

Hydroelastische Schwingungen an Stahlwasserbaukonstruktionen

Die Schwingungsgefahr bei Stahlwasserbaukonstruktionen ist trotz der im Laufe der Jahre gesammelten Erfahrungen noch heute aktuell, da die Einführung aufwendigerer (statischer) Berechnungsverfahren und der Konkurrenzkampf der Herstellerfirmen zu immer leichteren Konstruktionen geführt haben und heute Spannungsreserven für dynamische Beanspruchungen so gut wie gar nicht mehr freigehalten werden. Aus diesen Gründen sind die Konstruktionen bei immer größer werdenden Stützweiten und Druckhöhen für elastische Verformungen wesentlich empfindlicher geworden, womit die Gefahr der Steuerung der instationären Kräfte verbunden ist. Demnach wird die *Hydroelastik* als der Wissenschaftszweig definiert, der sich mit den Schwingungen elastischer und/oder elastisch aufgehängter Strukturen beschäftigt, die aus den Wechselwirkungsprozessen zwischen dem fließenden Medium und der Struktur resultieren (z.B. HASZPRA, 1979).

Im Folgenden ist nicht beabsichtigt - wie das oft in der einschlägigen Literatur geschehen ist - die einzelnen Verschlussysteme im Hinblick auf deren spezielle Schwingungsanfälligkeit zu untersuchen, sondern vielmehr wird eine Gliederung entsprechend den Abflussverhältnissen an Stahlwasserbaukonstruktionen gewählt.

Am Beispiel der Betriebsarten eines Hakenschlützes kommt man zu der Unterteilung:

- I. Schwingungsanregung an überströmten Verschlussorganen,
- II. Schwingungsanregung an unterströmten Konstruktionen und
- III. Schwingungsanregung an gleichzeitig unter- und überströmten Systemen.

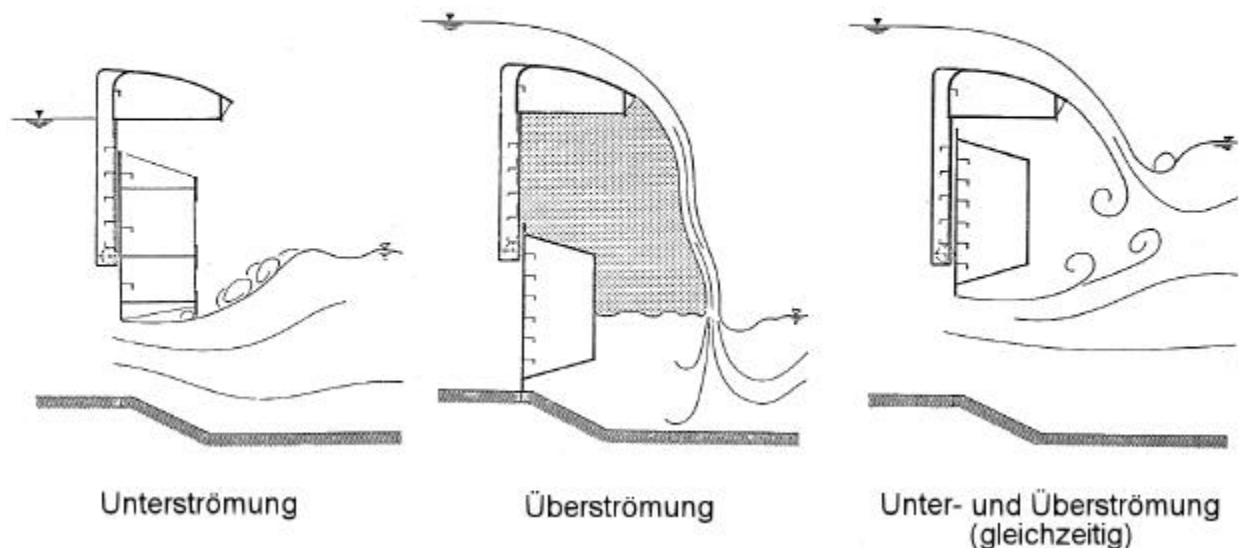


Abb. 01: Möglichkeiten der Schwingungsanregung bei Doppelschlützen

I. Schwingungsanregung bei Überströmung

Die auf Abb.01 angedeutete Art der Schwingung des herabfallenden Wasserbandes kann mehrere Ursachen haben, die sich nicht immer vollständig voneinander trennen lassen.

