

Pfeiftöne vom Teefilter

– Ein strömungsakustisches Alltagsphänomen –

Wilfried Suhr

Auf der Höhe 16, 26160 Bad Zwischenahn, wilfried.suhr@uni-muenster.de
(Eingegangen: 16.04.2020; Angenommen: 25.11.2020)

Kurzfassung

Ein schräg auf die Wandung eines Edelstahl-Teefilters aufprallender Wasserstrahl ruft bisweilen schrille Pfeiftöne hervor. Die Behandlung dieses verblüffenden Alltagsphänomens im Physikunterricht der Oberstufe gibt Gelegenheit, auf die dafür grundlegenden schwingungsmechanischen und strömungsmechanischen Vorgänge einzugehen. Der vorliegende Artikel zeichnet einen Weg vor, auf dem sich das Phänomen mit schulischen Mitteln schrittweise erschließen lässt. Dabei führen die Experimente zu der Modellvorstellung, dass den ausgesandten Pfeiftönen wirbelinduzierte Schwingungen zugrunde liegen.

Abstract

A jet of water hitting the wall of a stainless steel tea filter at an angle sometimes evokes shrill whistle sounds. Dealing with this astonishing everyday phenomenon in physics at high school level provides the opportunity to give insights into vibrational and fluid mechanical processes fundamental to it. This article outlines a way in which the phenomenon can be explored step by step using school physics equipment. The experiments lead to the model representation that the whistling sounds emitted are based on vortex induced vibrations.

1. Einleitung

Werden die in einem Edelstahl-Teefilter verbliebenen Teereste unter einem laufenden Wasserhahn ausgespült, kann es vorkommen, dass ein Pfeifton zu hören ist. Der Wasserstrahl muss dazu mit ausreichender Geschwindigkeit schräg auf die gelochte Wandung des Teefilters auftreffen. Dieses erstaunliche Alltagsphänomen wird schon seit einigen Jahren in Videos auf Online-Plattformen gezeigt (siehe z. B. [1], [2], [3]).

Trotz dieser Bekanntheit blieb die Suche nach einer veröffentlichten fachlichen Erklärung des Phänomens erfolglos. Dies mag daran liegen, dass der Gegenstand für die Fachwelt zu unbedeutend ist, weshalb sich der Aufwand, die Komplexität der sich auf kleinstem Raum abspielenden Strömungsvorgänge zu analysieren, für sie nicht lohnt. Ganz anders stellt sich dies aus einer physikdidaktischen Perspektive dar, da es gerade die Alltagsnähe des Phänomens ist, die es zu einem motivierenden und damit lohnenswerten Unterrichtsgegenstand macht. Hinzu kommt, dass die Strömungsmechanik im Physikunterricht ein Schattendasein führt, dem sich mit diesem reizvollen Gegenstand entgegenwirken lässt.

Um auf den Unterricht übertragbar zu sein, beschränkt sich die im Folgenden erläuterte fachliche Erschließung auf den Einsatz schulischer Mittel. Ein daraus hervorgehendes zweidimensionales Modell sorgt für die nötige Vereinfachung, indem es die

Komplexität des Strömungsgeschehens auf Vorgänge reduziert, die als maßgeblich für die Entstehung des Phänomens anzusehen sind.



Abb. 1: In dieser Konstellation von Edelstahl-Teefilter und auftreffendem Wasserstrahl kann ein Pfeifton auftreten.

2. Schwingungsmechanische Aspekte

2.1. Identifikation des Schallgebers

Die eingangs erwähnten Videos zeugen davon, dass das beschriebene Phänomen an handelsüblichen Edelstahl-Teefiltern auftritt, die sich baulich leicht unterscheiden. Es handelt sich aber zumeist um den

in Abb. 1 gezeigten Typ. Entscheidender für das Auftreten des Phänomens ist die Beschaffenheit des aufprallenden Wasserstrahls. Nach Möglichkeit sollte er kaum Blasen enthalten und eng gebündelt sein. Erfahrungsgemäß ist eine Aufprallgeschwindigkeit von über 2,5 m/s nötig, die sich nach einer Fallhöhe von etwa 35 cm ergibt¹. Sollte der Abstand zwischen dem Auslauf des Wasserhahns und dem Auffangbecken dafür zu klein sein, kann man die Auslaufgeschwindigkeit erhöhen, indem man den auf den meisten Wasserhähnen aufgeschraubten Perlator durch eine verengende Düse ersetzt.

Zu den weiteren Bedingungen gehört eine geeignete Positionierung und Ausrichtung des Teefilters zum Wasserstrahl. Am leichtesten lässt sich einem Teefilter ein Pfeifton entlocken, wenn der Wasserstrahl schräg auf die ebene Bodenfläche trifft. Mit etwas Glück kann man aber auch auf der gekrümmten Mantelfläche einen geeigneten Auftreffpunkt finden, um einen Ton erklingen zu lassen.

Was dabei als Schallgeber fungiert, geht aus dem Befund hervor, dass eine punktuelle Berührung bestimmter Zonen des Teefilters ausreicht, um den erzeugten Pfeifton abrupt verstummen zu lassen. Dabei liegen solche berührungsempfindlichen Zonen immer nur auf dem Bauteil, auf das auch der Wasserstrahl trifft. Dies ist ein Indiz dafür, dass das betreffende Bauteil elastisch schwingt, wobei die Berührung eine starke Dämpfung bewirkt. Was den hörbaren Luftschall demnach anregt, sind elastisch schwingende Bereiche der metallischen Wandung des Teefilters.

2.2. Schlussfolgerungen aus der Frequenzanalyse

Welche Frequenzen der abgestrahlte Pfeifton beinhaltet, lässt sich anhand einer Frequenzanalyse ermitteln. Für deren Durchführung gibt es diverse Audio-Programme, wie beispielsweise die frei erhältliche Software „Audacity“. Im Normalfall wird sich dabei herausstellen, dass das Spektrum monofrequent ist. Schon dieser Befund gibt Anlass zu einer Kette von Folgerungen, die in eine erste Modellvorstellung münden.

Da zwischen dem abgestrahlten Pfeifton und dem ihn hervorrufenden Körperschall eine direkte Kopplung besteht, ist davon auszugehen, dass die Schwingungen des schallgebenden Bauteils ebenfalls monofrequent sind. Unter Bezugnahme auf die Theorie der Plattenschwingungen² lässt sich eingrenzen, wie die zugehörige Schwingungsform im Prinzip beschaffen ist. Das Schwingungsverhalten einer Platte ist nämlich als mustergültig für andere flächenhafte elastische Strukturen anzusehen, zu denen auch ein Teefilter wegen seiner verhältnismäßig dünnen Wandung zählt.

