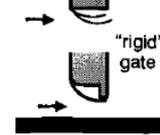
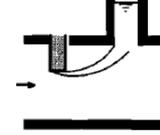
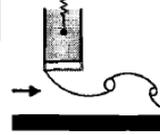
		EXTRANEOUSLY INDUCED EXCITATION (EIE)	INSTABILITY INDUCED EXCITATION (IIE)		MOVEMENT INDUCED EXCITATION (MIE)
		Excitation unaffected by oscillators FLUID-DYNAMIC	Excitation affected by fluid oscillator FLUID-RESONANT	Excitation affected by body oscillator BODY-RESONANT	
FEATURES	Excitation due to	Flow pulsations not intrinsic to system	Flow instability	Flow instability controlled by fluid-resonator	Self-excited movements of structure
	Excitation function of	Flow conditions alone (not affected by structural dynamics)		Flow conditions plus dynamics of fluid-oscillator	Flow cond. plus struct. dynamics
EXAMPLES	Cylindrical Structure				
	Gate				
		No Feedback		Feedback Body ↔ Flow	

Bild 2: Klassifizierung strömungsbedingter Anfachungen nach Naudascher (1991) und Naudascher & Rockwell (1994).

3. Motivation für Forschung und Entwicklung in der BAW

Mit dem Erscheinen des „Hydraulic Structures Design Manual“ von Naudascher (1991) hätte man annehmen können, dass die Thematik bereits umfassend und abschließend in der Forschung behandelt wurde und die daraus resultierenden Konstruktionsprinzipien in der Praxis verankert sind. Aktuelle Anfragen aus der WSV machen aber deutlich, dass strömungsinduzierte Schwingungen im Stahlwasserbau nach wie vor ein Problem darstellen: Fallbeispiele von Neckar, Main, Weser und Leine zeigen, dass Schwingungen sowohl an Wehrverschlüssen unterschiedlichen Typs und Alters, als auch an Füllschützen neuerer Stemmtoore von Schleusen auftreten.

Die Ursachen für die häufig zu beobachtenden Bauwerksschwingungen sind oftmals unklar. Grundsätzlich sind Konstruktionen mit großen Stützweiten und Druckhöhen, wie sie häufig an Bundeswasserstraßen zu finden sind, empfindlicher für elastische Verformungen und damit schwingungsanfälliger. Auch führten laut Büsching (1985) in den letzten Jahren neue Berechnungsverfahren, der Konkurrenzkampf der Hersteller und zeitweise hohe Stahlpreise zu immer leichteren und damit weicheren Konstruktionen, die kaum Spannungsreserven für dynamische Beanspruchungen aufweisen. Ob diese Schlussfolgerungen allerdings für die WSV zutreffen ist fraglich. Sicher ist, dass ein abnehmendes Know-How im Stahlwasserbau zu beobachten ist, sei es in den Verwaltungen, bei Ingenieurbüros oder ausführenden Firmen, aber auch in der Ausbildung der Hochschulen. Das hat zur Folge, dass teilweise bewährte Konstruktionsprinzipien vergessen oder durch die Priorisierung anderer Aspekte aufgegeben werden. Außerdem stellt sich aber auch die Frage, ob sich die vermeintlichen Konstruktionsprinzipien in der Praxis tatsächlich bewährt haben, da Erfolgskontrollen selten durchgeführt werden. Letztendlich sind Schwingungen an Stahlwasserbauverschlüssen auch von der subjektiven Wahrnehmung des Betreibers abhängig. Einige Betreiber kennen ihre Bauwerke so gut, dass schwingungsgefährdete Betriebszustände vermieden oder schnell durchfahren werden, sodass diese nicht mehr als problematisch wahrgenommen werden.

