

Über das Schwingen des Wassers in Flowforms und in den Bühnenfeldern der Elbe (Teil 2)

Wirbel oder Schwingungen in den Bühnenfeldern der Elbe

Wie schon im ersten Teil dieser Abhandlung beschrieben, sind die Schwingungen in den Bühnenfeldern (oder Buchten) von Flüssen weit weniger ins Auge fallend wie die vehement pulsierenden Vorgänge in Flowforms. Aber die Voraussetzungen für die Umwandlung von gerichteter in oszillierende Strömung sind bei beiden Systemen die gleichen: Sie folgen aus der Tendenz gerichteter, seitlich begrenzter Strömungen, bei Wegfall der seitlichen Begrenzungen instabil zu werden, und der Potenzialität räumlich begrenzter Wassermassen zur Entfaltung periodischer Bewegungsformen. Sowohl Flowforms als auch Bühnenfelder zeigen ein besonderes Phänomen: Die von den Instabilitäten angeregten Schwingungen wirken derart zurück auf die auslösenden Mechanismen, dass ein Optimum erreicht wird und erhalten bleibt.

Im vorliegenden Teil 2 dieses Artikels beschäftige ich mich vor allem mit den Vorgängen in den Bühnenfeldern der Elbe, wobei ich mich auf schon im Teil 1 erwähnte Messungen aus der Elbe beziehen will.

In Abb.1 ist anhand zweier Luftbildaufnahmen (links) eine längere Strecke der Elbe von oberhalb Hitzacker und (rechts) ein Ausschnitt des linksseitigen Ufers dieser Strecke bei Wussegel zu sehen. Die Elbe führte zum Zeitpunkt der Aufnahme wenig Wasser, so dass die Bühnen, die bei Hochwasser auch überströmt werden können, deutlich zu erkennen sind. Es ist offensichtlich, dass die Bühnenfelder teilweise stark verlandet sind, und es wird deutlich, wie vielfältig die Formen der einzelnen Bühnenfelder und die jeweilige Gestalt ihres Bodens sein können. Man darf schon deshalb sagen, dass das Schwingungsverhalten von Bühnenfeld zu Bühnenfeld unterschiedlich ausfallen wird.



Abb.1: Die Elbe flussabwärts (links) und auf Höhe von Wussegel (rechts). Fotos: W. Bieck

In einem etwas weiter flussaufwärts gelegenen Bühnenfeld fanden im Jahr 2000 intensive Messungen mit Wasserstandspegeln und akustischen Strömungsmessern (ADV) statt, deren Positionen Abb. 2 (rechts unten) zu entnehmen sind.

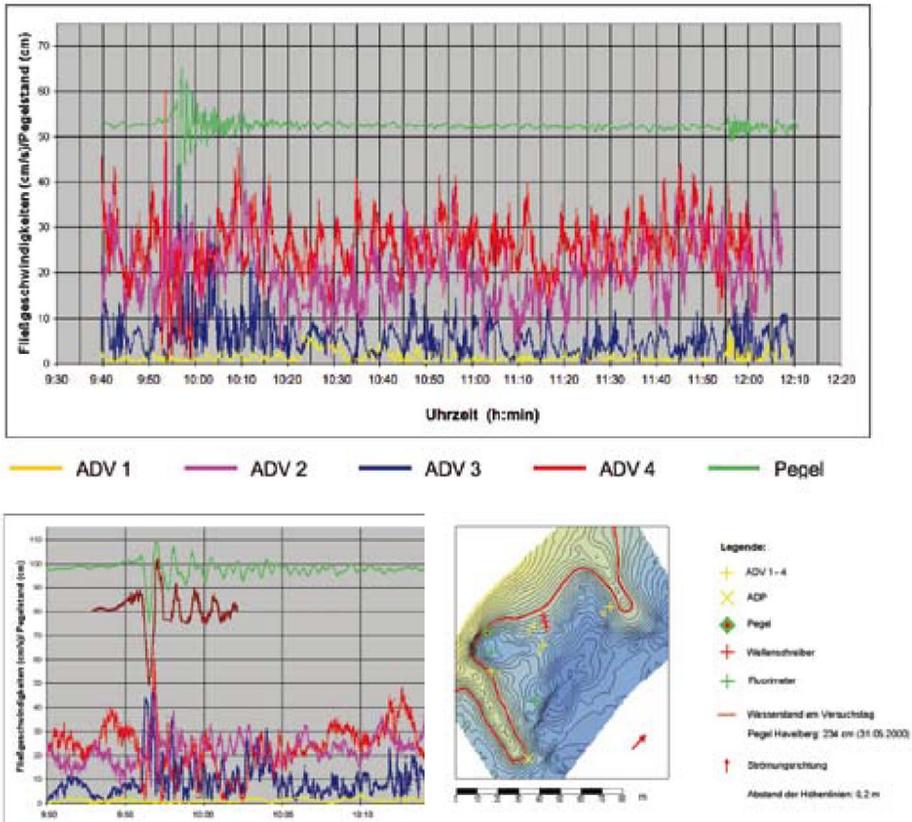


Abb. 2: Ergebnisse einer Messkampagne am 31.05.2000 in einem Bühnenfeld bei Elb-km 421 bei niedrigem Mittelwasser (oben). Die Anordnung der Messgeräte (unten, rechts) und ein Auszug für die Zeit ab 9:50 Uhr (links, unten), ergänzt um die Ergebnisse des Wellenschreibers (dunkelrote Kurve); aus Wirth (2005).

