

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Göbel, Georg; Gebhardt, Michael; Metz, Walter; Deutscher, Martin
Numerische Modellierung zur Untersuchung
strömungsinduzierter Schwingungen im Stahlwasserbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/104376>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Göbel, Georg; Gebhardt, Michael; Metz, Walter; Deutscher, Martin (2017): Numerische Modellierung zur Untersuchung strömungsinduzierter Schwingungen im Stahlwasserbau. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Wasserbauliche Herausforderungen an den Binnenschiffahrtsstraßen. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 17-22.

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.



Numerische Modellierung zur Untersuchung strömungsinduzierter Schwingungen im Stahlwasserbau

Georg Göbel M. Sc., Bundesanstalt für Wasserbau

Dr.-Ing. Michael Gebhardt, Bundesanstalt für Wasserbau

Dipl.-Ing. (FH) Walter Metz, Bundesanstalt für Wasserbau

Dipl.-Ing. Martin Deutscher, Bundesanstalt für Wasserbau

Einleitung

Im Wasserbau, insbesondere im Stahlwasserbau, besteht häufig die Gefahr von strömungsinduzierten Schwingungen. Das kann elastische Dichtungen, Füllschütze, Schleusentore oder Wehrverschlüsse betreffen. Grundsätzlich können dabei alle elastischen oder elastisch gelagerten Teile ein schwingfähiges System darstellen. Schwingungen können je nach Konstruktion, Strömungsverhalten und Betriebszustand auftreten. Kurzfristig auftretende Schwingungen an Schleusen oder Wehranlagen beeinträchtigen einerseits den Betrieb durch Lärm oder Wellenbildung. Andererseits können dynamischen Lasten, welche durch Schwingungen eingetragen werden, die statischen Lasten um ein Vielfaches übersteigen, was in der Bemessung meist nicht berücksichtigt wird. Häufige oder lang andauernde Schwingungen können durch Ermüdungsbeanspruchung die sichere Nutzungsdauer von Stahlwasserbauten deutlich herabsetzen.

Trotz intensiver Forschungen (u.a. Naudascher und Rockwell 1994 und Kolkman und Jongeling 2007) gibt es im Wasserbau nach wie vor Schwingungsprobleme. Das kann damit zusammenhängen, dass sich die Konstruktionsprinzipien im Stahlwasserbau im Laufe der Jahrzehnte weiterentwickelt und sich damit auch die Ursachen für strömungsinduzierte Schwingungen geändert haben. So sind beispielsweise Querschnittsformen von Sohlbalken zur Schwingungsvermeidung heute nahezu irrelevant, da Holzdichtungen praktisch nicht mehr eingesetzt werden. Doch auch bei Elastomer-Dichtungen muss neben einem hohen Maß an Dichtheit auch die Schwingungsgefahr beachtet werden. Aus wirtschaftlichen Gründen sowie aufgrund des technologischen Fortschrittes im Stahlbau werden Stahlwasserbaukonstruktionen tendenziell leichter (Büsching 1985) und ändern dadurch ihr Schwingverhalten. Verschlüsse mit Fachwerkstrukturen neigen dazu, sich bei Hochwasser mit Treibgut zu versetzen. Dadurch entstehen nicht nur zusätzliche Lasten, sondern auch ein erhöhter Unterhaltungsaufwand. Aus diesem Grund wird heutzutage die Aussteifung von großen Verschlüssen häufig mit Hohlkästen anstatt mit Fachwerkstrukturen vorgenommen. Wenn dann bei Unterströmung fluktuierende Druckschwankungen auftreten, bieten Hohlkästen im Allgemeinen eine größere Angriffsfläche als Fachwerke.

Im Zuge der Automatisierung von Wehranlagen gewinnt das Thema Schwingungen weiter an Bedeutung. Während das Personal vor Ort bei eventuell auftretenden Schwingungen zeitnah reagieren und Gegenmaßnahmen ergreifen kann, werden die Schwingungen im ferngesteuerten oder automatisierten Betrieb unter Umständen gar nicht bemerkt. Schwingungen können dabei über längere Zeit andauern und erhebliche Schäden verursachen. In jedem Fall wird die Lebensdauer der Anlage durch die hohe Anzahl von Lastzyklen deutlich herabgesetzt. Es gilt also, bestehende oder geplante Betriebskonzepte und Konstruktionsweisen auf schwingungsgefährdete Zustände hin zu untersuchen.