Eine moderne Methode zur Untersuchung des Schwingungsverhaltens flächenhafter elastischer Strukturen besteht darin, sie harmonisch anzuregen,

wobei sich die Anregungsfrequenz über einen gewünschten Bereich kontinuierlich ändert. Dabei zeigt sich, dass derartige Strukturen bei bestimmten Frequenzwerten (den sogenannten Eigenfrequenzen) in vergleichsweise starke Resonanzschwingungen geraten.

Dass solchen Resonanzschwingungen stehende Biegewellen zugrunde liegen, demonstrierte Ernst Chladni bereits Ende des 18ten Jahrhunderts an ebenen Platten [5]. Diese regte er mit einem Geigenbogen zu einer Resonanzschwingung an, woraufhin sich zuvor aufgestreuter Sand von den stark vibrierenden Bereichen zu in Ruhe befindlichen hin verlagerte. Die sich so bildende Klangfigur ließ daher auf die Lage von Schwingungsbäuchen und Knotenlinien schließen. Akustisch machte sich die so erzeugte Resonanzschwingung durch einen laut hörbaren Klang bemerkbar, der einen dominanten Ton beinhaltete, den einige schwächere Obertöne begleiteten.

Im Lichte der gerade angestellten Betrachtungen sprechen also zwei Gründe dafür, dass der Teefilter Resonanzschwingungen ausführt, während er einen Pfeifton abstrahlt. Zum einen ist seine monofrequente Schwingung mit der (von einem Geigenbogen angelegten) dominanten Schwingung einer ebenen Platte vergleichbar. Zum anderen lässt sich die im vorigen Abschnitt angesprochene lokale Berührungsempfindlichkeit durch die Gegenwart stehender Biegewellen erklären: Diese werden bei Berührung ihrer lokal begrenzten Schwingungsbäuche effizient gedämpft, so dass der Ton verstummt.

Insgesamt spricht dies für die Modellvorstellung, dass der Wasserstrahl den Teefilter in einer Eigenfrequenz anregt, wodurch dieser in eine Resonanzschwingung versetzt wird. Das Strömungsgeschehen kann eine derartige mechanische Anregung aber nur dann verursachen, wenn es periodische Fließvorgänge enthält, die sich mit genau dieser Eigenfrequenz wiederholen. Selbst wenn die dadurch auf die Wandung des Teefilters ausgeübten Kräfte verhältnismäßig klein wären, könnten sie die Amplituden der so angeregten stehenden Biegewellen mit der Zeit stark aufschaukeln. Daraus resultierende Vibrationen von Flächen könnten damit stark genug werden, um hörbaren Schall abzustrahlen.

Die nachfolgenden Ausführungen dienen dazu, die hier skizzierte Modellvorstellung zu konkretisieren und deren Plausibilität durch weitere Untersuchungsergebnisse zu erhöhen.

2.3. Nachweis der Resonanzschwingung

Reduziert man die zum Hervorrufen des Phänomens nötigen Verhältnisse auf das Wesentliche, so verbleibt letztlich, dass ein Wasserstrahl auf die gelochte Wandung einer flächenhaften elastischen Struktur treffen muss. Insofern eignen sich dafür nicht nur

¹ Warum bei heißem Wasser eine geringere Aufprallgeschwindigkeit genügt, ist ungeklärt.

² Einen für die hier behandelte Thematik relevanten Einstieg vermittelt beispielsweise [4], Kapitel 7.1.

Teefilter, sondern auch andere schwingungsfähige Objekte, die eine gelochte Wandung haben.

Die nachfolgenden Untersuchungen wurden daher nicht an Teefiltern vorgenommen, sondern an ebenen Lochblechen, denen ein aufprallender Wasserstrahl ebenfalls Pfeiftöne zu entlocken vermag. Die Vorteile gegenüber Teefiltern bestehen darin, dass sie von allen Seiten her leichter zugänglich sind und sich aufgrund ihrer ebenen Form für Untersuchungsmethoden anbieten, die mit schulischen Mitteln durchführbar sind.

Entsprechend der Modellvorstellung müsste auch ein ebenes Lochblech in Resonanzschwingungen geraten, damit ein Pfeifton hörbar wird. Um dies nachzuweisen, bedienen wir uns einer Variante der klassischen Chladni-Methode. Damit der hervorgerufene Pfeifton eine gut hörbare Tonlage hat, sollte man dafür ein rechteckiges dünnes Lochblech von etwa 1 dm² Fläche verwenden, bei dem der Lochdurchmesser etwa 1 mm beträgt. Zur Fixierung empfiehlt es sich nur eine Ecke des Lochblechs einzuspannen, so dass es ansonsten frei schwingen kann.

Für einen Vorversuch richtet man das Lochblech so zum Wasserstrahl aus, dass zwischen ihm und der Lochblechebene ein Winkel von etwa 20° besteht. Damit es zu einer effizienten Schwingungsanregung kommt, muss der Wasserstrahl mit der passenden Geschwindigkeit an einem geeigneten Punkt des Blechs auftreffen. Sind beide Parameter bei einem neu zum Einsatz kommenden Lochblech noch unbekannt, sind sie durch Ausprobieren zu ermitteln, indem man bei unterschiedlichen Auftreffgeschwindigkeiten den Auftreffpunkt rasterartig über das Lochblech lenkt, bis ein Pfeifton hörbar ist. Hat man dessen Frequenz mittels einer Frequenzanalyse bestimmt, kann sich die Hauptuntersuchung anschließen, bei der sich zeigen wird, dass der gefundene Auftreffpunkt auf einem Schwingungsbauch liegt (vgl. Abb. 2).

Als Ausstattung für die Hauptuntersuchung werden ein Leistungsfunktionsgenerator und ein daran anschließbarer Schwingungserreger benötigt. Das trockene Lochblech wird dafür horizontal ausgerichtet, ohne dabei die Art seiner Einspannung zu ändern. Zur Kopplung zwischen dem Schwingungserreger und dem Lochblech wird eine kurze Druckfeder verwendet, die als zweite Stütze unterhalb jenes Punktes positioniert wird, der im Vorversuch als Auftreffpunkt des Wasserstrahls gedient hat.

