

# Surfing the hydraulic jump

Wettbewerb Schüler experimentieren

Jan. 2022

Betreuer: [REDACTED]

<sup>1</sup>phaenovum Schülerforschungszentrum Lörrach-Dreiländereck

<sup>2</sup>Hebel-Gymnasium Lörrach

<sup>3</sup>Hans-Thoma-Gymnasium Lörrach



# Inhaltsverzeichnis

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                                   | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Theorie</b>                                      | <b>1</b>  |
| 2.1      | Archimedisches Prinzip . . . . .                    | 1         |
| 2.2      | Hydraulischer Sprung . . . . .                      | 1         |
| 2.3      | Die nicht untergehende Scheibe . . . . .            | 2         |
| <b>3</b> | <b>Versuchsaufbau und technische Details</b>        | <b>3</b>  |
| 3.1      | Herstellung der Scheiben . . . . .                  | 3         |
| 3.2      | Versuchsaufbau . . . . .                            | 4         |
| 3.3      | Herstellung der Fadenkonstruktion . . . . .         | 5         |
| 3.4      | Umlenkung . . . . .                                 | 5         |
| 3.5      | Technische Geräte und Programme . . . . .           | 7         |
| <b>4</b> | <b>Ergebnisse</b>                                   | <b>7</b>  |
| 4.1      | Der hydraulische Sprung . . . . .                   | 7         |
| 4.2      | Verschiedene Scheiben . . . . .                     | 7         |
| 4.3      | Messung der Auftriebskraft . . . . .                | 9         |
| 4.4      | Auftriebskraft bei verschiedenen Scheiben . . . . . | 10        |
| <b>5</b> | <b>Zusammenfassung und Ergebnisdiskussion</b>       | <b>11</b> |
| <b>6</b> | <b>Literatur</b>                                    | <b>12</b> |
| <b>7</b> | <b>Danksagung</b>                                   | <b>12</b> |

# 1 Einleitung

Eine Scheibe aus Metall versinkt normalerweise in Wasser. Wenn man nun auch noch von oben auf die Scheibe drückt, sollte man denken, dass die Scheibe erst recht untergeht. Überraschenderweise stellt sich aber heraus, dass, wenn man einen Wasserstrahl von oben auf die Scheibe schießt, diese an der Wasseroberfläche schwimmt (siehe Titelbild). In diesem Projekt sind wir der Frage nachgegangen, warum die Scheibe nicht untergeht. Außerdem haben wir erforscht, welche Parameter die Schwimmfähigkeit der Scheibe beeinflussen, und auf welche Weise.

## 2 Theorie

### 2.1 Archimedisches Prinzip

Das archimedische Prinzip besagt, dass der Auftrieb eines Körpers genauso groß ist, wie die Gewichtskraft des vom Körper verdrängten Mediums. Es können sogar Schiffe, die aus Stahl gebaut sind, schwimmen. Der Auftrieb eines Schiffs ist so groß wie die Gewichtskraft des Wassers, das durch das Schiff verdrängt wird. Aber die Dichte von Stahl ist deutlich größer als die von Wasser. Warum können Schiffe trotzdem schwimmen? Dies liegt daran, dass der entscheidende Faktor die mittlere Dichte ist. Die mittlere Dichte ist die Dichte des gesamten Körpers, also auch inklusive die der Luft in dem Schiff. Diese mittlere Dichte muss kleiner als die von Wasser sein, damit das Schiff schwimmt.

Der Auftrieb eines Objektes wird erhöht, wenn es mehr Wasser verdrängt, denn je tiefer ein Objekt in eine Flüssigkeit abtaucht, desto höher ist der Druck an der Unterseite des Objekts.

Stellen wir uns einen Quader unter Wasser vor. Da die Unterseite des Quaders tiefer im Wasser (weiter unten) ist, ist dort auch der Druck, der auf die Unterseite des Quaders wirkt, größer als der Druck, der auf die Oberseite des Quaders wirkt. Dadurch entsteht ein Auftrieb. Solange der Auftrieb größer als die auf den Quader wirkende Gewichtskraft ist, steigt das Objekt auf (siehe [1] , S. 452f).