Ungenügende Belüftung des Überfallstrahls:

Bei Wehren mit niedrigem Unterwasser, d. h. wenn vollkommener Überfall vorliegt und sich zwischen Überfallband und Wehrkonstruktion noch ein Luftraum befindet, wird vom herabfallenden Wasserband aus den angrenzenden Räumen Luft mitgerissen, die mit dem UW abtransportiert wird. Die Folge davon ist dann die Ausbildung eines Unterdruckes zwischen Überfallstrahl und Wehrkonstruktion.

Der Luftentzug unter der Konstruktion läuft dabei allerdings nicht gleichmäßig ab; die beobachtete Strahlpendelung deutet in diesem Falle auf eine Wechselwirkung zwischen luftangereichertem Unterwasser, dem Unterdruckgebiet und der Stahlkonstruktion hin. Fest steht, dass ein zunehmender Grad der (ungleichförmig verlaufenden) Unterdruckausbildung, d.h. mit zunehmendem mittleren Betrag des Unterdruckes auch die Gefahr periodischer Schwingungen der Stahlkonstruktion erhöht wird.

Falls nicht auf irgendeine andere Weise für ausreichende Belüftung der Innenseite des Überfallstrahles gesorgt wird, kann es andererseits insbesondere bei dünnerem Überfallstrahl auch dazu kommen, dass infolge des äußeren Oberdruckes periodisch Luft durch den Überfallstrahl hindurchschlägt und kurzzeitig auf diese Weise ein Luftdruckausgleich erfolgt. Die hierdurch verursachten Pulsationen äußern sich u. U. ebenfalls als Schwingungen der Strahlkonstruktion.

Instabilität des überfallstrahles:

Weiterhin kann auch eine von OW her erzeugte Instabilität eine derartige Strahlpendelung auslösen. Hierbei ist der herabfallende Überfallstrahl mit dem darunter befindlichen Luftraum einerseits und die elastische Strahlkonstruktion mit dem überströmenden Wasser andererseits wiederum als mechanisches System zu betrachten, das sich im Gleichgewicht befindet, solange ein stationärer Strömungszustand und damit eine statische Belastung der Wehrkonstruktion vorliegt. Wenn aber durch irgendeine Ursache (Wind, Treibzeug oder Schwall) dieser stationäre Strömungszustand gestört wird, so kommt es ebenfalls zu der betreffenden Auswellung des herabfallenden Wasserbandes. Die herabfallende Ausbeulung erzeugt wiederum periodische Volumenänderungen und damit Druckschwankungen im geschlossenen Luftraum unter der Überfallhaube. Je größer die Auswellung wird, desto größer wird auch die Volumenänderung unter dem Wehr und desto größer auch der Druckimpuls, wenn die Wellung im Unterwasser verschwindet. Wenn die Druckamplituden schließlich so groß werden, dass die dem System innewohnende Dämpfung überwunden wird, beginnt auch die Stahlkonstruktion zu schwingen und facht ihrerseits die Auswellung des Wasserbandes zusätzlich an. Schließlich erreicht die Bewegung einen dynamischen Gleichgewichtszustand, so dass das System harmonisch schwingt. Die in diesem Falle auftretenden Schwingungslagen hängen vom UW ab und ändern sich auch mit den Strahldicken.

Instabile Ablösungen am Überfallrand

Schließlich können auch die Prozesse, die sich beim Ablösevorgang des Überfallstrahles von der Strukturoberfläche in der betreffenden Grenzschicht abspielen, unter

bestimmten Umständen als Schwingungsursache in Frage kommen. Im Sinne einer wirtschaftlichen Auslegung der Hubwerke werden im allgemeinen gewisse Unterdrücke auf der Überfallkante zugelassen. Bei unzureichender Formgebung ist die an das Unterdruckgebiet UW-seitig anschließende Druckzunahme mit instabiler Strömungsablösung verbunden, wobei die Kinematik der Wirbelbildung und -ablösung für die Schwingungsanregung die wesentliche Rolle spielen.

