

Über das Schwingen des Wassers in den Flowforms und in den Bühnenfeldern der Elbe (Teil 1)

Dr. Erich Bäuerle

Es war für mich ein erhellender Moment, als ich vor geraumer Zeit eine Messreihe zu sehen bekam, der zu entnehmen war, dass in einem Bühnenfeld der Mittelelbe sich sowohl in der Strömung als auch in den Vertikalauslenkungen der Wasseroberfläche ein periodisches Signal mit einer Periode von ca. 5 Minuten verbirgt. Die Frage war, ob es sich bei dieser Messung um einen Zufallstreffer in diesem speziellen, sehr intensiv untersuchten Bühnenfeld gehandelt hat oder ob dieses Phänomen auch in den anderen, zur Verbesserung der Schifffahrtsverhältnisse angelegten „Ausbuchtungen“ vor sich geht. Klar war, dass die periodischen Strömungen und Oberflächenauslenkungen nicht so ausgeprägt sind, dass sie das Auge leicht erkennt. Gleichwohl könnten sie für die Ökologie des Gewässerbodens von nicht zu vernachlässigender Bedeutung sein, denn immerhin gibt es von diesen Bühnenfeldern längs des gesamten Flusslaufs der Elbe mehr als 6000.

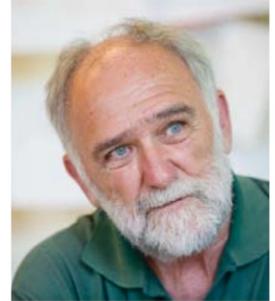


Abb.1: (a) Momentaufnahme des Durchströmens und pulsierenden Schwappens in einer Flowform (Foto: P. Müller). (b) Momentaufnahme der scheinbar ruhenden Wasseroberfläche zwischen zwei Bühnen der Mittelelbe (Foto: M. Gorille)

Irgendwie erinnerte mich diese offenbar vorhandene Wechselwirkung zwischen dem strömenden Fluss und den schwingenden „Anhängseln“ an die Vorgänge in den Flowforms und die Hoffnung war, dass man aus den Kenntnissen über das Zustandekommen der Schwingungen in Flowforms etwas lernen könne, über die Schwingungen in den Bühnenfeldern. Leider musste ich feststellen, dass mein

Wissen über die kausalen Zusammenhänge sehr im „Ungefähren“ anzusiedeln war. Und dann waren da auch noch die Erinnerungen an die leidvollen Erfahrungen, dass das Wasser in den Flowforms manchmal partout nicht schwingen wollte, wofür es eigentlich nur eine stichhaltige Erklärung gibt: fehlendes tieferes Verständnis!

Auf dem langen Weg bis dahin, wirklich verstanden zu haben, was da im Wechselspiel zwischen Strömung und Schwingung vor sich geht, waren mir sehr von Nutzen das Buch von John Wilkes über das Flowform-Phänomen (Wilkes, 2003) und der Engineering Guide von Eduard Naudascher und Donald Rockwell (1994) über „Flow-induced Vibrations“ – gerade weil die Herangehensweise so unterschiedlich ist.

Im Teil 1 dieses Artikels will ich mich mit den Vorgängen in den Flowforms beschäftigen (dabei werden oftmals implizit Prinzipien angesprochen, die auch für die Bühnenfelder grundlegend sind). Im Teil 2 sollen dann die Schwingungen in den Bühnenfeldern der Elbe (bzw. allgemein in den Buchten von Flüssen) behandelt werden, wobei ich mich, wie schon angedeutet, auf einige Erkenntnisse aus Teil 1 berufen kann.