Von den Messergebnissen sind diejenigen Abschnitte herausgezogen, die relevante Informationen für unsere Fragestellung beinhalten. Abb. 2 oben zeigt (in rot, magenta, blau und gelb) den zeitlichen Verlauf der Strömungsgeschwindigkeiten an den Messgeräten im Zentrum des Bühnenfelds, am unterstromigen Bühnenkopf sowie in der hinteren Ecke des Bühnenfelds. Man erkennt auch ohne tiefgehende Spektralanalyse ein dominierendes Signal mit einer Periode

von ungefähr 200 Sekunden. Die Registrierungen des Wasserstands am Pegel (in grün) enthalten diese Periode nur sehr schwach ausgeprägt – allerdings zeigt sich kurz vor 10 Uhr und kurz vor 12 Uhr ein heftiges Schwingen, das jeweils der Vorbeifahrt eines Güterschiffs zuzuschreiben ist. Aus diesen beiden Episoden lassen sich (wie weiter unten gezeigt wird) die Perioden der Eigenschwingungen des Bühnfelds ermitteln.

Was mir bei der Betrachtung dieser Registrierungen gar nicht gefallen wollte, war diese deutliche Diskrepanz zwischen den Perioden der Fluktuationen der Strömungsgeschwindigkeiten und denen der Wasserstandschwankungen. Das passte nicht zu der „einfachen“ Vorstellung, dass die Wirbel aus der Übergangszone zwischen Fluss und Bühnfeld die Eigenschwingungen im Bühnfeld anregen (und diese gegebenenfalls zurückwirken auf die Wirbelentstehung). Ich sah mich also genötigt, etwas gründlicher in die Hydrodynamik der durch Strömung induzierten Buchtschwingungen (oder, etwas allgemeiner formuliert: der *flow induced oscillations of cavities*) einzusteigen. Der eingeschlagene Weg soll in der gebotenen Kürze skizziert werden:

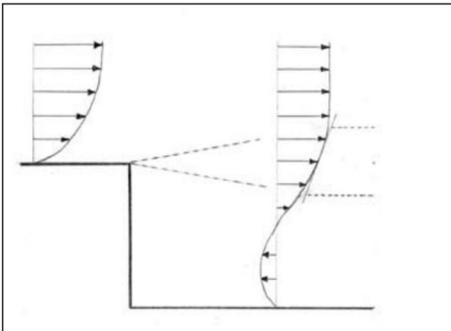


Abb. 3: Querprofil der mittleren Strömungsgeschwindigkeit mit einem festen Ufer als Berandung (links) und mit einem seitlichen Bühnfeld (rechts).

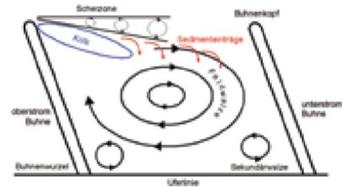
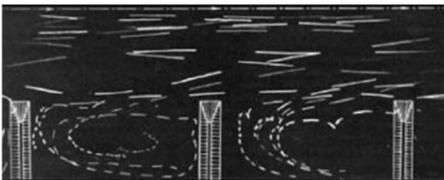
Am Anfang steht das Verhalten eines gleichförmig und träge dahinströmenden Flusses („*ol' man river*“), dessen von turbulenten Fluktuationen „befreites“ Strömungsfeld im linken Teil der Abb. 3 skizziert ist. Für unsere Belange von größter Bedeutung ist die ufernahe Reibungsgrenzschicht, wo durch die Reibung an den festen Ufern die Strömungsgeschwindigkeiten drastisch verringert werden. Diese Grenzschicht zeichnet sich aus durch ein Übermaß an „Verwirbelung“ (*vorticity*). Sie bleibt aber dennoch stabil.

Wenn der geradlinige Verlauf des Ufers aufgebrochen wird durch eine Ausbuchtung, verliert sich der stabilisierende Effekt des Ufers. Die neu entstehende Strömungsscherschicht (Abb. 3, rechts) tendiert dazu, sich in ein Band von Wirbeln zu

entwickeln. Die Details dieser Verwandlung der Strömung sind von zentraler Bedeutung und spielen eine ähnliche Rolle wie die Instabilitäten an den seitlichen Berandungen des einschließenden Strahls bei den Flowforms. Darauf wird weiter unten ausführlich eingegangen.

Zunächst soll beschrieben werden, wie das vorbeiströmende Wasser auf das Wasser in der Bucht einwirkt. Dieses wird natürlich nicht in Ruhe verharren, sondern durch das vorbeiströmende Wasser in Bewegung versetzt, was letztendlich zu einem die Bucht ausfüllenden Wirbel (die sogenannte „Feldwalze“) führt (Abb. 4, rechts). Das hat wiederum zur Folge, dass die Strömung vor dem landseitigen Ufer der Bucht entgegen der Strömung im Fluss gerichtet ist. Kanufahrer machen sich dies zu Nutze bei ihrer Fahrt flussaufwärts. Und sicherlich haben in früheren Zeiten die Treidler (oder „Bomätscher“) diesen Effekt an Buchten des Flusses auch schon bemerkt.