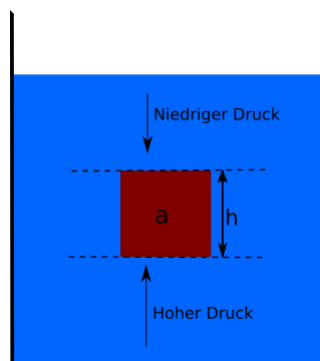


Abb. 1. Archimedisches Prinzip (Skizze selbst erstellt)

In Abbildung 1 ist der Körper  $a$  ein Würfel mit der Höhe  $h$ . Da er ein Würfel ist, hat er ein Volumen von  $h^3$ . Laut dem Archimedischen Prinzip hat er somit einen Auftrieb, der der Gewichtskraft von Wasser für ein Volumen von  $h^3$  entspricht.

### 2.2 Hydraulischer Sprung

Wenn man Wasser in eine Küchenspüle einlaufen lässt, kann man etwas interessantes beobachten. Am Boden der Spüle bildet sich ein ringförmiger Wall (siehe Abb. 2). Dieser Wall heißt hydraulischer Sprung (hydraulic jump). Man kann erkennen, dass das Wasser im inneren Bereich schneller fließt als hinter dem hydraulischen Sprung. Im inneren Bereich ist die Wasserhöhe flacher als im äußeren Bereich. Der hydraulische Sprung entsteht, weil das Wasser im inneren Bereich langsam an Geschwindigkeit verliert.

Wenn das Wasser eine bestimmte Geschwindigkeit unterschreitet, wirbelt es auf. Diese Aufwirbelung ist der hydraulische Sprung.



Abb. 2. Hydraulischer Sprung in einer Küchenspüle (eigenes Bild)

### 2.3 Die nicht untergehende Scheibe

Man kann den hydraulischen Sprung auch beobachten, wenn man eine Metallscheibe mit einer Delle in der Mitte in einen Wassercontainer legt und mit einem Wasserstrahl die Scheibe von oben trifft. Überraschenderweise geht die Scheibe nicht unter (siehe Skizze 3). Der hydraulische Sprung entsteht meistens am Rand der Scheibe. Im inneren Bereich zwischen dem Aufprallpunkt des Wasserstrahls und dem hydraulischen Sprung fließt das Wasser flach und schnell von der Mitte nach außen. Dabei verliert das Wasser langsam an Geschwindigkeit, bis es eine bestimmte Geschwindigkeit erreicht hat, dann aufwirbelt und den hydraulischen Sprung bildet. Der hydraulische Sprung ist ringförmig um den Mittelpunkt der Scheibe und ist die Grenze zwischen dem inneren Bereich, in dem das Wasser flach und schnell fließt, und dem äußeren Bereich, in dem das Wasser langsamer fließt und höher ist.

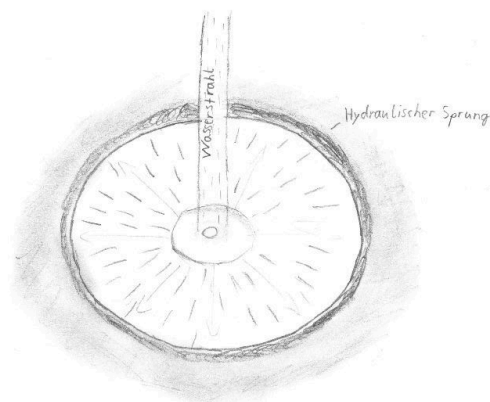


Abb. 3. Skizze einer nicht untergehenden Scheibe inklusive hydraulischen Sprunges

Aber warum geht die Scheibe nicht unter? Wenn der Wasserstrahl die Scheibe trifft, drückt er diese nach unten. Da sich auf der Scheibe nur eine flache Strömung von Wasser befindet, wird von der Scheibe viel Wasser verdrängt. Laut dem archimedischen Gesetz bekommt die Scheibe so Auftrieb. Auf die Scheibe wirken vier Kräfte (siehe Skizze 4). Die Kräfte, die „gegen“ die Scheibe wirken (die Kräfte, die die Scheibe untergehen lassen würden) sind die eigene Gewichtskraft der Scheibe (auf der Skizze  $mg$ ), der atmosphärische Druck von oben auf die Scheibe (in der Skizze  $F_0$ ) und die Kraft des Wasserstrahls, der von oben auf die Scheibe prasselt (in der Skizze  $F_1$ ). Gegen all diese Kräfte wirkt nur der Auftrieb (in der Skizze  $F$ ), der durch den Wasserdruck an der Unterseite der Scheibe verursacht wird (archimedisches Prinzip). Damit die Scheibe schwimmt muss der Auftrieb die anderen drei Kräfte ausgleichen.