Nur wenn die Überfallhaube einer überströmten Struktur entsprechend der Fallparabel bei höchster Überströmung ausgebildet, d. h., deren Krümmung gleich derjenigen der untersten Begrenzungslinie des betreffenden freien Überfallstrahles gewählt wird, kann bezüglich der Ablösungsverhältnisse auf Modelluntersuchungen verzichtet werden.

Bei Fischbauchklappen sind die Fälle mit fast vollständig freigegebenem Durchflussquerschnitt für die HW-Abfuhr besonders zu beachten. Dann kann abhängig von der Klappenform (Krümmung) und der Klappenstellung eine grundsätzliche Änderung der Druckspannungsfigur in der Art auftreten, dass mit einer Zunahme des Durchflussquerschnittes zur Überlaufkante hin ein Druckanstieg erfolgt. Schwingungen wurden insbesondere bei Tangentenwinkeln am Auflager zwischen $+ 10^{\circ}$ und $- 20^{\circ}$ beobachtet. Im Falle, dass eine Klappe über eine Zahnstange angetrieben wird, machen sich die Wechselkräfte dann im Getriebe des Windwerkes als Schläge bemerkbar. Während hier - durch die Auflagerung bedingt - Schwingbewegungen im wesentlichen nur um die Drehachse der Klappe vorliegen, können die zuvor beschriebenen Anregungsmöglichkeiten zu horizontalen und/oder vertikalen und/oder Torsions-Schwingbewegungen der betreffenden Struktur führen.

Abhilfemaßnahmen:

Zur Vermeidung der Unterdruckausbildung zwischen Überfallstrahl, Stahlkonstruktion und UW-Spiegel werden im allgemeinen Belüftungsöffnungen in den seitlichen Wehrpfeilern angeordnet, über die eine Verbindung zum außen vorhandenen barometrischen Luftdruck hergestellt wird.

Bei großen Öffnungsweiten kann es aber vorkommen, dass eine Belüftung allein von den Seitenpfeilern her nicht ausreichend ist, da entweder aus konstruktiv-statischen Gründen nur kleine Belüftungsquerschnitte und - damit verbunden - große Widerstände in den Belüftungsleitungen auftreten oder aber bei hohen Schwingfrequenzen der Druckausgleich über relativ große Entfernungen nicht rasch genug erfolgen kann.

Als zusätzliche Belüftungsmaßnahme haben sich die sog. Strahlstörer oder Strahlaufreißer bewährt, die ca. im Abstand von 2 m auf die Überfallkante aufgeschweißt werden, um das herabfallende Wasserband aufzureißen. Auf diese Weise können sich große Volumenschwankungen nicht mehr aufbauen, und die Übertragung des Druckimpulses auf die Strahlkonstruktion wird unterbunden. Wegen der notwendigen Eis- und Treibzeugabfuhr über Überfallwehre sind allerdings derartige Strahlstörstrukturen, die - ggf. an verschiedene Überfallstrahlstärken angepasst - zugleich in unterschiedlichen Bauhöhen ausgeführt werden und andererseits die Abflussleistung ungünstig beeinflussen, in ihrer Maximalbauhöhe begrenzt.

Dementsprechend kommt es bei zu mächtigem Überfallstrahl wiederum zu einem geschlossenen Wasserband. Eine Lösung kann in solchen Fällen in der Ausbildung einer abgestuften Überfallhaube bestehen, deren Wirkungsweise in Abhängigkeit von den verschiedenen Überfallhöhen in jedem Fall - wie auch die Wirkungsweise der Strahlstörer - im hydraulischen Modell untersucht werden muss. Die Abstufung der Überfallhaube wird dabei in der Art vorgesehen, dass abschnittsweise durch entsprechend unterschiedliche Formgebung des Überfallrückens (unterschiedliche Krümmun-

gen und Haubenbreiten) unterschiedliche Strahlsprungweiten erzielt werden. Einerseits kann an den Stellen der jeweiligen Querschnittsänderung ein Ausgleich mit dem äußeren barometrischen Luftdruck erfolgen und andererseits wirkt die zwischen den Strahlteilen vorhandene Phasenverschiebung zusätzlich schwingungsdämpfend auf die Struktur.