Wissenschaftliche Untersuchungen zu dem Phänomen der Wirbel in Buhnenfeldern wurden zuerst von Rehbock (1926) anhand von Versuchen im Strömungskanal unternommen. Er brachte (im wahrsten Wortsinn) einige markante Eigenschaften der Strömungsverhältnisse in Buhnenfeldern ans Licht, fotografierte er doch mit brennenden Kerzen bestückte Driftkörper auf ihren Bahnen (siehe dazu Abb. 4, links). Man erkennt, wie stark reduziert die Strömungsgeschwindigkeiten im Zentrum des Wirbels sind (jede weiße Linie entspricht einer Belichtungszeit von 1 Sekunde). Einige Drifter, die im Inneren des Buhnenfelds eingesetzt wurden, verlassen dieses Feld und werden von der deutlich stärkeren Strömung des Hauptfeldes mitgerissen. Aber auch die Möglichkeit einer oder mehrerer Runden ist angedeutet. Dass sich die Drifterbahnen kreuzen, ist ein deutliches Zeichen dafür, dass keine streng stationäre Geschwindigkeitsverteilung vorliegt.



Schemata der Strömungsverhältnisse sowie von Erosion und Sedimentation in einem Buhnenfeld bei nicht überdeckten Buhnen (aus Wirtz 2004)

Abb. 4:

Links: Eines der Versuchsergebnisse von Rehbock (1926), um den Verlauf der Strömungen in einem Buhnenfeld zu bestimmen. Die Länge der weißen Striche entspricht der in 1 Sekunde zurückgelegten Strecke.

Rechts: Das stark schematisierte Bild eines durch den Hauptstrom angeschobenen stationären Wirbels („Buhnenfeldwalze“).

Welche Fortschritte sich in neuerer Zeit durch die Weiterentwicklung der Messtechnik ergeben haben und welche Einblicke sich damit auftun, soll am Beispiel eines Auszugs aus einer Bildfolge (aus Weitbrecht, 2004) gezeigt werden, auf dem deutlich die Wirbelstruktur zu erkennen ist, nachdem die mittlere Strömung abgezogen wurde und nur noch die dieser mittleren Strömung überlagerten Strömungsgeschwindigkeiten als Vektorpfeile dargestellt sind.

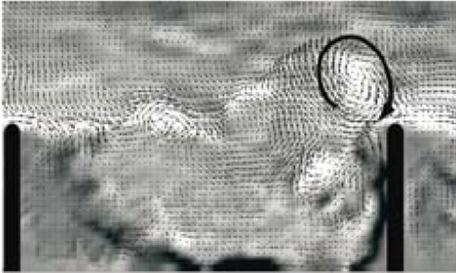


Abb. 5: Momentaufnahme der Geschwindigkeitsfluktuationen (aus Weitbrecht, 2004) im Bühnenfeld eines Strömungskanals nach Abzug der mittleren Strömung. Die Strömung im Hauptstrom ist von links nach rechts gerichtet; die mittlere Strömung im Bühnenfeld würde ungefähr so wie die in Abb. 4 gezeigte „Walze“ aussehen.

Wie lassen sich diese hochdynamischen Vorgänge erklären?

Zwischen dem Inneren der Bucht und der Hauptströmung hat sich ein Übergangsbereich, eine Scherschicht, gebildet (siehe Abb. 3, rechts), in der zum einen noch die ganzen „Verwirbelungen“ der oberstromigen Randschicht enthalten sind, und zum anderen das gescherte Geschwindigkeitsfeld zu weiterer „Verwirbelung“ führt. Die Strömung wird zwangsläufig instabil mit der Folge, dass sich die vielen kleinen „Verwirbelungen“ zu „Wirbelballen“ entwickeln. Zusätzlich beginnt der ganze Bereich der Scherschicht abwechselnd nach beiden Seiten auszuschwingen. Zwei Bilder sollen diesen Vorgang veranschaulichen: In Abb. 5 ist das Ergebnis einer Computersimulation zu sehen, die zeigt, wie sich ein Band von interagierenden Punktwirbeln mit der Zeit entwickelt.

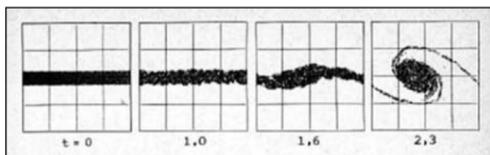


Abb. 6, links: Das Aufrollen eines Wirbelbandes zu einem Wirbelballen. Das Band besteht aus Hunderten von statistisch verteilten Punktwirbeln. Computerbild von Roberts und Christiansen (1972). Zeitliche Abfolge von links nach rechts.

Rechts: Scherschicht-Instabilität am Eingang des Saltstraumen-Fjords (Nord-Norwegen). Hauptströmung von rechts (Inneres des Fjords) nach links (offenes Meer). Foto: M. Bohl

Es ist verblüffend, wie viel Ähnlichkeit der entstehende „Wirbelballen“ mit den Strukturen aufweist, die in der Natur an solchen Grenzschichten entstehen (Abb.6).