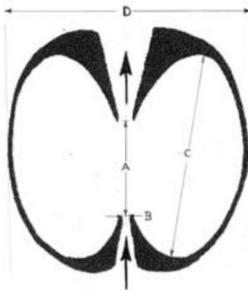


Abb. 2: Schematische Draufsicht auf die beiden Schalen einer Flowform mit Zu- und Abfluss. „Links“ und „rechts“ bezieht sich auf die zentrale Durchflussrichtung. B ist die Breite des Zuflusses, V die gemittelte Strömungsgeschwindigkeit des Zuflusses, D die Gesamtbreite und S die maximale Länge der Einzelbecken. A ist der Abstand von Zu- und Abfluss

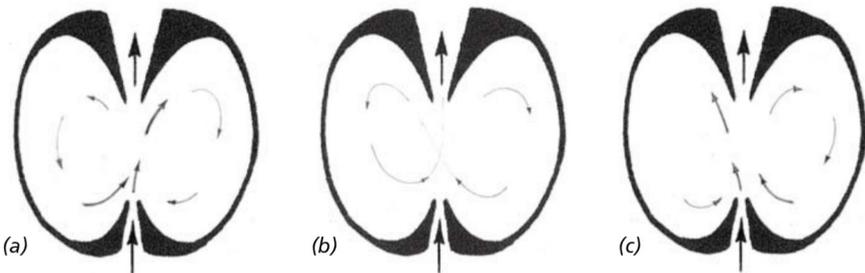


Abb.3: Schematische Darstellung der Strömungsverhältnisse zu 3 Zeitpunkten eines halben Zyklus. (a) Moment des größten Zuflusses von der linken in die rechte Schale, (b) ausgeglichener Austausch, (c) Moment des größten Zuflusses von der rechten in die linke Schale.

Zunächst will ich den Verlauf eines Schwingungszyklus in den Schalen eines Flowform-Beckens beschreiben, beginnend mit dem Moment des größten Zuflusses aus der linken Schale (a), wodurch der Zustrom in Richtung rechte Schale umgelenkt wird. Weil der zentrale „Strahl“ nicht mehr mittig auf die Abflussöffnung trifft, führt das zu einem Auffüllen der rechten Schale und gleichzeitig zu einem verminderten Zufluss in die linke Schale. Der linken Schale geht also insgesamt Wasser verloren, wodurch dort der Wasserstand fällt. Die rechte Schale wird dementsprechend aufgefüllt und es stellt sich aufgrund des Wasserstandsunterschieds ein von der rechten in die linke Schale gerichteter Druckgradient ein, der zu einer Beschleunigung führt (das Wasser wird aus der rechten Schale „getrieben“). Nach einem kurzen Moment, in dem der Ausstrom gleich dem Zustrom ist, führt das „Schwappen“ von rechts nach links dazu, dass sich die linke Schale zunehmend füllt, sich dadurch ein Druckgradient aufbaut (diesmal von der linken in die rechte Schale gerichtet). Wir haben also vertauschte Verhältnisse vorliegen, so dass sich der eben beschriebene Vorgang wiederholt, allerdings mit umgekehrten Wirkrichtungen. Nach einem zwischenzeitlichen „Nulldurchgang“ schließt sich der Zyklus und es folgt ein Hin- und Herschwappen und ein Pulsieren der Strömung längs einer Bahn, die an die Form der Lemniskate denken lässt. Die Frequenz, mit der sich diese beiden miteinander verwobenen Vorgänge wiederholen, ist mit einfachen Formeln aus der Hydrodynamik deshalb nicht zu bestimmen, weil die Schwingung zwischen den beiden Beckenhälften durch eine Reihe von Effekten verkompliziert wird. Dazu gehören vor allem die vehemente Durchströmung und die oftmals extrem kleinen Wassertiefen an den Rändern (zeitweise fallen diese Bereiche sogar trocken!). Aber dennoch werden die Erstreckung D zwischen den seitlichen Brandungen und die mittlere Wassertiefe H bestimmende Größen sein. Auch die Längserstreckung C der Teilbecken wird eine Rolle spielen, weil sich dadurch die Länge des lemniskatenförmigen „Laufwegs“ der Strömung ergibt. Letztendlich ist aber die Größe des Zustroms von entscheidender Bedeutung für das Zustandekommen der Schwingung.