$$F = F_1 + F_0 + mg \quad (1)$$

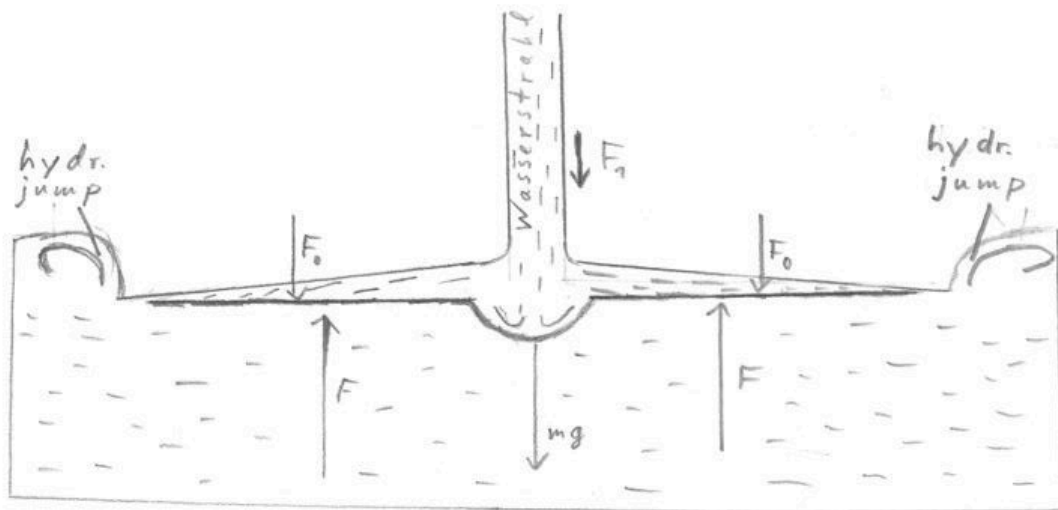


Abb. 4. Skizze der Kräfte, die auf eine nicht untergehende Scheibe wirken

Dies kann selbst bei einem ziemlich starken Wasserstrahl funktionieren. Denn wenn ein starker Wasserstrahl die Scheibe trifft, wird diese nur tiefer gedrückt und verdrängt somit mehr Wasser. Nach dem archimedischen Prinzip erhöht dies den Auftrieb der Scheibe, und sie geht weiterhin nicht unter. Man kann sich die schwimmende Scheibe wie ein Schiff vorstellen, mit dem hydraulischen Sprung als Seitenwände, die das Wasser nicht über der Scheibe einbrechen lassen.

### 3 Versuchsaufbau und technische Details

#### 3.1 Herstellung der Scheiben

Wir haben die Scheiben aus drei verschiedenen Aluminiumblechen hergestellt, die sich nur in der Dicke unterschieden haben. Die Bleche hatten eine Dicke von 0,3 mm, 0,5 mm und 0,8 mm. Dann standen wir vor der Herausforderung, wie wir die Aluminiumbleche in Form schneiden sollen. Zuerst haben wir versucht, die dünnen Bleche mit einer normalen Schere zu schneiden. Dies hat auch bei den dünneren Blechen funktioniert, bei den dickeren war aber die Schere stumpf und musste wieder geschärft werden. Deshalb haben wir versucht, die Scheiben mit einer Laubsäge auszuschneiden. Dies hat auch gut funk-

tioniert, dauerte aber zu lange, wenn man mehrere Scheiben haben wollte. Schlussendlich wurden die angezeichneten Scheiben mit einer Stichsäge von unserem Betreuer ausgesägt.

Um die Delle in der Scheibenmitte zu formen, haben wir die Scheibe mittig auf ein Hohlrohr des gewünschten Durchmessers gelegt und zum Beispiel mit einem Hammer in die Mitte der Scheibe geschlagen, bis die gewünschte Tiefe der Delle erreicht wurde. Bei manchen Scheiben haben wir ein Loch in die Mitte gemacht. Dafür haben wir die Scheibe mit Schraubzwingen befestigt und mit einem Bohrer der gewünschten Größe ein Loch durch die Scheibe gebohrt.