Die dem Foto der Abb. 6 (rechts) zugrundeliegende Erscheinung ist zwar deutlich vehementer ausgeprägt als die äquivalenten Vorgänge vor den Bühnenfeldern der Elbe, der einzig wesentliche Unterschied ist aber dadurch gegeben, dass die norwegischen Wirbel sich verlaufen ins offene Meer, während die Flusswirbel auf den flussabwärts gelegenen durch die Bühne gebildeten „Querriegel“ treffen.

In Abb. 7 ist dies schematisch dargestellt:

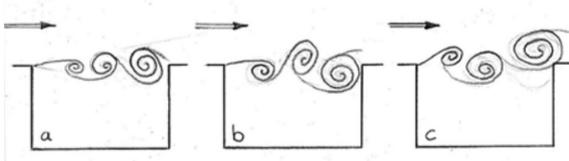


Abb. 7a-c: Schematische Darstellung des seitlichen Ausschwingens der Wirbelkette mit dem vollen Aufprall auf die unterstromige Bühne (b) bzw. dem Vorbeischräumen am unterstromigen Bühnenkopf (c). Der weitere Verlauf der reflektierten Wirbel, die Ausbreitung der dabei ausgelösten Druckschwankungen mit der Phasengeschwindigkeit langer Schwerewellen und das Strömungsfeld der „Walze“ ist der Übersichtlichkeit wegen nicht eingezeichnet.

Dieses in Abb. 7 angedeutete pulsierende Hin- und Herschwingen führt im Bereich der angeströmten Bühne zu einer zusätzlichen „Modulation“ des Anstaus. Entsprechend komplex gestalten sich die damit einher gehenden Druckschwankungen, die sich von dort aus mit der Phasengeschwindigkeit langer Schwerewellen ausbreiten und nach einer gewissen Zeit den Bereich des oberstromigen Bühnenkopfs, dem Entstehungsort der Wirbel, erreichen, was zu einer Beeinflussung des ursprünglichen Entstehungsmechanismus führt (wir dürfen voraussetzen, dass $c > U$).

Diese Rückkopplung wird unter zwei Bedingungen relevant: Zum Einen müssen diese Druckschwankungen zu der Frequenz der Wirbelentstehung „passen“, aber, darüber hinausgehend, müssen sie ausgeprägt genug sein. Das ergibt sich andererseits, wenn diese Druckschwankungen mit einer Frequenz geschehen, die sich der Eigenfrequenz (besser gesagt: einer der Eigenfrequenzen) der Bühnenfeldschwingungen nähert. Dann werden die Wassermassen des Bühnenfeldes „hochgeschaukelt“ und das ganze System befindet sich im Zustand der Resonanz.

Dann ist die Frequenz der Bühnenfeldschwingung zum bestimmenden Faktor der Wirbelbildung geworden, ein Vorgang der als „Lock-on“ bezeichnet wird (Wolfinger et al., 2012; Perrot-Minot et al., 2020).

Selbst dann, wenn sich die Strömungsgeschwindigkeit im Fluss noch vergrößert, ändert sich die Frequenz der Wirbelbildung nicht mehr. Das System ist in den Zustand der sich selbst erhaltenden Resonanz geraten.

In Abb. 8 ist dies schematisiert dargestellt, indem die Abhängigkeit der Wirbelfrequenz f_0 von der Strömungsgeschwindigkeit U des Flusses aufgezeichnet ist.

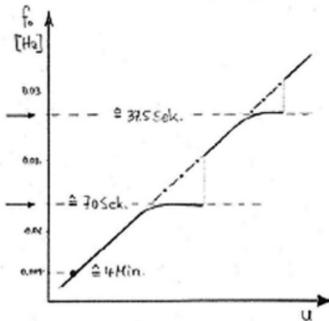


Abb. 8: Die Wirbelfrequenz f_0 in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit U eines Flusses (stark schematisiert und in Teilen spekulativ), ergänzt um die Beobachtungen aus einem Bühnenfeld der Elbe (siehe dazu den Text zu Abb. 2). Die Eigenfrequenzen f_1 und f_2 sind durch Pfeile auf der Frequenz-Achse markiert. Der rote Punkt steht für die am 31.05.2000 gemessene Frequenz f_B . Strichpunktiert ist der Verlauf ohne „Lock-on“.

Der zunächst lineare Anstieg der Frequenz f_0 schwenkt mit größer werdender Strömungsgeschwindigkeit U bei Annäherung an die Bühnenfeldschwingung mit der niedrigsten Eigenfrequenz auf diesen Wert ein (Wirbelbildung und Eigenschwingung geraten in den Zustand des „Lock-on“). Die Eigenschwingung „steuert“ die Wirbelbildung und verhindert, dass die zunehmende Strömung zu einer Erhöhung der Wirbelfrequenz führt. Dadurch bleibt der Resonanzzustand so lange erhalten, bis bei weiterer Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit der Zustand „nicht mehr haltbar“ wird: die Wirbelfrequenz nimmt den Wert an, der „eigentlich“ (ohne „Lock-on“) der Strömungsgeschwindigkeit angemessen ist. Eventuell ergeben sich unmittelbar daran anschließend Bedingungen, bei denen die Oberschwingung mit der nächst höheren Frequenz die Führungsrolle übernimmt und diese Frequenz die Wirbelfrequenz bestimmt. Untersuchungen im Strömungskanal und numerische Modellierungen zeigen, dass sogar ein sprunghafter Wechsel von Schwingung zu Schwingung stattfinden kann.