Zur Sichtbarmachung seiner Schwingungsform wird das Lochblech dünn und gleichmäßig mit Maisgrieß bestreut. Dessen Körnung muss so groß sein, dass die Körner nicht durch die Löcher fallen. Um für den Schwingungserreger die passende Amplitude zu finden, betreibt man ihn zunächst bei einer Frequenz, die

etwa 10% von der im Vorversuch gefundenen abweicht. Die Amplitude wird dann so gewählt, dass sie etwas unterhalb der Schwelle liegt, ab der die auf das Blech übertragenen Vibrationen die Körner in sichtbare Bewegung versetzen. Nahe³ der im Vorversuch bestimmten Pfeiftonfrequenz lässt sich nun eine Anregungsfrequenz des Schwingungserregers finden, bei der sich der Maisgrieß zu einer „Klangfigur“ anordnet (Abb. 2).



Abb. 2: Auf einem ebenen Lochblech markiert Maisgrieß die Knotenlinien einer mechanisch angelegten Resonanzschwingung. Randbedingung war die Einspannung an der rot markierten Ecke. Damit ein Wasserstrahl die gleiche Resonanzschwingung anregt, muss er auf den blau markierten Schwingungsbauch treffen.

Die Lageänderung der Maisgrießkörner erfolgt dabei durch Hüpfen, was darauf schließen lässt, dass das Blech nunmehr ausreichend stark schwingt, um ihnen die dafür nötigen Stöße zu erteilen. Ohne eine Vergrößerung der Anregungsamplitude kann es zu derart starken Schwingungen aber nur dann kommen, wenn die Schwingungsanregung in einer Eigenfrequenz des Lochblechs erfolgt. Denn dann überlagern sich die vom Anregungsort ausbreitenden BiegeWellen zu stehenden BiegeWellen, sodass die Fläche ortsfeste Schwingungsbauche aufweist. Dies ermöglicht ein allmähliches Aufschaukeln der örtlichen Schwingungsamplituden, weshalb man von Resonanz spricht. Insofern ist die stattfindende Verlagerung der Maisgrießkörner zu einer Klangfigur ein sichtbarer Indikator für die Schwingungsanregung in einer Ei-

³ Die kleine Abweichung beider Frequenzen ist auf etwas unterschiedliche Randbedingungen beim Vor- und Hauptversuch zurückzuführen.

genfrequenz. Weil die Frequenz des vom Wasserstrahl hervorgerufenen Pfeiftons gut mit dieser Eigenfrequenz übereinstimmt, ist daraus zu folgern, dass auch der Wasserstrahl das Lochblech zu einer Resonanzschwingung anregt.

3. Strömungsmechanische Analyse

Wenngleich im vorausgegangenen Abschnitt Einsichten über die schwingungsmechanischen Aspekte des Phänomens gewonnen wurden, bleibt offen, wie die dafür nötige Schwingungsanregung erfolgt. Die Aufgabe dieses Abschnitts ist es, dies zu klären.

Die zwischen strömender Flüssigkeit und Lochblech auftretenden Wechselwirkungen beschränken sich weitgehend auf Druck- und Reibungskräfte, die im Wesentlichen von dem Teil des Strömungsgeschehens herrühren, dessen Bewegungsfreiheit durch die Wandung eingeschränkt ist. Die Analyse kann daher solche Teile des Strömungsgeschehens außer Acht lassen, die keinen solchen Einschränkungen unterliegen.

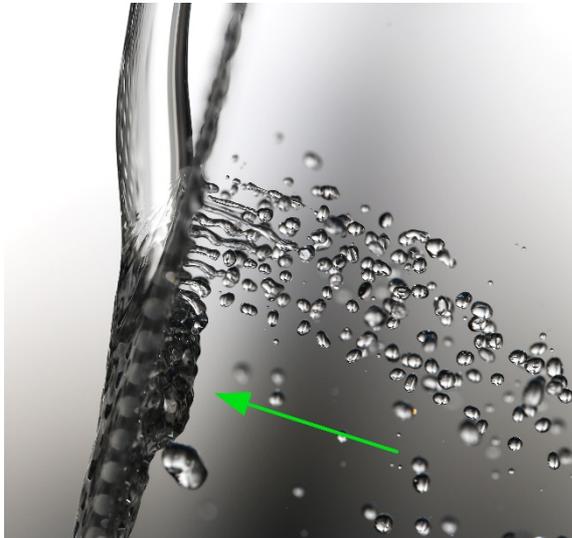


Abb. 3: Seitenansicht eines schräg gestellten Lochblechs, auf das ein Wasserstrahl trifft. Durch die Löcher dringendes Wasser schießt auf der Lee-Seite als Brausestrahl heraus. Unterhalb davon bildet sich ein wabernder Wulst (Pfeil).

3.1. Lokalisierung der anregenden Strömung

An einem Lochblech, das ein auftreffender Wasserstrahl zum fortwährenden Tönen anregt, lassen sich sehr unterschiedliche Strömungserscheinungen beobachten. Durch den Aufprall wird der freie Strahl so umgelenkt, dass er größtenteils in eine wandgebundene Strömung übergeht, die auf der Aufprallseite des Lochblechs verbleibt, wo sie sich aufgrund von Reibung so sehr verlangsamt, dass sie schließlich als breiter, dünner Film hinabrinnt. Ein gewisser Anteil des aufprallenden Wassers wird durch die darunterliegenden Löcher abgezweigt. Wie das Wasser auf der gegenüberliegenden Seite des Lochblechs austritt, hängt von seiner Fließgeschwindigkeit ab. Teilweise ist sie groß genug, um als „Brausestrahl“ aus den Lö-

chern herauszuschießen. Bei geringerer Fließgeschwindigkeit kann das Wasser die Oberflächenspannung nicht mehr überwinden, sodass es zunächst in einem stark wabernden Wulst aufgefangen wird, von wo aus es in einem ruhigeren Rinnsal die Blechwand hinunterfließt.

Welche dieser unterschiedlichen Strömungserscheinungen die Schwingungsanregung verursachen, lässt sich mit einer einfachen Methode testen. Dieser liegt die Idee zugrunde, dass der Pfeifton verstummt, wenn man die für seine Anregung maßgeblichen Fließvorgänge stört.