Nick Thomas deutet im Anhang 3 des Buches (Das Flowform-Phänomen) von John Wilkes an, dass die Frequenz des Pulsierens in grober Näherung umgekehrt proportional zur Gesamtweite D ist. In grober Näherung schon deshalb, weil die spezifischen Formen der unterschiedlichen Flowform-Typen (Järna, Emerson, Olympia, ...) nur eine untergeordnete Rolle spielen. Dieser Rhythmus entspricht auch nicht exakt der Grundfrequenz des nicht durchströmten Flowform-Beckens, also der Frequenz der langsamsten freien Schwingung des Wassers (in diesem Fall der Querschwingung), wenn Zu- und Ablauf geschlossen sind, wenn also keine Durchströmung stattfindet.

In diesem Fall wäre die Eigenfrequenz relativ leicht zu bestimmen (wenn auch nicht mehr analytisch, sondern nur unter Zuhilfenahme von numerischen Modellrechnungen). Dazu muss man allerdings voraussetzen, dass die Vertikalauslenkungen der Wasseroberfläche klein bleiben, verglichen mit den Wassertiefen im Ruhezustand. Wenn die Schwingungen heftiger werden und sich in ein Hin- und Herschwappen verwandeln, geht zwar nicht der Rhythmus vollständig verloren, aber die Strömungsverhältnisse werden „auf den Kopf“ gestellt (grundlegend verändert): Die kleinen, geradlinigen, ortsgebundenen (!) Hin- und Herbewegungen der Eigenschwingungen werden abgelöst durch das beide Teilbecken erfassende Durchströmen.

Zwischenfazit: Das Durchströmen der Flowforms geschieht nicht geradlinig vom Zufluss zum Abfluss (das ist zwar möglich, aber unerwünscht), sondern rhythmisch pulsierend auf weit ausholenden Bahnen, begleitet von einem intensiven Hin- und Herschwappen des Wassers.

Die Frage, die sich auftut, ist: Wodurch wird dieser Vorgang angestoßen? Nick Thomas befasst sich (im erwähnten Anhang) eher mit der Frage danach, „wie weit der Rhythmus durch die Gesamtgrößenverhältnisse der Form bestimmt wird“, fragt weiter „wie viel von feinen, schwer messbaren Details abhängt“, und deutet an: „Die genaue Form des Zu- und Abflusses ist entscheidend“.

Ich will ergänzen: und der „passende“ Abstand vom Zu- zum Abfluss. In diesem „feinen Detail“ liegt meines Erachtens der Schlüssel zum Verständnis dafür, dass manchmal überhaupt keine Schwingung angeregt wird. Unter anderen Bedingungen (die es zu finden gilt) entstehen Rückkopplungseffekte, die dazu führen, dass Schwingungen (zunächst womöglich nur leicht) angeregt werden, die ihrerseits zurück wirken auf die Ursache des Schwingens, das dadurch verstärkt wird, zurück gekoppelt wird – und so weiter, bis sich ein neues, rhythmisches und hochdynamisches Gleichgewicht ergeben hat. In der Flowform findet jetzt eine ständige Metamorphose zwischen Strömung und Schwingung statt.

So gut, so schön. Aber noch immer ist das „feine Detail“ nicht benannt, der Grund dafür, dass bei einer bestimmten Größe des Zustroms der Vorgang „angestoßen“ wird.

Denn welcher Effekt ist eigentlich der kausale Grund dafür, dass bei einer bestimmten Größe des Zustroms (V) der Vorgang „angestoßen“ wird?

Dafür muss ich etwas ausholen und dabei Bezug nehmen auf den Vorgang des Zufließens von Wasser aus einer Öffnung in ein Becken, das seitlich und in Fließrichtung nicht begrenzt sein soll (wie das z.B. an der Mündung eines Bachs in

einen See, eines Flusses ins Meer etc. gegeben ist). Ganz schematisch ist der Vorgang beschrieben durch den Zustrom von Wasser durch eine Öffnung der Breite B mit einer Geschwindigkeit V des zuströmenden Wassers (das vorliegende Wasser sei zunächst in Ruhe).