Bei Bedarf können Änderungen vorgenommen werden, so dass Schwingungen in Dauer und Amplitude reduziert, im Idealfall auch vollständig unterbunden werden.

Funktion der numerischen Werkzeuge

Das Open-Source Softwarepaket OpenFOAM® bietet dem Anwender ein umfangreiches Angebot an Lösern für verschiedene strömungsmechanische Problemstellungen. Durch seine Offenheit stellt es außerdem eine gute Basis für Anpassungen und Weiterentwicklungen dar. In der BAW wird OpenFOAM® seit mehreren Jahren erfolgreich zur Untersuchung bauwerkshydraulischer Fragestellungen genutzt.

Der Löser interDyMFoam ist geeignet für die Lösung von Problemen aus dem Bereich der Fluid-Festkörper-Interaktion. Die Simulation von Strömungen mit freier Oberfläche basiert auf der Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen (NSG) für inkompressible Fluide. Mithilfe der Volume-of-Fluid-Methode (VoF) kann für jede Zelle bestimmt werden, wie groß der Anteil von Luft und Wasser am Zellvolumen ist. Für bewegte Festkörper stehen verschiedene Bewegungseinschränkungen zur Verfügung. So können einerseits Freiheitsgrade durch Auflagerbedingungen unterdrückt werden. Andererseits kann die Bewegung durch Federn mit der Steifigkeit k [N/m] und Dämpfer mit der Dämpfungskonstante d [Ns/m] beeinflusst werden. Die Bewegung kann durch Gleichung [1] beschrieben werden.

$$k \cdot x + d \cdot \dot{x} + m \cdot \ddot{x} = F_{Hyd} \quad [1]$$

Der in interDyMFoam verwendete Löser bestimmt mit einem Leapfrog-Verfahren abwechselnd die Position x [m] und die Geschwindigkeit \dot{x} [m/s] in Abhängigkeit von der Beschleunigung \ddot{x} [m/s²], welche in einem Zwischenschritt über das Kräftegleichgewicht am Körper gelöst wird (Devolder et al. 2015). Die äußeren hydraulischen Kräfte F_{Hyd} werden aus den Druck- und Reibungskräften auf dem Rand des Körpers bestimmt. Ist die Bewegungsgleichung gelöst, wird der Körper verschoben, was eine Deformation des Rechengitters zur Folge hat (Bild 1). Durch die Verschiebung des Festkörpers verändert sich das Strömungsgebiet und somit das Ergebnis des Strömungslösers, was eine iterative Lösung innerhalb eines Zeitschrittes erforderlich macht. Die abwechselnde Lösung von Strömung und Festkörperbewegung muss so lange wiederholt werden, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht ist. Gegenüber einer Simulation ohne bewegte Festkörper multipliziert sich die Rechenzeit mit der Anzahl der Iterationen pro Zeitschritt. Je nach Anwendungsfall sind bis zu 20 Iterationen notwendig, um ein stabiles Ergebnis zu erhalten.

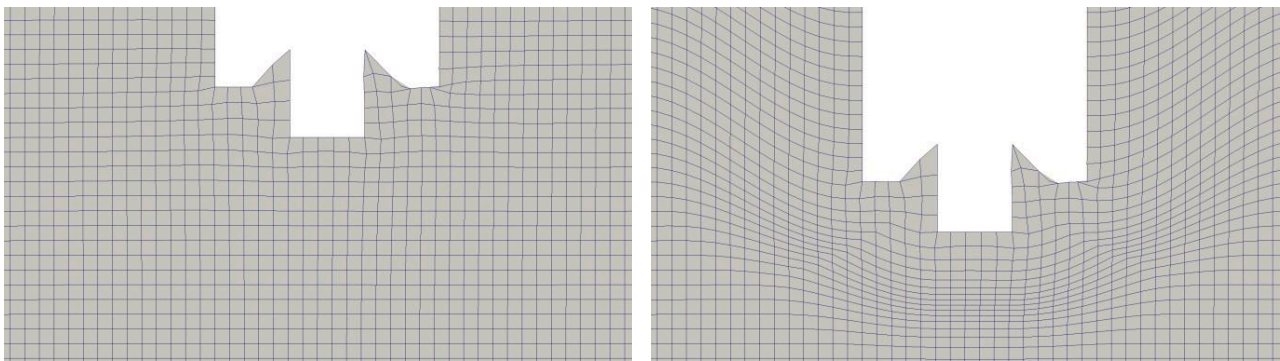


Bild 1: Links: Rechengitter im Ausgangszustand. Rechts: Rechengitter nach Verschiebung des Festkörpers nach unten.