Damit sich der Störeinfluss im Wesentlichen auf die Strömung und kaum auf die Schwingungen des Lochblechs auswirkt, übt man ihn mittels eines eng begrenzten Luftstrahls aus. Zu dessen Erzeugung wird ein einfacher Trinkhalm verwendet, durch den man Atemluft pustet. Indem man den Luftstrom systematisch über die verschiedenen Strömungserscheinungen hinwegführt, kommt man zu dem Ergebnis, dass nur der wabernde Wulst (in Abb. 3 mit einem Pfeil gekennzeichnet) empfindlich auf die Verformung durch den Luftstrom reagiert. Dies ist ein Indiz dafür, dass sich die für die Schwingungsanregung maßgeblichen Fließvorgänge vornehmlich in diesem Wulst abspielen.

3.2. Periodisch wiederkehrende Struktur

Um das Lochblech in eine Resonanzschwingung versetzen zu können, ist eine periodische Anregung in der zugehörigen Eigenfrequenz nötig. Es ist demnach davon auszugehen, dass zwischen dem Lochblech und dem daran stattfindenden Strömungsgeschehen Wechselwirkungen in Form von sich periodisch ändernden Kräften auftreten, deren Frequenz dieser Eigenfrequenz entspricht. Die sie hervorruhenden Fließvorgänge müssen daher ebenfalls periodisch sein und sich im Gleichtakt damit wiederholen.

3.3. Strömungsakustische Grundlagen

Wird mit einem langen dünnen Stab ein schneller Hieb durch die Luft ausgeführt, dann ist ein sogenannter „Hiebtton“ zu hören, dessen Frequenz umso größer ist, je schneller der Stab die Luft durchquert. Eine systematische Untersuchung dieses Phänomens erfolgte Ende des 19. Jahrhunderts durch Vincent Strouhal [6]. Er fand heraus, dass die Frequenz f des Tons proportional zur Geschwindigkeit v des Fahrtwindes und umgekehrt proportional zur Breite L der angeströmten Querschnittsfläche des Stabes ist. Mit Hilfe der heute als Strouhal-Zahl Sr bezeichneten Proportionalitätskonstante lässt sich dies wie folgt ausdrücken:

$$f = Sr \cdot \frac{v}{L} \quad \{1\}$$

Strouhal sprach in diesem Zusammenhang von „Reibungstönen“, wobei er über deren Entstehung nur vage Vermutungen anstellte.

Bewegt man einen Kreiszyylinder gleichförmig durch ein fluides Medium, ist die dafür benötigte Kraft im

Wesentlichen auf zwei Komponenten seines Strömungswiderstandes zurückzuführen. Um ihn zu überwinden ist Arbeit zu verrichten, die einerseits den Energieverlust kompensieren muss, den viskose Reibung in den randnahen Schichten verursacht. Da sich in einem bestimmten Geschwindigkeitsbereich hinter dem Zylinder eine sogenannte Kármánsche Wirbelstraße⁴ ausbildet, ist andererseits Arbeit zu verrichten, um die in den sich ablösenden Wirbeln verbleibende kinetische Energie aufzubringen.

Erfahrungsgemäß lösen sich die Wirbel nicht paarweise vom Kreiszyylinder ab, sondern alternierend. Dass dies so sein muss, geht aus Stabilitätsbetrachtungen hervor, die Theodore von Kármán zu Beginn des 20. Jahrhunderts angestellt hat [8]. Unter der Voraussetzung, dass auf ein gedachtes ortsfestes Kontrollvolumen, das den Zylinder einschließt, kein äußeres Drehmoment einwirkt, bleibt darin der Gesamtdrehimpuls zeitlich unverändert. Bildet sich nun am Zylinder ein neuer Wirbel aus, so überträgt ihm die dort vorherrschende Strömung einen Drehimpuls. Zugleich bildet sich als Kompensation eine Zirkulationsströmung um den Zylinder aus, die einen betragsmäßig gleichen, aber entgegengesetzt gerichteten Drehimpuls besitzt ([9], [10]).

Eine Überlagerung dieser Zirkulationsströmung mit der Hauptströmung führt zu Kräften, die vom Magnus-Effekt her bekannt sind. Hat die an der Seite des Zylinders vorbeistreichende Hauptströmung die gleiche Richtung wie die Zirkulationsströmung, liefert die Addition der Geschwindigkeiten der beiden Strömungen dort eine höhere Geschwindigkeit als auf der gegenüberliegenden Seite, weil dort das Vorzeichen der Geschwindigkeit der Zirkulationsströmung gerade umgekehrt ist. Entsprechend der Bernoulli-Gleichung herrscht daher quer zur Richtung der Hauptströmung eine Druckdifferenz am Zylinder, der zufolge die Summe der Kräfte auf die Wandung eine Querkraftkomponente aufweist.

Die in wechselnder Folge an beiden Seiten des Zylinders entstehenden Wirbel haben zueinander einen gegenläufigen Drehsinn, sodass sich, mit ihrer jeweiligen Entstehung einhergehend, die Umlaufrichtung der dadurch aufkommenden Zirkulationsströmung um den Zylinder ändert. Demzufolge ist die seitliche Wandung des Zylinders mit einem periodischen Wechseldruck beaufschlagt, dessen Frequenz mit der Ablösefrequenz der Wirbel übereinstimmt. Handelt es sich bei dem durchströmten Medium um Luft, so führt diese Druckfluktuation zu einer Schallabstrahlung. Ursache des Hiebtons ist demnach die alternierende Bildung von Wirbeln, weshalb deren Ablösefrequenz mit der des abgestrahlten Hiebtons übereinstimmt. Insofern eignet sich die Strouhal-Formel $\{1\}$ auch zur Berechnung dieser Ablösefrequenz.

Entsprechend dem am Zylinder auftretenden Wechseldruck lenkt ihn die daraus hervorgehende Wechselkraft, je nach Elastizität bzw. Art der Befestigung, quer zur Strömung periodisch aus. Im Fachjargon spricht man von „wirbelinduzierten Schwingungen“. Zu den im Alltag bei starkem Wind zu hörenden Hiebönen, wie dem „Singen“ von Überlandleitungen oder auch dem Pfeifen der Wanten eines Segelboots, liefern dabei auftretende wirbelinduzierte Schwingungen kaum einen Beitrag, weil ihre Amplitude dafür zu gering ist. Dies ändert sich aber, wenn sich die Ablösefrequenz der Wirbel einer Eigenfrequenz des umströmten Körpers nähert, weil sich dann vergleichsweise starke Resonanzschwingungen aufschaukeln. Auf diesen speziellen Fall ist die Konstruktion der Äolsharfe (bzw. Windharfe) ausgelegt, deren Saiten so gestimmt sind, dass sie bei einer bestimmten Windgeschwindigkeit in Resonanzschwingungen geraten [11]. Durch einen Resonanzkörper verstärkt, wird dann ein Klang hörbar. Weil aber im offenen Feld die Windgeschwindigkeit fluktuiert, müsste sich die nach $\{1\}$ berechnete Ablösefrequenz in gleichem Maße ändern, sodass eine Anregung in der Eigenfrequenz einer Saite immer nur für kurze Momente stattfinden würde. Nahe der Eigenfrequenz folgt die Ablösefrequenz aber nicht mehr der Strouhal-Formel, sie rastet vielmehr auf diesen festen Frequenzwert ein. Dieser als „lock in“ bezeichnete Effekt beruht auf einer Kopplung zwischen der Hauptströmung und der durch die Eigenbewegung der schwingenden Saite erzeugten Sekundärströmung ([12], [13]). Aufgrund dieses Effekts kann eine Äolsharfe einen dauerhaften Klang von sich geben, auch wenn die Windgeschwindigkeit dabei in einem gewissen Bereich fluktuiert.