4. Untersuchungsziele und -methoden

Im Rahmen eines interdisziplinären Vorhabens zur Fluid-Struktur-Wechselwirkung im Stahlwasserbau sollen Ursachen bei strömungsinduzierten Schwingungen identifiziert, Auswirkungen analysiert und Abhilfemaßnahmen zur Vermeidung von Resonanzschwingungen konzipiert werden. Im Einzelnen sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- Entstehung, Formen und Energiegehalt von Schwingungen
- Klassifizierung typischer Schwingungsphänomene bei Stahlwasserbauverschlüssen
- Weiterentwicklung der Methoden zur numerischen Simulation von Fluid-Struktur-Kopplung (in Kooperation)
- Untersuchung der Fluid-Struktur-Wechselwirkung im Wesentlichen mit numerischen Verfahren und an Prototypen, je nach Schwingungsphänomen ggf. aber auch im Labormodell
- Verifizierung bestehender und (wo erforderlich) Entwicklung neuer stahlwasserbaulicher Konstruktionsprinzipien
- Abstimmung der Designs mit den Standardisierungsgruppen der WSV (Schleusen, Wehre & Sperrtore)

In den letzten Jahren wurden von der BAW bereits einige In-Situ Messungen durchgeführt, wie z.B. an den Wehranlagen Steinbach am Main, Dörverden an der Weser (Bild 3, links) und an der Schleuse Neckargmünd. Die gemessenen Schwingungen wurden auch hinsichtlich der auftreten-

den Frequenzen und Amplituden ausgewertet. In Steinbach wurden zudem verschiedene Messsysteme getestet. Weitere In-Situ Messungen sind geplant.



Bild 3: Schwingungen eines unterströmten Hubschützes mit Aufsatzklappe (links) und eines Sohl-dichtungsträgers an einem Hubsenkenschütz (rechts)

Für stahlwasserbauliche Konstruktionsdetails sollen strukturmechanische Berechnungen durchgeführt werden. Dabei steht insbesondere die Ermittlung der Eigenschwingungen unter Berücksichtigung der hydrodynamischen Massen der linear-elastischen Stahlkonstruktionen im Vordergrund. Mit Kenntnis dieser Bauteileigenschaften wird bei auftretenden Schwingungsphänomenen eine konkrete und schnelle Fehlersuche mit Hilfe der Schwingungsmessungen vor Ort erwartet. Weiter wird diese Betrachtung bei der Ausbildung von Neukonstruktionen hilfreich sein, damit im Betriebszustand die Eigenfrequenzen einzelner Bauteile nicht im hydrodynamischen Anfachungsbereich liegen. Beispielsweise liegt der Frequenzbereich bei der Schwingung eines Schützes quer zur Strömungsrichtung bei etwa 1 bis 2 Hz (Bild 3, links), während er bei der Schwingung einer Verschlusskomponente bei etwa 10 Hz (Bild 3, rechts) und bei der Schwingung eines Füllschützes an einem Stemmtor bei etwa 40 Hz liegt.

5. Numerische Untersuchungen zur Fluid-Struktur-Kopplung

Unter Fluid-Struktur-Kopplung wird im Allgemeinen die Berücksichtigung der gegenseitigen Beeinflussung von Struktur und Strömung bezeichnet. Dabei werden numerische Verfahren zur Strömungs- und Strukturberechnung miteinander gekoppelt. Bei der Simulation muss zwischen dem Grad der Kopplung von Struktur und Strömung unterschieden werden.

5.1 Strömungssimulation mit fester starrer Struktur (Typ A)

Hierbei wird die Umströmung der Struktur simuliert, wobei sich aus dem Druckfeld Kräfte ergeben, die zwar auf die Struktur wirken, diese aber nicht verschieben oder verformen. Hierbei ist die Struktur drehfest und unverschieblich gelagert und unendlich starr. Typische Anwendungen sind instabile Strömungsablösungen an einer Schützunterkante, die mit einem reinen Strömungslöser, z.B. mit der CFD-Software OpenFOAM, heute bereits simuliert werden können, um beispielsweise periodische Druck- oder Kraftschwankungen auf die Struktur zu ermitteln (Bild 4).