### 3.2 Versuchsaufbau

Für unseren Versuchsaufbau haben wir zwei Silikonschläuche an eine Wasserpumpe angeschlossen. Die Pumpe ist die „Pumpe mit Kunststoffgehäuse Art.-Nr. 2202 “ der Firma Wolcraft. An diese haben wir einen leistungsstarken Motor angeschlossen. Die Pumpe haben wir mit zwei Schrauben auf ein Holzbrett geschraubt. Der Motor war etwas zu hoch über dem Brett, weswegen wir Pappe von 6mm Dicke unter den Motor gelegt haben. Unsere Pumpe mit Motor kann man auch auf dem Bild unseres Versuchsaufbaus sehen (siehe Abb. 5).

Der Schlauch für den Wasserzulauf zur Pumpe hängt in ein großes Wasserbecken, auf der gleichen Höhe, wie die Pumpe. In diesem Wasserbecken treffen wir auch die Scheiben mit dem Wasserstrahl. Den zweiten Schlauch haben wir mithilfe eines Laborstativs erhöht und senkrecht auf das selbe große Wasserbecken gerichtet, damit die Scheiben immer senkrecht von oben vom Wasserstrahl getroffen werden. Somit ist dies auch ein geschlossener Wasserkreislauf.

Außerdem haben wir einen Kraftmesser (siehe Abschnitt 3.5) verwendet, um herauszufinden, wie stark man an der Scheibe von unten ziehen kann, bevor sie untergeht. Dafür haben wir Fäden an drei Punkten der Scheibe befestigt. Die Befestigungspunkte sind um  $120^\circ$  zum Mittelpunkt der Scheibe versetzt, somit wirkt die Zugkraft gleichmäßig auf die Scheibe. Die drei Fäden verbinden sich zu einem Faden (siehe Abschnitt 3.3). Diesen Faden haben wir am Boden des Wasserbeckens mithilfe eines Metallstabs, der in einem Kugellager befestigt ist und sich genau unter dem Wasserstrahl befindet, umgelenkt und einen Kraftmesser am Ende des Fadens befestigt (siehe Abschnitt 3.4). An diesem konnten wir ziehen und somit die Kraft messen, mit der man die Scheibe nach unten ziehen kann, bevor sie untergeht. Abbildung 5 zeigt unseren Versuchsaufbau.



Abb. 5. Unser Versuchsaufbau



### 3.3 Herstellung der Fadenkonstruktion

Um die Fadenkonstruktion anzubringen, haben wir an jeder Scheibe drei Befestigungen gebaut. Eine dieser Befestigungen besteht aus zwei kleinen Löchern nebeneinander und einem Faden, der durch die zwei Löcher geht und unten eine Schlaufe bildet. Die Befestigungen befinden sich um jeweils  $120^\circ$  versetzt am Rand der Scheibe, damit die Kraft gleichmäßig auf die Scheibe verteilt ist. An diese Befestigungen haben wir dann drei Fäden mit kleinen Haken aus Draht gehängt. Diese drei Fäden haben wir unter der Scheibe zusammengeführt und zu einem Faden verknotet (siehe Abb. 6). Diesen Faden haben wir über die Umlenkrolle am Boden des Beckens umgelenkt und außerhalb des Wassers an einen Kraftsensor gehängt.