Resonante wirbelinduzierte Schwingungen sind insbesondere im Bauwesen gefürchtet, da sie, wie das Beispiel der eingestürzten Tacoma-Narrows-Brücke gezeigt hat, große Schäden anrichten können. Ohne entsprechende Gegenmaßnahmen kann der Wind schlanke Bauwerke, wie röhrenförmige Schornsteine oder lange Laternenpfähle, über ihre Belastungsgrenze hinaus ins Wanken bringen.

3.4. Veranschaulichendes Analogmodell

Die eben angeführten Beispiele lassen die Leitidee aufkommen, dass der beim tönenden Teefilter bzw. Lochblech vorliegende Anregungsmechanismus ebenfalls auf einer alternierenden Wirbelablösung beruht. Ein entscheidender Prüfstein dieser Annahme besteht darin, die Existenz derartiger Wirbel nachzuweisen. Dass für einen direkten Nachweis schulische Mittel nicht ausreichen, wird am Beispiel des in Abb. 2 dargestellten Lochblechs deutlich, das einen Pfeifton mit der Frequenz von 600 Hz von sich gab. Entsprechend unserer Annahme muss die Ablösefrequenz der zur Anregung beitragenden Wirbel eben-

⁴ Deren Entstehungsweise wird beispielsweise in [7] erläutert.

falls 600 Hz betragen haben. Um sie direkt beobachten zu können, wäre daher ein enormer technischer Aufwand nötig, zumal sich die Vorgänge auf sehr kleinem Raum abspielen.

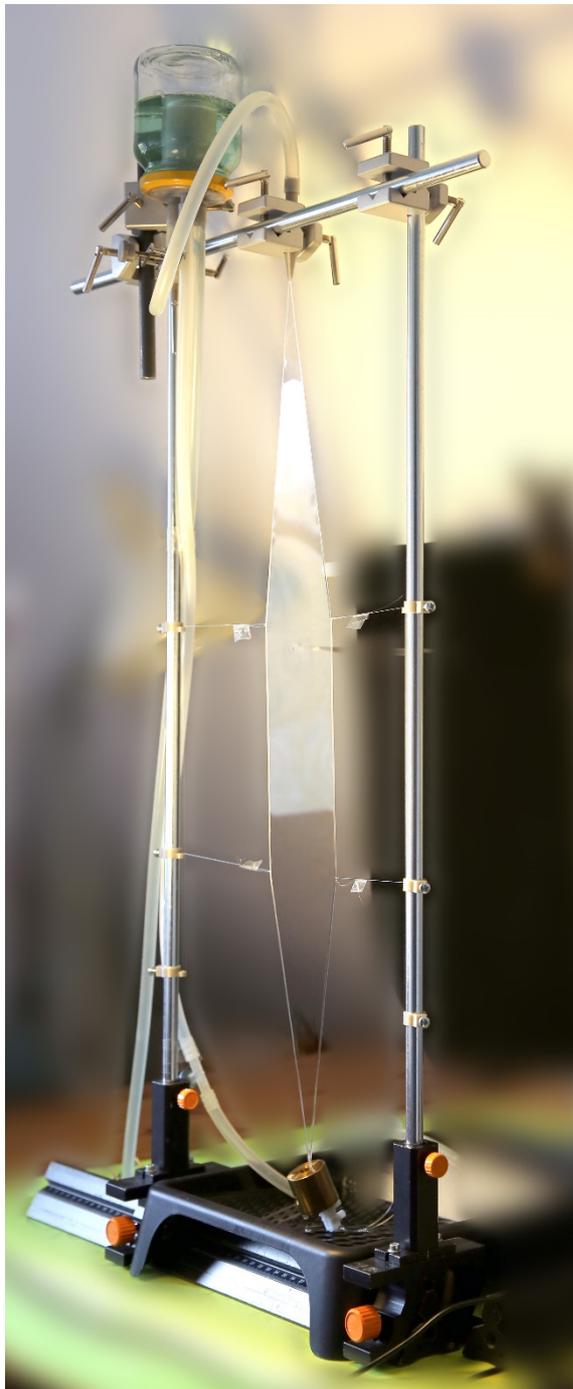


Abb. 4: Zur Untersuchung des Strömungsfeldes verwendeter Seifenfilmkanal. Sein Gerüst besteht aus gewöhnlichem Stativmaterial.

Eine in der Strömungsmechanik bewährte Methode, ähnlich gelagerte Beobachtungsprobleme zu umgehen, besteht in der Untersuchung analoger Modelle, die zum Beispiel im Windkanal vergleichbaren Strömungsverhältnissen ausgesetzt werden. Dementsprechend verfahren wir hier ebenso.

Wünschenswert ist ein analoges Modell des gelochten Blechs, dessen Abmessungen so groß sind, dass die daran stattfindenden Strömungsvorgänge mit bloßem Auge erfasst werden können. Um die Vergleichbarkeit zu wahren, sollte es sich bei dem strömenden Medium nach wie vor um Wasser handeln. Beide Anforderungen lassen sich mit einem sogenannten Seifenfilmkanal erfüllen. Ihn zu verwenden heißt, auf die Vollständigkeit eines dreidimensionalen Modells zu verzichten und sich mit einem zweidimensionalen Modell zu begnügen. Darin liegt allerdings auch der Vorteil, dass sich das auf eine Ebene reduzierte Strömungsgeschehen verhältnismäßig leicht beobachten lässt.



Abb. 5: Zapfen, der aus einem von oben nach unten fließenden Seifenfilm ragt. In seinem Nachlauf hat sich eine typische Wirbelstraße gebildet.