Mit diesem theoretischen Rüstzeug können wir uns nochmals der Interpretation der in Abb. 2 vorgestellten Beobachtungen im Bühnenfeld bei Elb-km 421

zuwenden. Wie schon an anderer Stelle erwähnt, passen die Frequenzen der durch die vorbeifahrenden Schiffe angeregten Schwingungen nicht zu den Fluktuationen der Strömungen. Das Fehlen von nennenswerten Auslenkungen der Wasseroberfläche in dem Frequenzbereich des Strömungssignals hatte schon die Vermutung aufkommen lassen, dass es sich nicht um Bühnenfeldschwingungen handeln kann. Der in Abb. 8 dargestellte Kurvenverlauf zeigt deutlich, dass die Frequenz des gemessenen Signals (in Abb. 8 durch einen fetten Punkt angedeutet) zu niedrig war, um eine der Eigenschwingungen des Bühnenfelds (markiert durch Pfeile) in Resonanz zu versetzen. Es handelt sich also um das (erstaunlich energiereiche) Signal der an den Messgeräten vorbeiziehenden Scherschicht-Instabilitäten.

Des Weiteren kann man folgern, dass mit zunehmender Wasserführung (zur Erinnerung: am Tag der Messungen herrschte Niedrigwasser) die Wirbelfrequenz größer würde und demnach der sie repräsentierende Punkt auf der Kurve nach oben klettern würde, um irgendwann den Wert der Buchtschwingung zu erreichen. Es fehlte den Scherschichtwirbeln augenscheinlich nicht die Energie zur resonanten Anregung bzw. zum „Lock-on“, sondern der passende „Takt“.

Mit diesen periodisch gegen die Buhne andriftenden Wirbeln sind alle Requisiten gegeben, um den Vorgang der Buchtschwingungen in Gang zu setzen. Wenn nämlich durch die „Schaukelbewegung“ der auf das Ufer treffenden Wirbelballen die Frequenz einer der Eigenschwingungen des Bühnenfeldes getroffen wird, kann das auf die typischen Schaukelbewegungen der Wassermassen in diesem auf 3 Seiten abgeschlossenen und auf einer Seite durch die Scherschicht begrenzten Beckens führen. Entscheidend hierfür ist, ob die zeitliche Abfolge der durch die Hauptströmung induzierten Wirbel (und damit das „Pumpen“ am unterstromigen Bühnenkopf) in dem Periodenbereich liegen, in dem Resonanz im Bühnenfeld möglich ist.

Die durch den „Aufprall“ ausgelösten periodischen Wasserstandsschwankungen breiten sich als Flachwasserwellen mit der Phasengeschwindigkeit $c = \sqrt{gH}$ in alle Richtungen aus (g steht für die Schwerebeschleunigung und H für die Wassertiefe). Da c größer als die Strömungsgeschwindigkeit V ist, erreichen diese Druckschwankungen nach einer gewissen Zeit die oberstromige Buhne, werden dort reflektiert und laufen durch das Bühnenfeld zurück zur unterstromigen Buhne. Dort findet wiederum Reflektion statt. Wenn dies synchron zu den weiterhin aufprallenden Wirbeln der Scherschicht geschieht, ergibt sich daraus resonante Verstärkung und das Wasser im Bühnenfeld gerät in Schwingung.

Ein weiteres Phänomen bei solchen rückgekoppelten Vorgängen ergibt sich aus der Rückwirkung der mit den Bühnenfeldschwingungen einhergehenden periodischen Druck- und Strömungsschwankungen auf den Ursprungsort der Wirbelkette (der oberstromige Bühnenkopf). Wenn die Ablöse-Frequenz der Wirbel sich nur wenig von der Eigenfrequenz des Bühnenfelds unterscheidet, ändert sich Ersteres dahingehend, dass die Bedingungen für Resonanz optimiert werden. Dieses Phänomen (im Englischen „lock-on“ genannt) wurde schon im Teil 1 im Zusammenhang mit den Flowform-Schwingungen erwähnt und dabei auf die Arbeiten von Rockwell & Naudascher über „*flow-induced oscillations*“ verwiesen.

Dieser Rückkopplungsmechanismus greift allerdings nur, wenn sich die Wirbel-frequenz der Schwingungsfrequenz annähert, und da erstere von der Strömungsgeschwindigkeit des Flusses und letztere von der Gestalt des Bühnenfelds abhängt, ist prinzipiell für jedes einzelne Bühnenfeld zu prüfen, ob die aktuell vorliegenden Verhältnisse überhaupt günstig stehen.