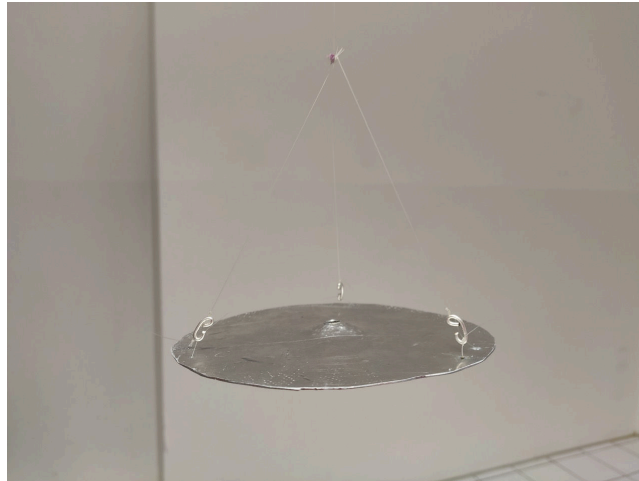


Abb. 6. Befestigungen des Fadens an der Scheibe

### 3.4 Umlenkung

Da wir mit unserem Kraftmesser nicht unter Wasser arbeiten können, brauchten wir eine Umlenkung für den Faden am Boden des Wasserbeckens. Die Umlenkung sollte so wenig Reibung wie möglich haben, damit die Kraft, mit der wir über den Kraftmesser am Faden ziehen, auch an der Scheibe ankommt. Unsere erste Konstruktion war ein einfacher Metallstab, der ein paar Zentimeter über dem Grund des Wasserbeckens befestigt war.

Um zu testen, ob diese Umlenk-Konstruktion brauchbar ist, haben wir mit zwei Kraftmessern die Reibung gemessen. (siehe Abb. 8)

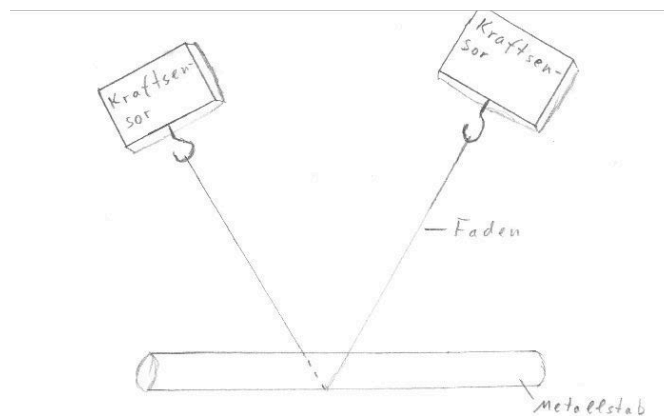


Abb. 7. Aufbau für den Reibungstest

Dies taten wir mit einem Faden, der an der Metallstange umgelenkt wurde. An den beiden Enden des Fadens haben wir die Kraftmesser befestigt (siehe Abb. 7). Hätte die Konstruktion keine Reibung, würde die Kraft, mit der man am einen Ende des Fadens mit dem einen Kraftmesser zieht, auch am anderen Ende des Fadens und somit am anderen Kraftmesser ankommen. Dies hat jedoch sehr schlecht funktioniert, weswegen wir uns entschlossen haben, andere Konstruktionen auszuprobieren. Schlussendlich war die Konstruktion mit der geringsten Reibung eine dünne Metallstange, die sich in einem Kugellager frei drehen konnte (siehe Abb. 9).

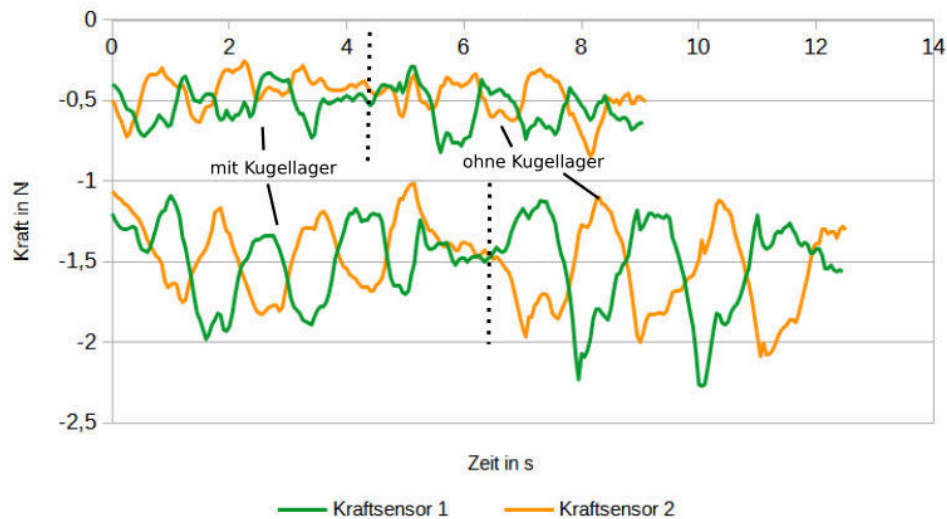


Abb. 8. Reibungstest zu Umlenk-Konstruktionen: Metallstab mit und ohne Kugellager