Der einschlägigen Fachliteratur ist zu entnehmen, dass Seifenfilmkanäle weltweit für unterschiedlichste strömungsmechanische Untersuchungen herangezogen werden. Wie ein für die hier beschriebenen Untersuchungszwecke geeigneter Seifenfilmkanal (vgl. Abb. 4) mit schulischen Mitteln hergestellt werden kann, wird im Anhang erläutert.

Als analoges Modell des gelochten Blechs dient eine Art Kamm mit sehr groben Zinken, die in gleichem Abstand (in unserem Fall 5 mm) wie rechteckige Zapfen herausstehen. Einen solchen Kamm kann man sich beispielsweise mit einem 3D-Drucker herstellen. Die in den Seifenfilm einzutauchenden Zapfen entsprechen dabei den Stegen, die bei einem geraden Schnitt durch ein Lochblech zwischen den Löchern stehen bleiben, wenn dieser durch die Mitte einer Lochreihe geführt wird.



Abb. 6: Aus einer Reihe von Zapfen bestehendes zweidimensionales Analogmodell eines Lochblechs, das von einem Seifenfilm durchströmt wird. An jedem Zapfen lösen sich alternierend Wirbel ab. Zeitlupenaufnahmen haben ergeben, dass diese Wirbelablösung untereinander synchronisiert ist.

Für einen Vorversuch wird noch ein einzelner Zapfen gleicher Größe benötigt, den man als Strömungskörper in den fließenden Seifenfilm taucht. Er wird so zur Strömungsrichtung orientiert, wie ursprünglich das Lochblech zur Richtung des Wasserstrahls. In Abb. 5 ist zu sehen, dass sich hinter dem Zapfen eine typische Wirbelstraße bildet, die durch eine alternierende Wirbelablösung zustande kommt. Diese Wirbelstraße war in unserem Versuch mit bloßem Auge nur verwischt erkennbar, weil die Strömungsgeschwindigkeit des Seifenfilms etwa 0,8 m/s und die zugehörige Ablösefrequenz etwa 60 Hz betragen haben. Durch Fotografieren mit kurzer Belichtungszeit wurde sie aber sichtbar.

Taucht man nun den Zapfen-Kamm in den strömenden Seifenfilm, entsteht hinter jedem einzelnen Zapfen eine Wirbelstraße, deren Form aufgrund der Wechselwirkung mit den eng benachbarten Wirbelstraßen verzerrt und zusammengedrängt ist. Abb. 6 zeigt, dass sich die Wirbelstraßen schon nach wenigen Zyklen turbulent vermischen.



Abb. 7: Schema der synchronisierten Wirbelablösung an einer gelochten Wandung. Gekoppelte Wirbelpaare des gleichen Entstehungszyklus sind gleichfarbig markiert.

Analog zum umströmten Zylinder ruft die an jedem Zapfen stattfindende alternierende Wirbelbildung eine Wechselkraft hervor, die quer zur Strömungsrichtung auf den Zapfen einwirkt. Auf das Gesamtgeschehen hätte dies wohl kaum Auswirkungen, wenn sich die Wirbel an den unterschiedlichen Zapfen zu unterschiedlichen Zeitpunkten bilden würden. Tatsächlich gibt es aber einen Verstärkungseffekt in dem Sinne, dass die Wirbelbildung untereinander synchronisiert ist, sodass die Summe der Kräfte, die auf die einzelnen Zapfen einwirken, zeitweise einen Betrag hat, der bedeutend größer ist als die jeweiligen Einzelbeträge. Auf diese Verhältnisse ließ die Analyse von Zeitlupen-Videos schließen, die vom Nachlauf hinter dem Kamm mit einer Bildrate von 500 Bilder/s angefertigt wurden. (Auch mit einigen heutzutage erhältliche Smartphones können solche Aufnahmen gemacht werden.)

Der Analyse nach erfolgt die Synchronisation vermittelt der zwischen benachbarten Zapfen hindurchtre-

tenden Strömung. Die hinter zwei benachbarten Zapfen liegenden wirbelbildenden Zonen stellen eine Verengung dar, durch die sich die Strömung hindurchzwängen muss. Die dabei an ihren beiden Rändern übertragenen Scherkräfte dienen der Drehbewegung in diesen Zonen als Antrieb. Nachdem die Strömung diese Engstelle durchlaufen hat, teilt sie sich in ein gegenläufiges Wirbelpaar auf, wodurch sich eine Fließstruktur ergibt, die einem Pilz ähnelt. (Einige solcher Fließstrukturen sind in Abb. 6 zu erkennen.) Zu dem Wirbelpaar, das in dieser beständigen Fließstruktur vereint wird, tragen beide wirbelbildenden Zonen mit jeweils einem davon abgelösten Wirbel bei. Diese Gemeinsamkeit koppelt die darin stattfindenden Vorgänge aneinander. Da sich eine vergleichbare Kopplung bei den in der übrigen Nachbarschaft liegenden Zapfen ergibt, laufen die Zyklen der daran stattfindenden Wirbelablösung nahezu phasengleich ab.



Abb. 8: Teesieb aus Edelstahl, das wie ein stumpfer Kegel geformt ist. Ein auf seine gelochte Mantelfläche auftreffender Wasserstrahl konnte dort sieben unterschiedliche Eigenfrequenzen separat anregen.

Anhand der am Analogmodell gewonnenen Einsichten vervollständigt sich nun die Modellvorstellung vom tönenden Lochblech bzw. Teefilter. Demnach ist zu vermuten, dass sich auf der Lee-Seite der gelochten Wandung ein Strömungsfeld ausbildet, das (wie in Abb. 7 schematisch dargestellt) von einer untereinander synchronisierten Wirbelablösung abstammt. Wenn die Ablösefrequenz nahe genug bei einer Eigenfrequenz der Wandung liegt, verursacht deren zunehmende Schwingungsbewegung eine Sekundärströmung, die dann (ähnlich wie bei der in 3.3 erwähnten Äolsharfe) zu einem „lock-in“ führt. Dieses Einrasten der Ablösefrequenz auf die Eigenfrequenz macht die Anregung zur Resonanzschwingung gegenüber leichten Fluktuationen der Aufprallgeschwindigkeit des Wasserstrahls unempfindlich. Aus diesem Grund kann sich die Schwingungsamplitude

dann so stark aufschaukeln, dass der dabei abgestrahlte Schall hörbar wird.