Modellbildung

Wehrverschlüsse weisen oft sehr große Spannweiten auf. Eine häufig vorkommende Wehrfeldbreite an Bundeswasserstraßen ist 30 m, bei der Schütze, Walzen- oder Segmentverschlüsse eingesetzt werden. Es gibt aber auch Wehrfelder mit Breiten bis etwa 45 m. Aufgrund der seitlichen Lagerung in den Wehrnischen können Schütze als Biegebalken betrachtet werden, welche in erster Eigenform schwingen. Diese Verformung kann mit interDyMFoam nicht abgebildet werden, weswegen das mechanische Modell zu einem Einmassenschwinger vereinfacht werden muss (Bild 2).

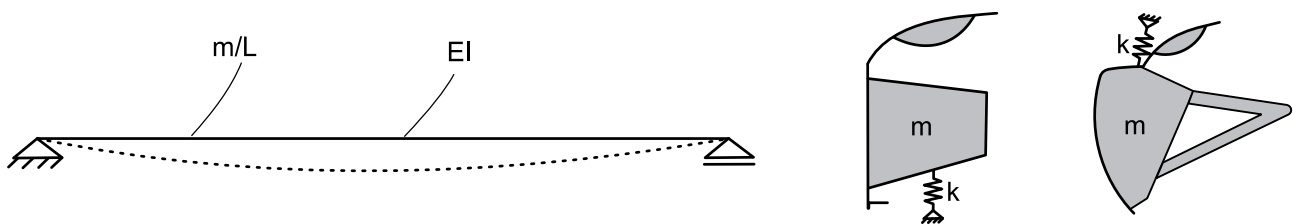


Bild 2: Schematische Darstellung eines Biegebalkens in erster Eigenform sowie Quasi-2D-Modelle eines Hubschützes mit Aufsatzklappe und eines Segmentverschlusses mit Aufsatzklappe.

Die Biegesteifigkeit EI [Nm^2] und die kontinuierliche Masse m/L [kg/m] müssen in eine diskrete Masse m [kg] und eine Federsteifigkeit k [n/m] umgerechnet werden. Der Zusammenhang zwischen k und m ist über die Eigenfrequenz f_0 [Hz] gegeben:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [2]$$

Die vertikale Durchbiegung eines Schützes führt dazu, dass der durchströmte Spalt über die Wehrfeldbreite nicht konstant ist und sich fluktuierende Druckänderungen nicht in gleichem Maße auf die Schützunterkante auswirken. Da sich bei kleinerer Spaltbreite stärkere Druckfluktuationen einstellen, ist die anfachende Kraft im 2D-Modell tendenziell größer. Dies muss bei der Interpretation der Ergebnisse beachtet werden. Bei Segmentverschlüssen hingegen schwingt der Verschluss um seine Drehachse und die Verformung spielt für die fluktuierende Spaltweite eine untergeordnete Rolle. In diesem Fall fällt die Betrachtung als Einmassenschwinger leichter, da keine Vereinfachung der Biegeform getroffen werden muss.

Die Reduzierung auf ein 2D-Modell ist im Allgemeinen möglich, weil das dominante Strömungsbild bei breiten Verschlüssen einen 2-dimensionalen Charakter hat und Randeinflüsse, wie zum Beispiel durch Pfeilernischen, vernachlässigt werden können. Mit einem 2D-Modell ergeben sich einige Vorteile. Gerade bei unterströmten Verschlüssen mit Öffnungsweiten von wenigen Zentimetern, muss das Rechengitter unter der Schützkante sehr fein sein. Diese feine Gitterstruktur auf einer Breite von bis 45 m durchzuführen führt zu Zellmengen, welche mit der zur Verfügung stehenden Rechenleistung nicht verarbeitet werden können. Die Erfahrungen zeigen, dass die Simulationsergebnisse mit einem reduzierten mechanischen Modell und einer zweidimensionalen Strömungssimulation die Realität sehr gut abbilden.