Mit den beiden Konstruktionen haben wir einen Reibungstest durchgeführt (siehe Abbildung 8). Vor den gestrichelten Linien wurde die Reibung für den Metallstab im Kugellager gemessen, nach den gestrichelten Linien haben wir den Metallstab festgehalten, sodass er sich nicht mehr im Kugellager drehen kann. Man kann erkennen, dass das Kugellager zwar definitiv geholfen hat, aber immer noch sehr viel Reibung besteht. Bei einer Zugkraft um die 0,5 N „verliert“ man etwa 0,25 N, bei einer Zugkraft um 1,5 N verliert man etwa 0,5 N.

Wir haben das Kugellager mit einer 3D-gedruckten Halterung und zwei Schrauben an einem Holzbrett am Boden des Wasserbeckens befestigt. Dieses Holzbrett haben wir dann beschwert, damit es am Boden des Beckens bleibt und sich nicht bewegt. Die Schnur wurde dann am Metallstab umgelenkt. Diese Konstruktion kann man in der folgenden Abbildung sehen.

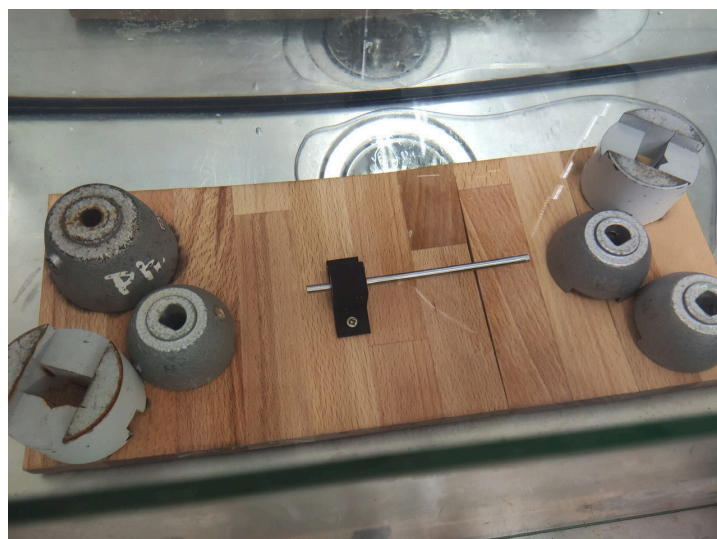


Abb. 9. Umlenkung des Fadens per Metallstab mit Kugellager am Boden des Wasserbeckens



### 3.5 Technische Geräte und Programme

Als Kraftsensoren haben wir den „Wireless Force Accelaration Sensor PS-3202“ und den „PASPORT Force Sensor PS-2104“, verwendet. Beide sind Produkte der Firma PASCO. Mit diesen Kraftsensoren kann man nicht nur einfach die Kraft messen, wie bei einem einfachen Federkraftmesser, sondern man kann auch Kraft-Zeit-Diagramme aufnehmen.

Aufgenommen haben wir die Daten mit der App „SPARKvue“. Dann haben wir die Daten als csv-Datei (comma seperated values) in „LibreOffice Calc“ importiert. Dort haben wir dann die nötigen Diagramme erstellt und mit den Programmen „GIMP (GNU image manipulation program)“ und „Inkscape“ nachbearbeitet.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Der hydraulische Sprung

Wenn man den Versuch mit einer geeigneten Scheibe und einem geeigneten Wasserstrahl durchführt, fällt ein schnell ein Wall von Wasser auf, der sich kreisförmig um die Scheibe bildet. Dieser Wall heißt hydraulischer Sprung (siehe Theoriekapitel, 2.2).