Darüber hinaus hat eine abgestufte Überfallhaube den Vorteil, dass diese als Träger gut an die Momentenlinie angepasst ausgeführt werden kann. Von Seiten der Aufhängung bzw. der Antriebe ist die vorteilhafte dämpfende Wirkung von Hydraulik-Zylindern gegenüber der Seilaufhängung hervorzuheben, da bei der letzteren die elastische Seildehnung eine zusätzliche Anfachung bewirken kann. Diese Dämpfungswirkung durch relativ starre Antriebselemente ist - wie auch diejenige durch die zwischen Masivbauwerk und Stahlkonstruktion vorhandenen Feindichtungselemente - selbstverständlich für alle Anregungsmöglichkeiten (vgl. auch weiter unten) von Bedeutung.

II. Schwingungsanregung an unterströmten Konstruktionen

Auch hier lassen sich die nachfolgend dargestellten Ursachen der Schwingungsanregung nicht immer vollständig voneinander trennen. An Sohdichtungsbalken von Hubschützen mit OW-seitiger Stauwand, die in Form eines Holzbalkens als Aufsatzdichtung ausgeführt wurden, haben sich bei verschiedenen Hubzuständen vorzugsweise in vertikaler Richtung Schwingungen gezeigt, die von der Art der Strahlablösung abhängig sind:

- A) Bei scharfkantigen Balken zeigten sich Schwingungen nur bei kleinen Hubhöhen (1 - 5 cm) (die schnell durchfahren werden können),
- B) Konstruktionen mit vorn gerundeten Balken waren am anfälligsten bei 20 - 30cm Hubhöhe und
- C) Elliptisch geformte Balken, die für kleine Hubhöhen sehr günstig waren, zeigten Schwingungen bei Hubhöhen größer als 0,5 m.

Die Schwingung der Schützkonstruktion setzt eine aus der Strömung kommende periodische Kraftwirkung am Balken voraus. Diese Kraftwirkungen quer zur Strömungsrichtung können im Falle des gerundeten Balkens etwa wie folgt beschrieben werden: Oberhalb der kleinsten Durchflussöffnung befindet sich wegen der dort vorhandenen großen Strömungsgeschwindigkeit ein Unterdruckgebiet. Wenn UW-seitig sich eine Querschnittsaufweitung anschließt, kommt es hier wiederum zur Strahlablösung von einer gerundeten Kontur, an der der Ablösepunkt nicht fixiert ist (wie bei der gerundeten Überfallhaube). Ist z. B. infolge einer Störung eine Auslenkung aus einer (labilen) Ruhelage erfolgt, liegen in diesem Moment veränderte Anströmverhältnisse mit einem veränderten Ablösepunkt vor. Im folgenden liegt der Strahl in einem gewissen Bereich abwechselnd an der Kontur an und löst sich wieder ab, wodurch wechselnde Drücke am Sohlbalken erzeugt werden. Je größer die Flächen am Sohlbalken sind, an denen Unterdrücke wirken können, desto intensiver sind die schwingungserregenden Wechselkräfte. Aber auch beim scharfkantigen Dichtungsbalken, an dem sich der Strahl an der Vorderkante ablöst, kann es infolge von (periodischen) Unterdruckwirkungen zur Schwingungsanregung kommen.

In dem engen Gebiet zwischen dem Balken und der Strahloberfläche kann sich wegen der großen Strahlgeschwindigkeit u. U. ein konstanter barometrischer Luftdruck nicht einstellen. Infolge eines Unterdruckes in diesem Gebiet kommt es dann zu einer Rückströmung mit der weiteren Folge, dass sich zwischen dem Balken und der Strahloberfläche eine Wirbelschicht ausbildet.