Stellvertretend ist in Abb.4 (entnommen aus Landel et al., 2011) eine Sequenz von Bildern zu sehen, die sich beim Einströmen eines eingefärbten Strahls in einen Tank ergeben hat.

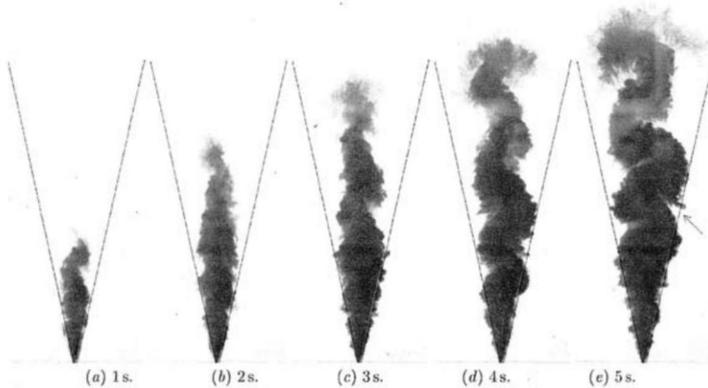


Abb.4: Ein gefärbter Wasserstrahl strömt mäandrierend in einen flachen Tank ein (aus Landel et al., 2011).

Zwischen dem zuströmenden Wasserstrahl und dem Bereich des Wassers, der weiterhin in Ruhe verbleibt, bilden sich Scherströmungen, die dadurch gekennzeichnet sind, dass sich bei genügend großen Geschwindigkeiten Strömungsinstabilitäten bilden. Dies wurde gegen Ende des 19. Jahrhunderts von Helmholtz, Lord Rayleigh und Lord Kelvin erkannt. Bei instabiler Scherströmung entwickeln sich aus kleinsten Störungen diskrete Wirbel, die ihre Energie aus der Hauptströmung erhalten. Gegebenenfalls gehen sie in Turbulenz über.

Jedenfalls weitet sich der Strahl mit zunehmendem Abstand vom Zufluss (der turbulente Bereich lässt sich durch die gestrichelten Geraden ungefähr begrenzen) und man erkennt (insbesondere in den Abbildungen 4d und 4e) das Oszillieren des Strahls. Auch die „Rundungen“ der Wirbel an den beiden Außenseiten des Strahls zeichnen sich ab.

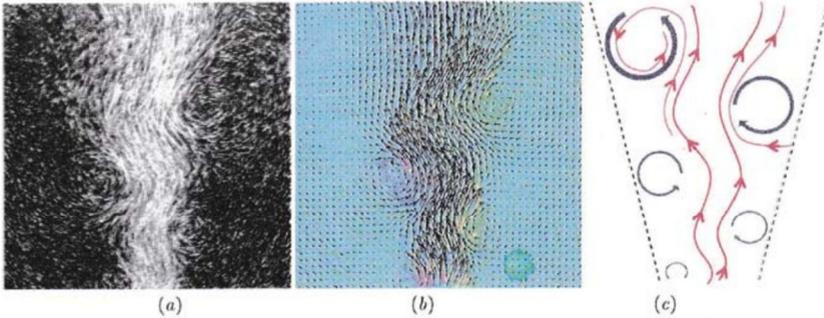


Abb. 5: (a) Kleine Pliolite-Teilchen als passive Tracer im Strömungsfeld eines typischen Wasserstrahls. (b) Strömungspfeile im selben Wasserstrahl. (c) Schematische Beschreibung der Struktur eines zweidimensionalen Wasserstrahls (aus Landel et al., 2011).