Abbildung 12 zeigt eines unserer Fotos der schwimmenden Scheibe und des sich bildenden hydraulischen Sprungs. Man sieht, dass sich das Wasser vom Aufprallpunkt des Wasserstrahls in der Scheibenmitte schnell linear nach außen über die Scheibenfläche ausbreitet. Am Rand der Scheibe wirbelt das Wasser auf und wird turbulent. Dabei entsteht eine Wall (der hydraulische Sprung). Der innere Bereich zwischen dem hydraulischen Sprung und dem Aufprallpunkt des Wasserstrahls ist tiefer gelegen, als der äußere Bereich „hinter“ dem hydraulischen Sprung.

Der hydraulische Sprung kann sich bei großflächigen Scheiben auch bereits auf der Scheibe bilden (siehe Abb. 11). Dies liegt daran, dass sich der Hydraulische Sprung bildet, wenn das Wasser eine bestimmte „kritische“ Geschwindigkeit unterschreitet. Wenn das Wasser auf der Scheibe schon so stark abgebremst wurde, dass es diese Geschwindigkeit erreicht hat, bildet sich der Hydraulische Sprung dann schon auf der Scheibe.

Bei Verringerung der Wasserstrahlstärke zieht sich der kreisförmige hydraulische Sprung immer enger um den Mittelpunkt der Scheibe zusammen. Wir haben beobachtet, dass die Scheibe untergeht, wenn der hydraulische Sprung den Mittelpunkt der Scheibe erreicht hat. Deshalb stellten wir die Vermutung auf, dass nur der hydraulische Sprung dafür verantwortlich ist, dass die Scheibe nicht untergeht.

### 4.2 Verschiedene Scheiben

#### 4.2.1 Form

Die von uns am häufigsten genutzte Scheibenform ist ein Kreis. Wir haben aber auch andere Formen ausprobiert, wie zum Beispiel ein Quadrat (siehe Abb. 10, Scheibe [3]). Auch dieses hielt sich ohne Probleme über Wasser. Interessant war, dass der hydraulische Sprung nun quadratisch an den Seiten des Quadrats vorhanden war.

#### 4.2.2 Dicke

Wir haben die Dicke der Scheibe variiert. Wir haben 0,3 mm, 0,5 mm und 0,8 mm dicke Scheiben ausgeschnitten und gemessen, wie stark man an diesen von unten ziehen kann, bevor sie untergehen. Bei Scheiben mit einer größeren Dicke wurde weniger Zugkraft benötigt, bis diese untergeht. Dies ist naheliegend, da zu der nach unten gerichteten Zugkraft noch die Gewichtskraft der Scheibe hinzukommt, und die Gewichtskraft der dickeren Scheibe höher ist.

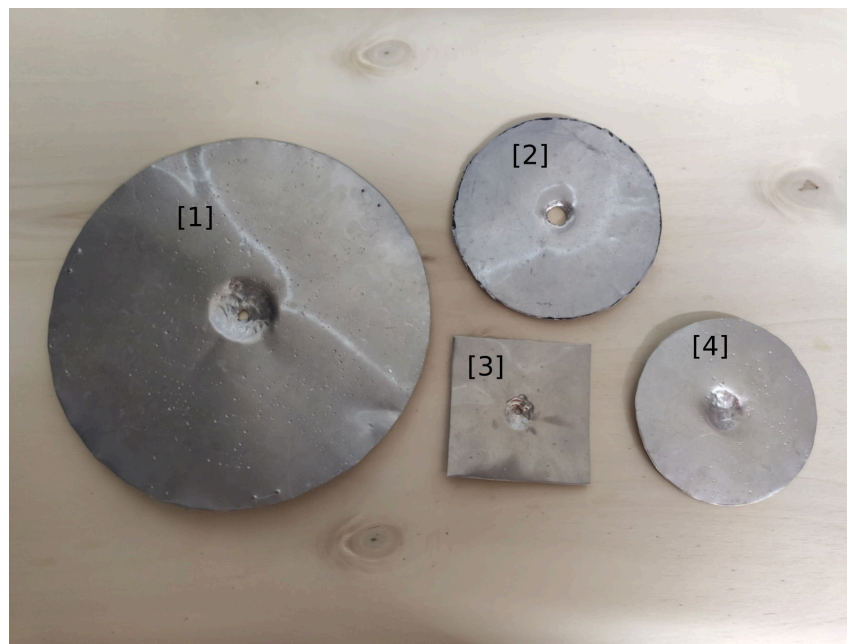


Abb. 10. Verschieden Scheiben

#### 4.2.3 Durchmesser

In unseren Versuchen spielte der Scheibendurchmesser keine direkte Rolle für die Schwimmfähigkeit der Scheibe, sondern nur ihr Gewicht.