Zurück zu den Messergebnissen aus dem Jahr 2000: Was überhaupt nicht ins Bild von resonant angeregten Eigenschwingungen passt, ist zum Einen das klägliche Signal im Pegelschrieb, was aber auch dadurch erklärt werden könnte, dass sich das Messgerät unglücklicherweise an der Stelle des Schwingungsknotens (also der Stelle ohne Vertikalauslenkung der Wasseroberfläche) befindet. Zum Anderen – und das ist essentiell – besteht zwischen den Strömungsgeschwindigkeiten der dicht beieinander liegenden Messgeräte ADV3 und ADV4 ein deutlicher Phasenunterschied, wie er bei einer Beckenschwingung nicht vorhanden sein dürfte.

Dadurch drängt sich die Vermutung auf, dass es sich bei den gemessenen periodischen Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeiten gar nicht um die Auswirkungen von Bühnenfeldschwingungen handelt, sondern um die Signatur der Wirbelkette, die, nachdem sie an der unterstromigen Bühne reflektiert wurde, durch das Bühnenfeld „vagabundiert“. Die entscheidende Frage ist dann, ob sich der zwischen den beiden Messstellen gemessene Phasenunterschied beim Durchzug eines Wirbels ergeben kann.

Anhand einer kleinen, ganz aufs Wesentliche konzentrierten Skizze kann gefolgert werden, dass der gemessene Phasenunterschied eher für einen durchziehenden Wirbel als für die Pendelbewegung einer Bühnenfeldschwingung spricht.

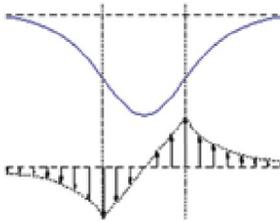


Abb. 9: Schematische Darstellung eines Wirbels. Oben: Der Verlauf der Wasseroberfläche im Vertikalschnitt durch das Zentrum. Unten: Die dazu gehörigen Geschwindigkeiten in Draufsicht. Im zentralen Drittel ähneln sowohl die Oberflächenform als auch die Geschwindigkeiten denen eines starren Wirbels.

Ob dieses sich periodisch wiederholende Signal die Wirbel auf ihrem „Hinweg“ vom flussaufwärts gelegenen Bühnenkopf oder auf dem „Rückweg“ vom flussabwärts gelegenen Bühnenkopf durchs Innere des Bühnenfelds zurück zum flussaufwärts gelegenen Bühnenkopf (wo die Wurzeln ihrer Entstehung zu verorten sind) zeigt, lässt sich ohne Zugriff auf die Originaldaten nicht entscheiden.

Und wo bleiben die Schwingungen des Bühnenfelds? Die gibt es natürlich auch (wie gleich gezeigt werden soll). Aber zumindest in diesem in Betracht stehenden Bühnenfeld und bei den am 31.5.2000 aktuell vorliegenden Wasserständen (und damit einhergehend: den aktuell vorliegenden Strömungsgeschwindigkeiten des Flusses) waren nicht ansatzweise die Voraussetzungen für eine resonante Kopplung zwischen den Scherschichtwirbeln, die offensichtlich vorhanden waren, und den Eigenschwingungen gegeben. Um es nochmals zum Ausdruck zu bringen: Die an den Messpunkten registrierte Frequenz der durchziehenden Wirbel war an diesem Tag und für dieses Bühnenfeld nicht hoch genug, um die Schwingungen (Seiches) dieses Bühnenfelds anzuregen.

Ein „glücklicher Zufall“ in Gestalt von zwei vorbeifahrenden Schiffen bringt Licht in die Angelegenheit, zeigen doch die Pegelschriebe für die Zeitpunkte der Vorbeifahrten ein heftiges periodisches Auf und Ab des Wasserstands (in Abb. 2 (links unten) war der erste der beiden Abschnitte nochmals vergrößert dargestellt worden). Man erkennt leicht zwei unterschiedliche Perioden (70 Sekunden bzw. 38 Sekunden), die sich beide so deutlich von der 4-Minuten-Periode der Scherschichtwirbel unterscheiden.

Die beiden Messgeräte (grün, Pegel; tiefrot, Wellenschreiber), mit denen der Wasserstand gemessen wird, zeigen beide eine Schwingung mit einer Periode von ca. 70 Sekunden an. Am Pegel erkennt man, dass dieser Schwingung eine andere

Schwingung mit etwas mehr als der halben Periode überlagert ist, die, wenn die länger periodische Schwingung ungefähr 5 Minuten nach ihrer Anregung auch schon wieder abgeklungen ist, noch wenigstens 20 Minuten weiter schwingt. Diese kurzperiodische Schwingung scheint beim Wellenschreiber, der auf der „Mittellinie“ des Bühnenfeldes platziert war, kein Signal hinterlassen zu haben, was darauf hindeutet, dass dort ein Knoten dieser Schwingung vorliegt. (Leider bricht die Registrierung so früh ab, dass diese Aussage nicht gesichert ist.)