Einschränkungen bei der Verwendung von 2D-Strömungsmodellen ergeben sich allerdings bei der Wahl des Turbulenzmodells. Die Anwendung wirbelauflösender Methoden (beispielsweise Large Eddy Simulation) ist nicht möglich, da diese nur in dreidimensionalen Strömungsgebieten funktionieren. Aus diesem Grund müssen zur Turbulenzmodellierung RANS Modelle (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) verwendet werden.

Schwer abzuschätzen ist die mechanische Dämpfung des Systems. Im Falle eines Biegebalkens kann davon ausgegangen werden, dass die innere Dämpfung im Verhältnis zu den hydraulischen Effekten des umgebenden Wasser vernachlässigbar klein ist. Schwingt ein Segmentschütz um seine Lagerpunkte, kommt es durch die Reibung entlang der Seitendichtungen zu einer stärkeren Dämpfung. Diese quantitativ abzuschätzen ist allerdings nur schwer möglich.

Anwendung

An einem unterströmten Hubschütz mit Aufsatzklappe konnten bei geringem Abfluss und kleiner Hubhöhe starke Schwingungen festgestellt werden (Bild 3 links). Durch Messungen vor Ort konnte eine Biegeschwingung, wie in Bild 2 dargestellt, mit einer Frequenz von $f_0 = 1,5$ Hz bestimmt werden. Zur Analyse der Schwingungsursachen wurde um den Querschnitt, wie im Abschnitt ‚Modellbildung‘ beschrieben, ein quasi-2D-Rechengebiet aufgebaut. Hierzu wurde die Schnittebene vollständig diskretisiert. Das Gebiet hat dabei senkrecht zur Schnittebene nur eine Rechenzelle mit einer Breite von 1 m. Strömungsgrößen und deren Gradienten in dieser Richtung werden allerdings nicht ermittelt. Die Gesamtmasse des 42m breiten Verschlusses wurde auf $1/42$ reduziert. Die Federsteifigkeit wurde so kalibriert, dass die Eigenfrequenz bei Unterströmung $f_0 = 1,5$ Hz betrug.

Im Rahmen der Untersuchung wurden die Öffnungsweite sowie der Unterwasserstand variiert. Der Oberwasserstand wurde konstant auf Stauziel gehalten. Da die Schwingungen nur bei Unterströmung auftraten, wurden keine Zustände mit Überströmung betrachtet. Als Zielgröße der Untersuchung wurde der Dämpfungsgrad ξ gewählt. Für gedämpfte Schwingungen ist ξ positiv, für angefachte Schwingungen negativ. Die Ergebnisse der Untersuchung für insgesamt 25 Zustände sind in Tabelle 1 dargestellt.

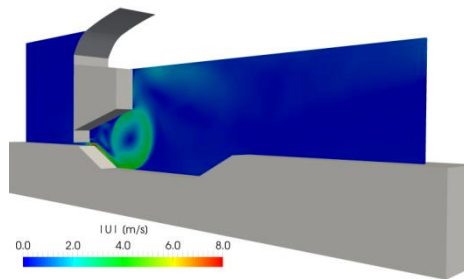


Bild 3: Links: durch Biegeschwingung hervorgerufene stehende Welle im Oberwasser eines Hub-schützes mit Aufsatzklappe. Rechts: Geschwindigkeitsverteilung im abgeleiteten 2D-Modell.

Tabelle 1: Dämpfungsgrad ξ in Abhängigkeit von Öffnungsweite s und Fallhöhe ΔH .

s [m]	0,050	0,075	0,100	0,125	0,150
ΔH [m]	Dämpfungsgrad ξ [-]				
3,44	-0,0303	-0,0103	-0,0486	-0,0043	0,0136
2,94	-0,0178	-0,0088	-0,0648	0,0006	0,0371
2,44	-0,0136	-0,0034	-0,0080	0,0052	0,0418
1,94	-0,0071	0,0031	0,0035	0,0364	0,0331
1,44	-0,0015	0,0107	0,0087	0,0215	0,0356

Es zeigt sich eine starke Abhängigkeit des Dämpfungsgrades von Fallhöhe und Öffnungsweite. Der Dämpfungsgrad nimmt mit zunehmender Öffnungsweite und abnehmender Fallhöhe zu, die Schwingungsgefahr sinkt somit ab. Dabei ist zu beachten, dass die Vereinfachung zum Einmassenschwinger und die Zweidimensionalität des Strömungsgebietes zu Ungenauigkeiten im Ergebnis führen können.