Zu einer ausgeprägten pulsierenden Rückströmung kann es dann dadurch kommen, dass Wirbel einerseits von der Hauptströmung abtransportiert werden und sich andererseits wieder neu bilden. Eine Abhilfemöglichkeit kann in einer ausreichenden Belüftung bestehen. Ggf. werden hierzu Luftlöcher im untersten Trägersteg angeordnet. Die zuvor beschriebenen Anregungsmöglichkeiten können darüber hinaus dadurch reduziert bzw. vermieden werden, dass eine klare Ablösekante in der Form einer modernen Aufsatzdichtung vorgesehen wird. Diese zeichnet sich durch eine minimale Bauhöhe in Strömungsrichtung aus. Wenn trotzdem eine Holzbalkendichtung als Aufsatzdichtung ausgeführt werden soll, kann durch eine auf die Öffnungsbreite unterschiedliche Querschnittsgestaltung (durch entsprechende Ausnehmungen) des Holzbalkens eine Schwingungsanregung ggf. unterbunden werden. Wie bei der abgestuften Überfallhaube wirken hier über die Schützweite unterschiedliche Ablöseverhältnisse einer ausgeprägten Schwingungsanregung entgegen.

Weiterhin können unübersichtliche Ablöseverhältnisse zu Schwingungsanregungen führen, wenn der Flansch des untersten Hauptträgers strömungsgünstig angeordnet wird. Sowohl bei OW- als auch bei UW-seitiger Anordnung der Stauwand kann eine Anregung in der Art erfolgen, dass sich die Strömung wechselseitig von der Aufsatzdichtung und vom betreffenden Trägerflansch ablöst.

Darüber hinaus kann es bei OW-seitiger Stauwand auch durch den Einfluss eines Wechselsprunges zur Schwingungsanregung in der Art kommen, dass durch Turbulenzen der Deckwalze periodisch wechselnde Drücke am untersten Trägerflansch wirken. Eine weitere vorzugsweise an der Unterkante von Stahlwasserbaukonstruktionen auftretende Schwingungsanregung kann von der dort befindlichen Dichtung ausgehen.