3.5. Erklärbare Tonstufen

Die Wandungen eines Teefilters können – je nach Bauart – eine Reihe unterschiedlicher Eigenfrequenzen aufweisen. Bei dem in Abb. 8 gezeigten Exemplar gelang es, sieben seiner Eigenfrequenzen mit einem auftreffenden Wasserstrahl separat anzuregen. Die Frequenzen der dabei abgestrahlten Töne lagen zwischen 1300 Hz und 1650 Hz.

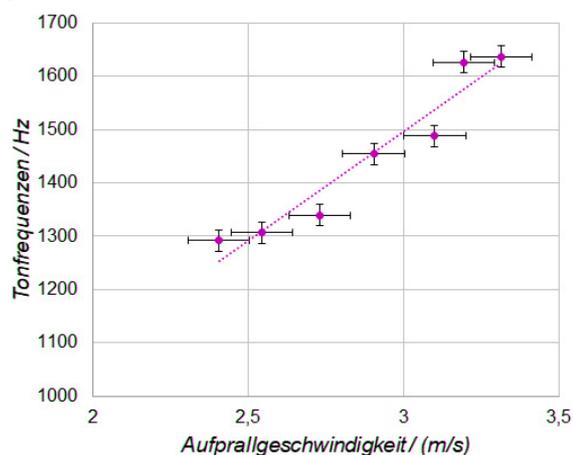


Abb. 9: Abhängigkeit der Frequenzen der Pfeiftöne von der Aufprallgeschwindigkeit des Wasserstrahls – für das in Abb. 8 gezeigte Teesieb.

Während einer kontinuierlichen Erhöhung der Aufprallgeschwindigkeit des Wasserstrahls, realisiert durch eine allmähliche Vergrößerung der Fallhöhe, nahm die Höhe des abgegebenen Pfeiftons stufenweise zu. (In den Übergangsbereichen waren die Töne weitgehend verstummt.) Abb. 9 gibt eine Auftragung der Wertepaare der Tonfrequenz und der zur Herstellung maximaler Lautstärke nötigen Aufprallgeschwindigkeit wieder. Würden der Modellannahme entsprechend wirbelinduzierte Schwingungen stattfinden, müsste die Lage der im Diagramm dargestellten Punkte mit Gleichung {1} vereinbar sein. Dementsprechend wäre zwischen ihnen ein linearer Zusammenhang zu erwarten, den als beste Näherung die eingefügte Regressionsgerade repräsentiert. Zur Berechnung der Strouhal-Zahl wurde deren Steigung zu 410m^{-1} bestimmt. Zusammen mit dem als charakteristische Länge L anzusehenden Durchmesser der Löcher im Teesieb von $0,5\text{mm}$, ergibt dies eine Strouhal-Zahl von $0,21$. Weil dieser Wert mit dem für die meisten Anwendungen verwendeten Wert gut übereinstimmt [15], liegt darin eine Bestätigung für die hier gemachten Modellannahmen. Dass bei dieser Versuchsvariante eine stufenartige Änderung des Pfeiftons festzustellen war, spricht außerdem für den vermuteten „lock in“ Effekt.

4. Literatur

- [1] URL: https://www.youtube.com/watch?v=t_sQ5PrRdk (Stand: 20. 10. 2020)
- [2] URL: https://www.youtube.com/watch?v=AMbkU_UDDI0 (Stand: 20. 10. 2020)
- [3] URL: <https://www.youtube.com/watch?v=ouZBN4WM5MU> (Stand: 20. 10. 2020)
- [4] Zeller, Peter (2018): Handbuch Fahrzeugakustik, Wiesbaden: Springer Vieweg
- [5] Chladni, Ernst Florens Friedrich (1787): Entdeckungen über die Theorie des Klanges, Leipzig: Weidmanns Erben und Reich
- [6] Strouhal, V. (1878): Über eine besondere Art der Tonerregung. In: Annalen der Physik, 241, (10), 216-251.
- [7] Demtröder, Wolfgang (2012): Experimentalphysik 1 – Mechanik und Wärme, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag
- [8] Kármán, Theodore von (1963): Aerodynamics, New York: McGraw-Hill Book Company, Inc.
- [9] Heckl, Manfred; Müller, Helmut A. (Hg.) (1994): Taschenbuch der technischen Akustik, Berlin: Springer
- [10] Etkin, B.; Korbacher, G. K.; Keefe, R. T. (1956): Acoustic Radiation from a Stationary Cylinder in a Fluid Stream. In: The Journal of the Acoustical Society of America, 28, 4, 776-776
- [11] Selfridge, R.; Moffat, D.; Reiss, J.; Avital, E. (2017): Real-time physical model of an Aeolian harp. In: Proceedings of the International Congress on Sound and Vibration, London
- [12] Zhang, W.; Li, X.; Ye, Z.; Jiang, Y. (2015): Mechanism of frequency lock-in in vortex-induced vibrations at low Reynolds numbers. In: Journal of Fluid Mechanics, 783, 72-102
- [13] Hucho, Wolf-Heinrich (2011): Aerodynamik der stumpfen Körper, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag
- [14] Rutgers, M. A.; Wu, X. L.; Daniel, W. B. (2001): Conducting fluid dynamics experiments with vertically falling soap films. In: Review of Scientific Instruments, 72, 7, 3025-3037
- [15] URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Strouhal-Zahl> (Stand: 20.10. 20)

Anhang:

Seifenfilmkanal mit schulischen Mitteln

Ein Seifenfilmkanal ist eine Apparatur, mit der sich ein kontrolliert fließender Seifenfilm herstellen lässt. Darin eingebrachte Körper beeinflussen die Strömungsgeschwindigkeit und damit die Dicke des Films. Die sich dadurch ändernden Interferenzfarben des Seifenfilms geben Auskunft über den Verlauf der Strömung.

Ein Seifenfilm realisiert in recht guter Näherung die Idealvorstellung von einer zweidimensionalen Flüssigkeit und eignet sich daher zur Untersuchung unterschiedlichster Probleme der zweidimensionalen Flüssigkeitsdynamik, für die sonst aufwendige numerische Computersimulationen nötig wären. Von daher werden Seifenfilmkanäle in der Wissenschaft als Analogrechner eingesetzt. Aufgrund ihrer einfachen Bauweise lassen sie sich weitgehend mit den Mitteln einer Physiksammlung erstellen. Zusätzlich erforderlich sind Bestandteile, die es entweder im Baumarkt gibt oder die man mit einem 3D-Drucker selbst herstellen kann.