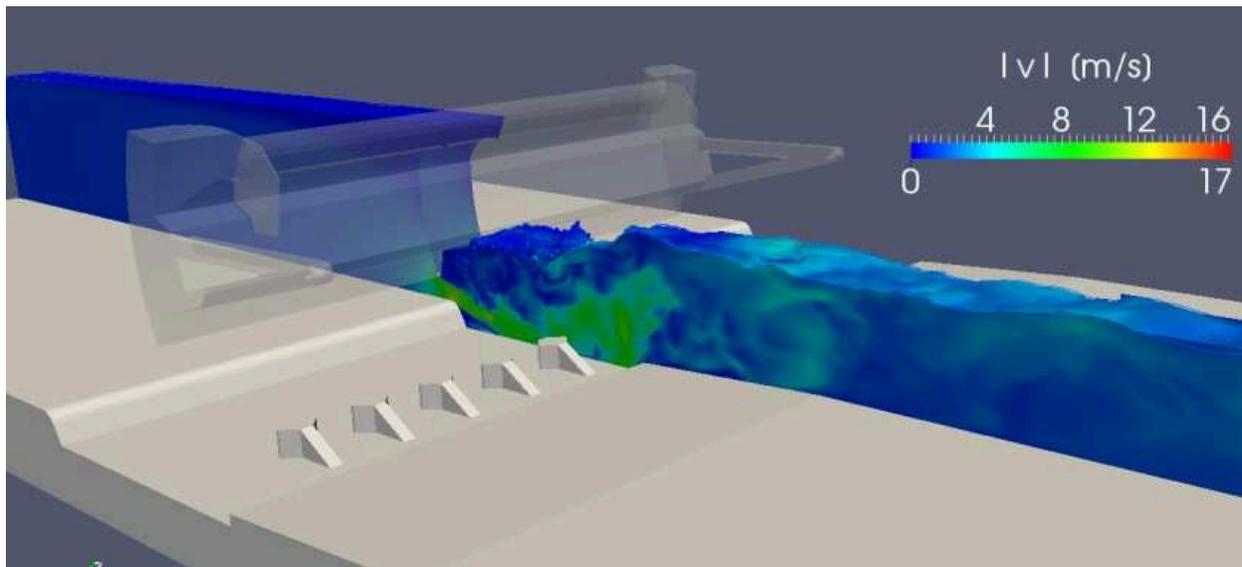


Bild 4: Numerische Berechnung eines unterströmten Drucksegmentes

Die Simulation instabiler Strömungsablösungen erfordert dabei eine hohe örtliche Diskretisierung im Bereich der Ablösung sowie eine hohe zeitliche Auflösung der Ergebnisausgabe und beansprucht somit entsprechende Rechenressourcen. Ein typische Problemstellung ist die Schwingungsanregung der unterwasserseitigen Stauhaut durch Turbulenzen im eingestauten Wechselsprung oder durch Instabilität des Tauchstrahls bei ungünstiger Wehrgeometrie (Bild 5a).

5.2 Strömungssimulation mit verschieblicher starrer Struktur (Typ B)

Dabei handelt es sich um eine Strömungssimulation mit verschieblicher starrer Struktur und einer Rückkopplung auf die Strömung. Im Gegensatz zu Typ A werden der Struktur Freiheitsgrade in einzelne Raumrichtungen oder um einzelne Raumachsen zugewiesen. Typische Anwendungen sind bewegte Festkörper wie z.B. Verschlüsse oder Schiffe in der Strömung, bei denen sich zwar die Struktur bewegt, sich dabei aber nicht verformt. Aus den Strömungsgrößen wird in jedem Zeitschritt die neue Position der Struktur bestimmt, die wiederum die Strömungsgrößen im nächsten Zeitschritt beeinflusst. Hier gibt es eine Schnittstelle zum FuE-Vorhaben „Entwicklung von Verfahrensweisen zur Simulation bewegter Objekte mit OpenFOAM“, sodass Synergien bei der Bearbeitung dieser Art von strömungsinduzierten Schwingungsphänomenen zu erwarten sind. Eine typi-

sche Problemstellung sind Schwingungen des Überfallstrahls evtl. gekoppelt mit Klappenschwingungen durch Instabilität des Überfallstrahls (Bild 5d).