Von der Struktur der Strömungsgeschwindigkeiten im Strahl und in seinen seitlichen Randbereichen bekommt man einen Eindruck, wenn man in das Geschwindigkeitsfeld kleine Leuchtpartikel gibt und deren Horizontalversetzungen für kurze Zeitabschnitte dokumentiert. Dadurch entsteht ein Bild der Bahnen im Wasser (Abb. 5a). Die dazu gehörigen Geschwindigkeiten sind in Abb. 5b in Form von Vektorpfeilen dargestellt. Man erkennt, dass sich ein Band mit hohen Geschwindigkeiten um die Mittellinie schlängelt, eingefasst von Wirbeln mit wechselnder Drehrichtung. Durch diese Wirbel geschieht der Energieaustausch und die Vermischung von Wasser aus der ruhenden Peripherie ins bewegte Innere des Strahls. In Abb. 5c wird verdeutlicht, wie der zentrale Strahl sich wellenförmig voranbewegt, flankiert von größer werdenden Wirbeln, die mit der Strömung „mitschwimmen“.

Die für unsere Betrachtungen entscheidende Eigenschaft des pendelnden Strahls ist in Abb.6 nochmals stärker akzentuiert, indem der Horizontalstruktur eine Wellenlänge zugeordnet wird.

Ohne auf die Details eingehen zu wollen, sei festgehalten, dass die Frequenz des Pendelns abhängig ist von der Geschwindigkeit des Zustroms und von der Breite der Zustromöffnung.

Nicht immer ist die durch die Instabilität aus der Strömung in die Wirbel übertragene Energie ausreichend, um die Fluktuationen so zu verstärken, dass die Wirbel nicht allmählich zerfallen. Nur für einen bestimmten („auserwählten“) Frequenzbereich findet tatsächlich Verstärkung statt und ist aber auch dann eher schwach ausgeprägt.

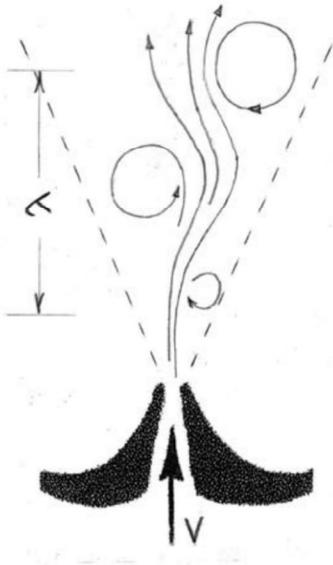


Abb. 6: Schematische Beschreibung des Einströmens des Strahls in ein nur einseitig begrenztes Becken. Die „Wellenlänge“ und die Frequenz der Fluktuationen hängen von der Zuströmungsgeschwindigkeit ab.

Diese Situation ändert sich aber grundlegend, allein schon, wenn sich dem Strahl ein Hindernis „in den Weg“ stellt oder erst recht, wenn das Becken nicht mehr seitlich und in Ausbreitungsrichtung des Strahls unbegrenzt ist, sondern, wie bei der Flowform, der ganze Rand (bis auf den Abfluss) geschlossen ist. Der oszillierende Strahl trifft im Verlauf einer Schwingungsperiode mal rechts, mal links und dann wieder rechts neben die Abflussöffnung. Die dadurch hervorgerufenen Druckstörungen wirken auf den Zustrom zurück und beeinflussen dadurch die dort vorliegenden Verhältnisse. Da diese Rückwirkung zudem periodisch geschieht, ergibt sich etwas, was von E. Naudascher (in Naudascher & Rockwell, 1994) „selektive Verstärkung“ genannt wird.

Dieses Prinzip greift dann besonders effizient, wenn die Wellenlänge des pendelnden Strahls mit dem Abstand A zwischen Zustrom- und Abflussöffnung optimal abgestimmt ist (siehe dazu Abb.5). Bei diesem Prozess der resonanten Interaktion spielen (indirekt) auch die anderen Parameter der Beckenform (Länge, Breite, Bodenrelief und gegebenenfalls sogar eine gewisse Asymmetrie) eine Rolle.