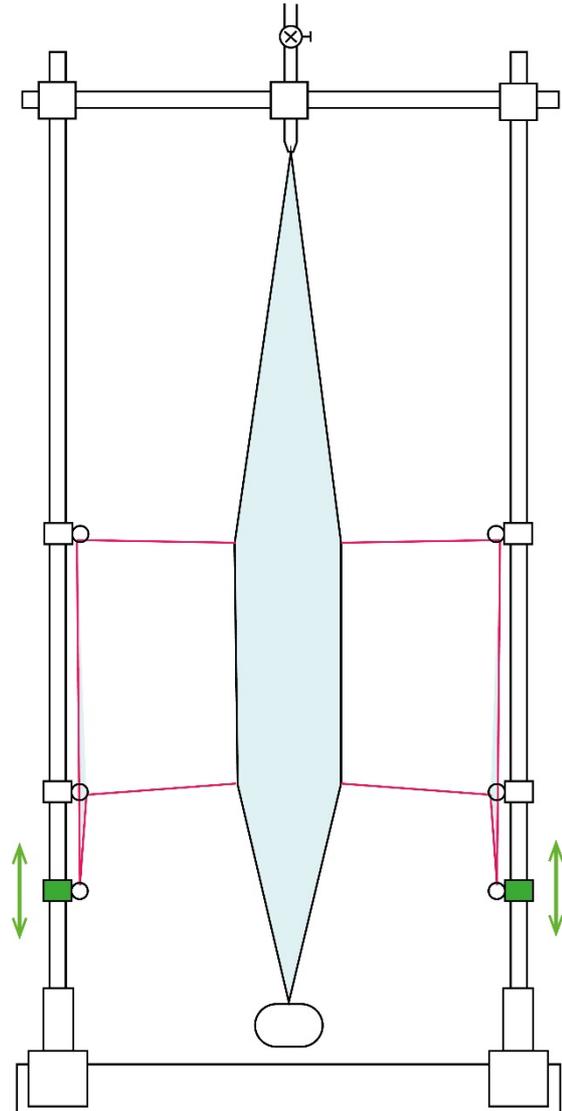


Abb. 10: Schematische Darstellung des in Abb. 4 gezeigten Seifenfilmkanals. Die Zugschnüre (rot) verlaufen auf beiden Seiten jeweils durch drei Ösen. Die untere Öse wird verschoben, um die Leitdrähte in die gewünschte Position zu bringen.

Das als Halterung des Seifenfilmkanals dienende Gerüst kann, wie Abb. 4 zeigt, mit Stativmaterial aufgebaut werden, wie es für die Mechanik und Optik verwendet wird. Zwei einfädige, etwa 0,5 bis 1 mm dicke Perlon- oder Nylonschnüre dienen als Leitdrähte,

zwischen denen der Seifenfilm aufgespannt wird. Als Eingang dient eine oben zu fixierende Düse, die man sich aus einem Mikro-Zentrifugenröhrchen herstellen kann, indem man den konisch zulaufenden Boden so weit abschneidet, dass eine Öffnung von ca. 1,5 mm Durchmesser entsteht. (Alternativ dazu kann man sich eine passende Düse mit dem 3D-Drucker herstellen, die man dann auch gleich mit einem Schlauchanschluss versehen sollte.) Die durch die Düsenöffnung geführten Leitdrähte sind innerhalb der Düse zu verankern, wofür darin beispielsweise ein Stift eingeklemmt wird. Am unteren Ende werden beide Leitdrähte durch eine Lüsterklemme gefädelt und mit deren Klemmschrauben fixiert. Um die Leitdrähte in der Vertikale straff zu halten, wird an die Klemme ein Gewicht von etwa 250 Gramm gehängt.

Beide Leitdrähte sollten nach diesem Aufbau zueinander parallel und lotrecht verlaufen. In dieser Position wird später die Seifenlösung an ihnen herablaufen, sodass ein verbindender Flüssigkeitsüberzug entsteht. Um den Seifenfilm aufzuspannen, werden die Leitdrähte mittels sehr dünner Zugschnüre voneinander separiert, bis sie einen Abstand von etwa 7 cm haben. Für die Zugschnüre kann man beispielsweise transparenten Nähfaden (aus Nylon) verwenden. Gelegentlich kommt es vor, dass der Seifenfilm reißt. Um ihn schnell wieder aufspannen zu können, sollten die Zugschnüre nach dem in Abb. 10 dargestellten Schema angebracht werden. Dadurch ergibt sich ein einfacher Mechanismus, mit dem sich die Leitdrähte von einer lotrechten in eine ausgelenkte Position (und zurück) bringen lassen.

Die Zugschnüre an den Leitdrähten anzubringen, verlangt eine bestimmte Technik, die in [14] veranschaulicht wird. Rutgers et al. gehen dort aber auch auf

viele andere Einzelheiten ein, die zum erfolgreichen Bau und Betrieb eines Seifenfilmkanals beitragen. Ein großer Teil der Fragen, die dieser Anhang offen lässt, werden dort sehr ausführlich und fachkundig beantwortet.

Die einfachste Art, die Seifenlösung zuzuführen, besteht darin, sie in einem Vorratsgefäß unterzubringen, das oberhalb der Düse gelegen ist. Führt man die Seifenlösung von dort mit einem Schlauch zur Düse, muss man zur Steuerung des Zuflusses entweder ein Schraubventil zwischenschalten oder auf den Schlauch eine leichtgängige Schlauchklemme setzen. Mit dem sinkenden Flüssigkeitspegel im Vorratsgefäß sinkt allerdings auch der Druck und somit die Fließgeschwindigkeit des Seifenfilms. Will man diese konstant halten, bedarf es einer Pumpe, die die Seifenlösung aus dem unten befindlichen Auffangbecken in ein Vorratsgefäß pumpt, das einen Überlauf hat, durch den überschüssige Seifenlösung wieder ins Auffangbecken zurückfließt.

Entscheidend für die Sichtbarkeit der Interferenzfarben des Seifenfilms, die das Strömungsmuster kenntlich machen, ist die Beleuchtung. Erforderlich ist eine ausgedehnte, diffuse Lichtquelle von gleichmäßiger Helligkeit, deren Spektrum möglichst diskret ist. Diese lässt sich beispielsweise mit einem durchscheinenden Schirm realisieren, den man entweder mit einer Natrium-Dampf Lampe oder einer Leuchtstofflampe von hinten beleuchtet. Spiegelt sich die Vorderseite des Schirms im Seifenfilm, macht dies den Strömungsverlauf darin erkennbar.