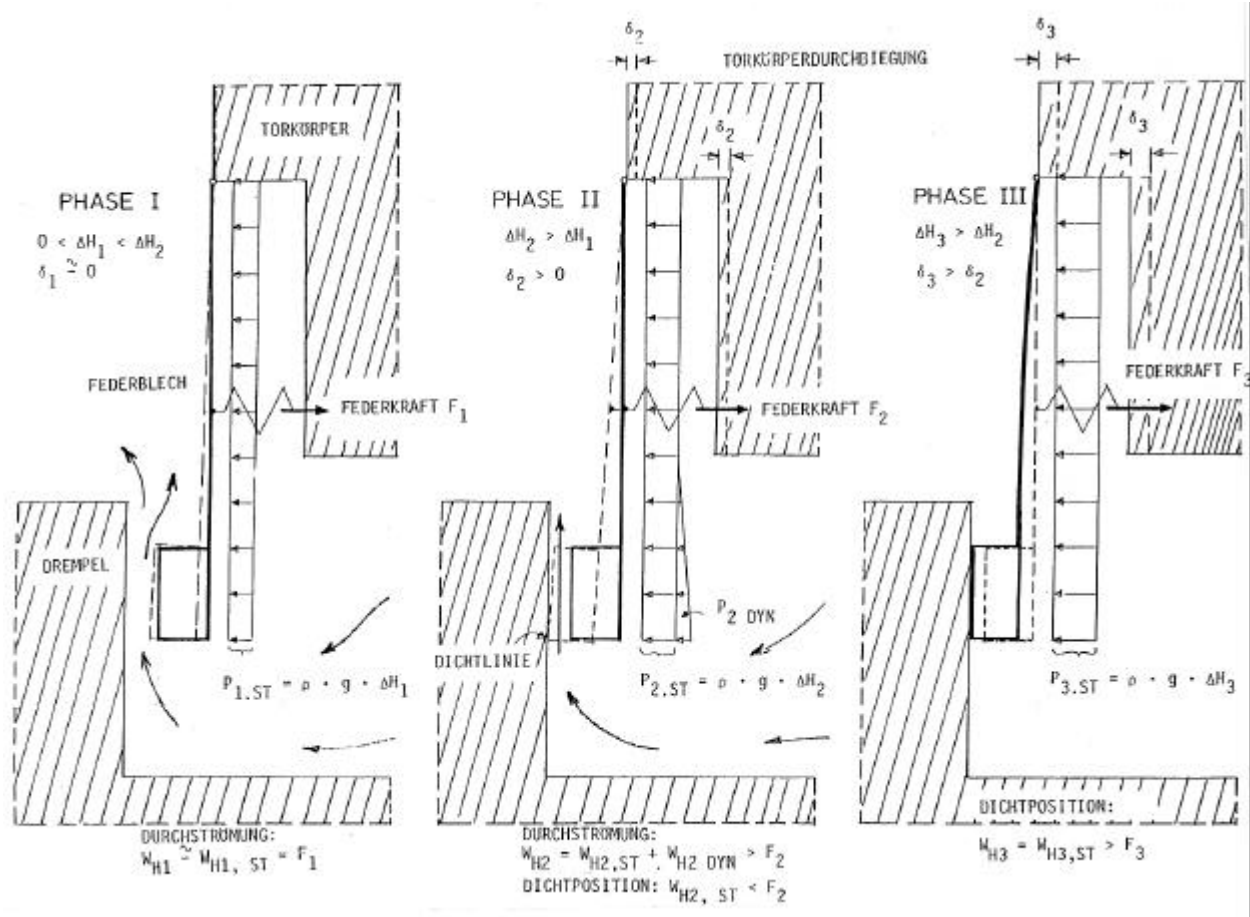


Abb. 02: Schwingungsanregung an einer Federblechdichtung (schematisch)

Im Falle, dass durch eine elastische Dichtung wegen fehlerhaft ausgeführter Gegendichtungsflächen vollständige Dichtigkeit örtlich zunächst nicht erzielt wird, kann hier u. U. ein periodischer Wechsel von hydrodynamischen und hydrostatischen Zuständen auftreten.

Findet örtlich eine Durchströmung statt, bewirken die an der elastischen Dichtung wirkenden Unterdrücke eine Zusatzkraft in Dichtrichtung. Ist der Spalt infolgedessen geschlossen, entfällt augenblicklich diese Zusatzkraft, und das elastische Dichtelement kehrt in seine Ausgangslage zurück. Mit der neuerlichen Durchströmung beginnt das Spiel aufs Neue. Die Dichtungsschwingung kann u. U. der Auslöser für eine Schwingung der Gesamtstruktur sein.

III. Schwingungsanregung an gleichzeitig unter- und überströmten Systemen

Bei gleichzeitig über- und unterströmten Stahlwasserbaukonstruktionen kann zu den bisher genannten Effekten noch ein weiterer hinzutreten, der nach dem US-amerikanischen Luftfahrtwissenschaftler ungarischer Herkunft, Theodore von KARMAN, als KARMANsche WIRBELSTRASSE benannt wird. Seine theoretischen Untersuchungen beziehen sich auf einen senkrecht - in idealer Flüssigkeit - angeströmten (schlecht profilierten) zylindrischen Stab (Zylinderdurchmesser D), von dem die Strömung in der Art abreißt, dass sich abwechselnd rechts und links drehende Wirbel von gegenüberliegenden Zylinderseiten ablösen. Die sich auf diese Art ausbildenden doppelreihigen Wirbelstraßen entstehen bei Reynolds-Zahlen

$$10^3 \leq \text{Re} = \frac{v \cdot D}{\nu} \leq 10^6$$

und sind theoretisch (nach Karman) gekennzeichnet durch ein konstantes Verhältnis $h/l = 0,281$,

mit h = Abstand der rechts und links drehenden Wirbel
(quer zur Strömungsrichtung) und

l = Abstand gleichsinnig drehender Wirbel in Strömungsrichtung.

In realen Strömungen treten zwar Abweichungen von diesem Wert auf, die aber die durch die Wirbelablösungen verursachten periodischen Kraftwirkungen quer zur Strömungsrichtung nicht grundlegend beeinflussen.

Bezüglich der Ablösungsfrequenz gilt für den genannten Reynolds-Zahlen-Bereich

$$f[\text{Hz}] = \frac{S \cdot v}{D}$$

mit der STROUHAL-Zahl $S = 0,2 = \text{konst.}$

Schwingungsanregungen dieser Art sind insbesondere zu befürchten, wenn Dammbalken im Notfall bei starker Durchströmung abgesenkt werden sollen.

Zur Vermeidung dieser Anregungsart sind meistens mehrere Maßnahmen gleichzeitig erforderlich, die im hydraulischen Modellversuch untersucht werden müssen.