Aber entscheidend dafür, dass die Schwingung in der Flowform in Gang gesetzt wird (man ist geneigt zu sagen: sich in Gang setzt), ist die Übereinstimmung der Frequenz der Strömungsinstabilität des zuströmenden Strahls mit der Frequenz des Rückkopplungsvorgangs, die eng verbunden ist mit der Frequenz der freien Schwingung in den beiden Schalen.

Nach dem gleichen Prinzip verhalten sich auch die Schwingungen in den Bühnenfeldern der Elbe, von denen im zweiten Teil dieses Artikels berichtet werden soll.

Literatur:

Wilkes, A. J., 2008. Das Flowform Phänomen. Die verborgene rhythmische Energie des Wassers. Verlag Engel & Co.
 Naudascher, E. and D. Rockwell, 1994. Flow-induced vibrations: an engineering guide.
 Landel, J.R., Caulfield. C.P. and A.W. Woods, 2012. Meandering due to large eddies and the statistically self-similar dynamics of quasi-two-dimensional jets. Journal of Fluid Mechanics, 692, 347 – 368.

Über den Autor:

Dr. Erich Bäuerle, Diplom-Ozeanograph

Nach meinem Studium der Physik und der Physikalischen Ozeanographie habe ich in Kiel promoviert und dort mehrere Jahre am Institut für Meereskunde über Probleme des Nordatlantik geforscht. Mein Spezialgebiet waren allerdings die Schwingungen von Seen. In der Meeres- und Seenforschung war ich u.a. tätig am Institut für Meereskunde Kiel, dem Institut zur Erforschung und zum Schutz der Gewässer Ottendorf und am Limnologischen Institut der Universität Konstanz.

Aktuell bin ich unterwegs in einer Vortrags- und Informationstätigkeit zur „Reststrecke“ der Elbe und über die Grundwasserproblematik im Wendland.

Desweiteren beschäftige ich mich zurzeit mit der Planung, dem Aufbau und dem Betrieb von Ausstellungen und Veranstaltungen zum Thema „Wahrnehmung von Phänomenen des Wassers“ (u.a. *beim WasserKlangPfad* in der Góhrde, dem Wanderzirkus der Wasserphänomene) und auch dem geplanten Wasser- und Erlebnispfad rund um das Strömungsinstitut Herrischried).

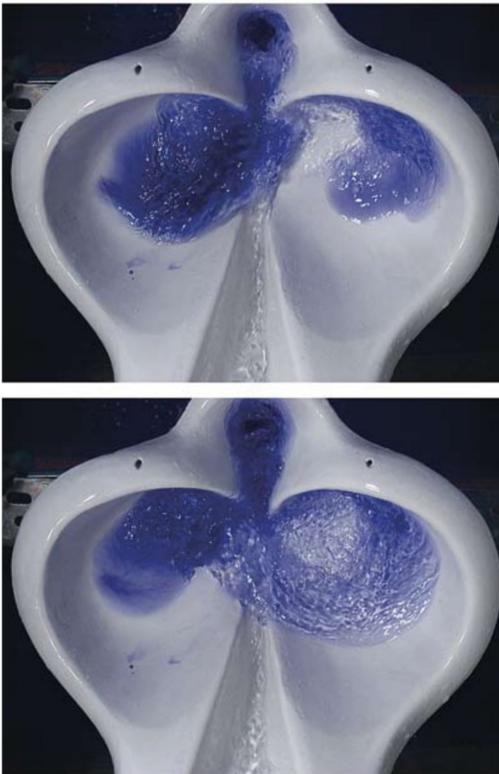


Abb.: Flowform-Strömungsphasen in angefórbtem Wasser
(Fotos: Andreas Wilkens, aus dem Buch „Wasser bewegt“, S. 117, Detail)