Die Annahme, dass es sich bei der 70-Sek.-Schwingung um eine Buchtschwingung mit dem Schwingungsknoten bei der Streichlinie des Bühnenfeldes (siehe Abb. 10 links) und bei der 38-Sek.-Schwingung um eine „Kantenschwingung“ (*standing edge wave*, siehe Abb. 10 rechts) mit einer zusätzlichen Knotenlinie (längs der „Mittellinie“) handelt, wird unterstützt durch die bei den ADV-Stationen gemessenen oszillierenden Strömungen, die eine Periode von 38 Sekunden aufweisen (am deutlichsten zu erkennen bei ADV2 ab 10:00 Uhr; siehe Abb. 2). Die Tatsache, dass die Geschwindigkeitsvektoren an beiden Strömungsmessgeräten (blau bzw. violett in Abb. 2) in Phase sind, zeigt, dass sie auf der Knotenlinie liegen, und stützt die Annahme, dass es sich um eine einknotige stehende Kantewelle (*standing edge wave*) handelt, die ihre Knotenlinie auf der Mittellinie des Bühnenfeldes hat.

Dass diese Schwingung (im Gegensatz zu der längerperiodischen Buchtschwingung) so lange anhält, erklärt sich daraus, dass sie, einmal angestoßen durch das vorbeifahrende Schiff, ihre Energie nicht – wie die Buchtschwingung – in die Fahrrinne abstrahlt, sondern sie, deutlich weniger ausgeprägt, innerhalb des Bühnenfeldes durch die Boden- und Randraibung verliert.

Zur Verdeutlichung der zuletzt gemachten Aussage soll noch etwas zur räumlichen Struktur der erwähnten Bühnenfeldschwingungen gesagt werden, was (das mag überraschen) genau betrachtet nicht zufriedenstellend möglich ist. Die theoretische Durchdringung des Problems der Eigenschwingungen in durchströmten Wasserbecken ist nämlich noch nicht gelungen – erst recht nicht, wenn eine Seite des Beckens von einem vorbeiströmenden Fluss gebildet wird.

Auch die beiden in Abb. 10 anhand der Oberflächenauslenkungen dargestellten Schwingungsstrukturen wurden ohne Berücksichtigung der mittleren Strömungen berechnet, aber immerhin sind sie begrenzt auf den Zwischenbühnenbereich und kommen damit der Realität näher als die Berechnungen, die sich (auch in neuesten Publikationen) auf die klassische Meriansche Theorie stützen (z.B. Navas-Mortilla et al., 2020; Perrot-Minot et al., 2020).

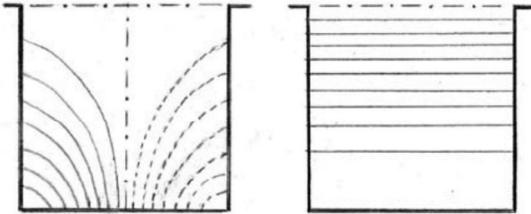


Abb. 10: Die Horizontalstruktur der Schwingungen in einem rechteckigen Buhnenfeld dargestellt durch die „Höhenlinien“ der Oberflächenauslenkungen im Moment der maximalen Auslenkungen der einknotigen stehenden Kantenwelle (links) bzw. der fundamentalen Bucht-schwingung mit einer Knotenlinie an der zum Fluss hin offenen Seite (rechts). Die Knotenlinie ist strichpunktiert, die Abwärtsauslenkungen sind gestrichelt und die Aufwärtsauslenkungen durchgezogen gezeichnet.

Diese beiden kurzperiodischen Buhnenschwingungen wurden in diesem Fall, wie gesagt, nicht durch die Scherströmungswirbel, sondern durch die vorbeifahrenden Schiffe „angestoßen“.

Résumé 1: Der tönende Fluss

Als Résumé drängen sich zwei sehr schöne, nahezu poetische Beschreibungen auf: Zum einen erregt die Strömung in einem Fluss, der noch nicht völlig begradigt wurde, also noch gesäumt ist von Buchten (oder sich wenigstens anhand einer Aneinanderreihung von Buhnenfeldern von einem Kanal unterscheidet), je nach Wasserführung und der jeweiligen Gestalt der Buchten in diesen (dort „wo es passt“) einen „Dauer-ton“. Das wird nicht in jedem der Buhnenfelder oder jeder der Buchten der Fall sein. Aber das Angebot der Elbe mit ihren über 6000 Buhnenfeldern ist so vielfältig, dass ab und an ein Ton zu hören wäre, wenn nur unser Gehör für Perioden im niederen Minutenbereich geschaffen wäre.

Zum anderen ist zu beobachten, wie jedes größere, flussaufwärts oder flussabwärts fahrende Schiff ein Buhnenfeld nach dem anderen zum Klingen bringt, also einen „Schweif von Tönen“ hinter sich herzieht.

In gewisser Weise ähnelt der Fluss einer Windharfe, deren Saiten auch nur bei günstigen Windverhältnissen „anspringen“, aber jederzeit durch ein gezieltes Anzupfen zum Klingen gebracht werden können.