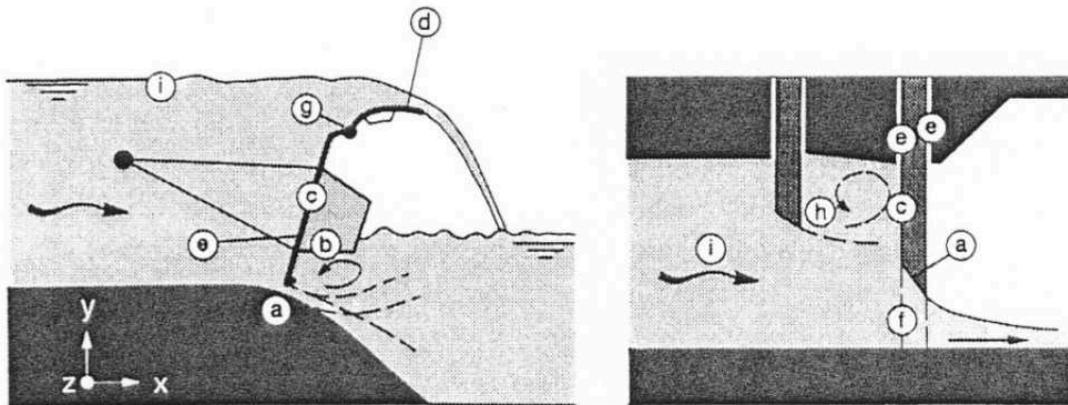


Bild 5: Zonen potentieller Schwingungsanfahrungen bei einem über- und unterströmten Verschluss (links) und bei einem Tiefschütz (rechts) nach Billeter (1998)

5.3 Strömungssimulation mit verschieblicher verformbarer Struktur und Rückkopplung auf die Strömung (Typ C)

Bei Typ C werden zusätzlich Verformungen der Struktur berücksichtigt. Eine typische Anwendung ist die Schwingung einer Dichtung. Hier treten große Verformungen der Struktur und damit eine starke Rückkopplung auf das Strömungsregime auf. Aus den Strömungsgrößen wird in jedem Zeitschritt die neue Position und Form der Struktur bestimmt, die wiederum die Strömungsgrößen im nächsten Zeitschritt beeinflusst. Die Methoden hierfür sind gegenwärtig Stand der Forschung. Eine typische Problemstellung sind Schwingungen, die durch Spaltströmungen vor allem bei abgehobenen Dichtungen entstehen und auf das gesamte Schütz oder einzelne Komponenten übertragen werden können (Bild 5e).

6. Ausblick

Schwingungen stellen eine Beanspruchung dar, für die die Verschlüsse nicht ausgelegt sind. Die dynamischen Beanspruchungen können dabei durchaus größer sein als die statischen Beanspruchungen. Vor diesem Hintergrund besteht Forschungsbedarf, um einerseits die Wissenslücken im Bereich der dynamischen Belastungen im Stahlwasserbau zu schließen, und andererseits bestehende stahlwasserbauliche Konstruktionsprinzipien auch mit neuesten Methoden zu prüfen. Wo erforderlich müssen neue Prinzipien entwickelt werden, um die Ergebnisse in die verschiedenen Standardisierungsgruppen der WSV einfließen zu lassen und damit künftige Schäden an schwingungsanfälligen Bauwerken zu vermeiden und um nachhaltig schwingungssichere Bauwerke zu konstruieren.

Literatur

- Ackermann, H. (1962): Schwingungen an unter- und überströmten Wehren und deren Beseitigung, Der Bauingenieur, Heft 9, S.337-344.
- Billeter, P. (1998): Strömungsinduzierte Schwingungen von Schützen mit mehreren Freiheitsgraden, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Heft 160.
- Büsching, F. (1985): Schwingungen eines Schiebetores infolge Undichtigkeit am Drempel, Bauingenieur, Heft 60, S.109-111.
- Müller, O. (1933): Schwingungsuntersuchungen an unterströmten Wehren. Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin, Heft 13.
- Naudascher, E. (1991): Hydrodynamic Forces. IAHR Hydraulic Structures Design Manual, A.A.Balkema, Rotterdam.
- Naudascher, E. & Rockwell, D. (1994): Flow-induced Vibrations – an Engineering Guide. IAHR Hydraulic Structures Design Manual, A.A.Balkema, Rotterdam.
- Petrikat, K. (1955): Schwingungsuntersuchungen an Stahlwasserbauten. Der Stahlbau, 24. Jahrgang. Heft 9, S. 198-289.