Vereinfacht lässt sich die Ursache für die Schwingung über die Trägheit des Durchflusses erklären. Wird das Schütz nach unten ausgelenkt, so verkleinert sich die durchströmte Fläche. Der Durchfluss bleibt aber zunächst nahezu konstant, was zu einer Zunahme der Fließgeschwindigkeit und einer Verringerung des Druckes unter dem Schütz führt. Es entsteht also eine Kraft in Bewegungsrichtung, welche die Schwingung anfanct. In der Literatur (z.B. Naudascher und Rockwell 1994) wird dieses Phänomen oftmals als Press-Shut-Mechanismus bezeichnet.

Die im numerischen Modell beobachtete abnehmende Schwingungsanfächung bei steigendem Unterwasserstand wurde bei einer Messkampagne bestätigt. Somit können die Ergebnisse der Simulationen verwendet werden, um Fahrpläne von Wehranlagen auf ihre Schwingungsgefahr hin zu bewerten (Göbel 2017). Im vorliegenden Fall zeigte sich auch, dass Schwingungen durch betriebliche Maßnahmen, z.B. das Vermeiden kleiner Öffnungsweiten, vermieden werden können. In der Praxis treten diese Betriebszustände im Normalbetrieb der betrachteten Anlage nicht auf. In der Regel wird Niedrig- und Mittelwasser über die Klappen abgeführt, da somit das Stauziel genauer eingehalten werden kann. Erst wenn die Abflussleistung der Klappen nicht mehr ausreicht, werden die Schütze angehoben. Dann ist der Unterwasserstand bereits angestiegen und die anzufahrenden Öffnungsweiten liegen außerhalb des schwingungsgefährdenden Bereichs.

Ausblick

Die Untersuchungen zeigen, dass numerische Methoden zur Fluid-Struktur-Kopplung ein effizientes Werkzeug sein können, um Schwingungsphänomene im Stahlwasserbau zu analysieren. Strömungsgeschwindigkeiten und Drücke können kontinuierlich an beliebiger Stelle ausgegeben und analysiert werden, um damit das Verständnis der Anfachungsmechanismen zu vertiefen und schließlich Verbesserungsvorschläge zu erarbeiten. Damit können bestehende Theorien zu strömungsinduzierten Schwingungen, wie sie zum Beispiel in Naudascher und Rockwell (1994) oder Kolkman und Jongeling (2007) beschrieben sind, weiterführend untersucht, bestätigt oder erweitert werden.

Literatur

- Büsching, F. (1985): Schwingungsanregung eines Schiebetores infolge Undichtigkeit am Drempe. In: *Bauingenieur* (60), S. 109–111.
- Devolder, Brecht; Schmitt, Pál; Rauwoens, Pieter; Elsaesser, Björn; Troch, Peter (2015): A Review of the Implicit Motion Solver Algorithm in OpenFOAM to Simulate a Heaving Buoy. In: Volker Bertram und Emilio F. Campana (Hg.): Proceedings of the 18th Numerical Towing Tank Symposium (NuTTS 2015). Marstrand, Sweden, 20 - 30 September 2015.
- Göbel, Georg (2017): Numerische Simulation strömungsinduzierter Schwingungen im Stahlwasserbau. In: Jürgen Jensen (Hg.): Tagungsband. 19. Treffen junger WissenschaftlerInnen deutschsprachiger Wasserbauinstitute. Siegen, 23. - 25. August 2017. Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen, S. 53–56.
- Kolkman, P. A.; Jongeling, T. H. G. (2007): Dynamic behaviour of hydraulic structures. Delft: WL|Delft Hydraulics publication (Hydraulic Engineering Reports).
- Naudascher, Eduard; Rockwell, Donald (1994): Flow-induced vibrations. An engineering guide. Rotterdam: A.A. Balkema (IAHR series of Hydraulic Structures Design Manuals, Volume 7).