Unabhängig von der Wasserführung des Flusses kann aber vorbehaltlos garantiert werden, dass jedes größere vorbeifahrende Schiff in jedem der Buhnenfelder Schwingungen (Seiches) anregt. Wie ausgeprägt die Schwingungen sind, hängt

auf recht komplizierte Weise davon ab, wie effizient Sunk und Schwall auf das Bühnenfeld einwirken. Welche der vielfältigen Eigenschwingungen des Bühnenfeldes bevorzugt angeregt wird, hängt letztendlich vom Schiffstyp und der Dauer der Vorbeifahrt ab. In gewisser Weise ist dieser Vorgang vergleichbar mit dem Anzupfen einer Saite und der ganz speziellen Technik, mit der dabei die Lautstärke und die Klangfarbe der Saite beeinflusst werden. Das „Klangspektrum“ des Bühnenfeldes ist allerdings festgelegt durch die räumliche Ausdehnung und durch den momentan vorliegenden Wasserstand. Jedenfalls wird jedes Schiff begleitet vom anschwellenden und verklingenden Klang der zum Schwingen angeregten Bühnenfelder.

Dieses sporadisch auftretenden Phänomen geschieht vor dem Hintergrund des durch die Wirbel der Scherschicht-Instabilität permanent wirkenden „Pulsierens“ im Wasserkörper aller Bühnenfelder, welches – allerdings nur in besonderen Situationen – zum dominierenden Effekt „anschwellen“ kann.

Résumé 2: Ökologie, Schadstoffe

Durch die in diesem Beitrag vorgestellten Analysen und Überlegungen ist ein Versuch gemacht worden, diese jedem Fluss innewohnenden Möglichkeiten zu erkunden und in Ansätzen zu erklären. Die Messungen aus dem intensiv untersuchten Bühnenfeld der Elbe waren dabei von großer Hilfe, auch wenn sich herausgestellt hat, dass der Vorgang der Kopplung zwischen Scherschichtwirbeln und Schwingungen nicht stattgefunden hat – zumindest nicht in diesem Bühnenfeld und nicht bei der zu dieser Zeit vorliegenden Wasserführung des Flusses.

Welche Bedeutung diese Vorgänge für die Ökologie in den Buchten bzw. in den Bühnenfeldern von Flüssen haben, kann in dem vorliegenden Beitrag nur angedeutet werden. Es ist bestimmt unmittelbar einsichtig, dass ein Teil der kinetischen Energie des Flusses durch das beschriebene Wechselspiel in den Bühnenfeldern „verloren“ geht.

Dies geschieht durch die Vermischung in der Wassersäule, aber auch durch die turbulenten Austauschvorgänge am Boden und am Ufer.

Ein großer Teil des Lebens im Fluss findet in den eher strömungsberuhigten Bereichen der Bühnenfelder durch die dort angesiedelten Mikroorganismen, Pflanzen und Tiere statt. Die Ausbildung der Zirkulationswalze führt letztendlich zu erhöhter Sedimentation und leider auch zu einer Ansammlung von unterschiedlichsten Schadstoffen. Es ist deshalb für das Verständnis der Flussdynamik von einiger Bedeutung, die Vorgänge in diesen „Seitenarmen“ des Flusses besser zu verstehen.

Im Gegensatz zu den Vorgängen in den Flowforms ist das Geschehen in den Buchten oder Bühnenfeldern eines Flusses praktisch permanent im Wandel, was zum Einen an der sehr wechselhaften Wasserführung liegt und zum Anderen an den Veränderungen, die durch Sedimentation bzw. Erosion bewirkt werden.

In den Flowforms, wenn sie einmal richtig eingerichtet wurden, bleibt das Pulsieren erhalten. Am Fluss verändern sich wegen der ständig wechselnden Strömungsverhältnisse im Hauptstrom auch die Schwingungsverhältnisse in den Buchten dauernd.

Dr. Erich Bäuerle

Literatur:

Merian, J. R. (1828). Über die Bewegung tropfbarer Flüssigkeiten in Gefäßen. – Abgedruckt 1886 in Math. Ann. 27, 575 – 600.

Naudascher, E., and D. Rockwell (1994). Flow-induced vibrations: an engineering guide.

Navas-Montilla, A., Martinez-Aranda, S., Lorenzo, A., and P. Garcia-Navarro (2020). Numerical study of resonant shallow flows past a lateral cavity: benchmarking the model with a new experimental data set. EGU2020-89-presentation.

Perrot-Minot, C., Engelen, L., Riviere, N., Lopez, D., De Mulder, T and E. Mignot (2020). Seiches in lateral cavities with simplified planform geometry: Oscillation modes and synchronization with the vortex shedding. Physics of Fluids, 32.

Rehbock, T. (1926). Das Flussbaulaboratorium der Technischen Hochschule in Karlsruhe. VDI Verlag, Berlin.

Roberts, K. V. and J. P. Christiansen (1972). Topics in Computational Fluid Dynamics. The Impact of Computers on Physics. Zitiert in Hans. J. Lugt (1979): Wirbelströmung in Natur und Technik. 460 S.

Weitbrecht, V. (2004). Influence of dead-water zones on the dispersive mass transport in rivers. Dissertation an der Universität Karlsruhe. 145 S.

Wirth, C. (2005). Hydromorphologische und morphodynamische Analyse von Bühnenfeldern der unteren Mittelelbe im Hinblick auf eine ökologische Gewässerunterhaltung. Dissertation an der FU Berlin.

Wolfinger, M., Ozen, C.A. and D. Rockwell (2012). Shallow flow past a cavity: Coupling with a standing gravity wave. Physics of Fluids, 24.