Bei einer sehr großen Scheibe (zum Beispiel mit einem Durchmesser von 24,5 cm, siehe Abb. 10, Scheibe [1]) kann sich der hydraulische Sprung schon innerhalb der Scheibe bilden (siehe Abb. 11 und die Erklärung in Abschnitt 4.1).

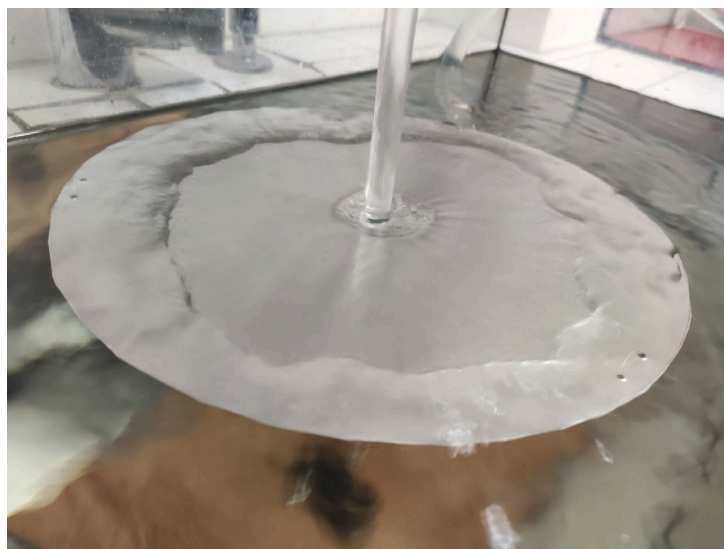


Abb. 11. Der hydraulische Sprung bildet sich hier schon auf der Scheibe.

Falls eine kleine Scheibe (zum Beispiel 35 mm Durchmesser) unter einen sehr starken Wasserstrahl gelegt wird, geht sie direkt unter. Nach einer Reduktion der Wasserstrahlstärke schwimmt die Scheibe aber wieder.

#### 4.2.4 Lochdurchmesser

In den Quellen, in denen wir die nicht untergehende Scheibe kennengelernt haben (Youtube-Video: [3], Artikel: [2]), wird immer ein Loch in die Scheibenmitte gebohrt. Wir haben uns gefragt, welchen Einfluss der Durchmesser dieses Loches auf den Auftrieb hat. Ein Loch, das einen größeren Durchmesser als der Wasserstrahl hat, funktioniert nicht, da das Wasser nicht auf die Scheibe trifft. Eine Scheibe, deren Loch zu groß ist, ist in Abb. 10 gezeigt (Scheibe [2]).

Solange der Durchmesser des Loches kleiner als der Durchmesser des Wasserstrahls ist, kann die Scheibe schwimmen. Die Scheibe schwimmt sogar, wenn gar kein Loch vorhanden ist (siehe Abb. 12)! Die Scheibe [4] in Abb. 10 ist eine Scheibe ohne Loch (aber mit Delle).



Abb. 12. Die Scheibe schwimmt auch ohne Loch.

#### 4.2.5 Vertiefung in der Mitte

Die Vertiefung in der Mitte (Delle) ist für die Stabilisierung der Scheibe unter dem Wasserstrahl wichtig. Sie bewirkt, dass die Scheibe nicht seitlich weggedrückt wird, sondern immer zentral unter dem Wasserstrahl bleibt.

Abgesehen davon haben wir keine Auswirkung der Delle auf das Schwimmen der Scheibe feststellen können, solange die Delle vorhanden ist. Der Durchmesser und die Tiefe der Delle nehmen keinen Einfluss auf die Schwimmfähigkeit der Scheibe. Hätte man keine Delle, müsste man die Scheibe immer wieder zurückstoßen oder mit dem Wasserstrahl der Scheibe folgen.

### 4.3 Messung der Auftriebskraft

Wir wollten herausfinden, wie stark der Auftrieb ist, der auf die Scheibe wirkt. Dafür haben wir gemessen, mit welcher Kraft man an der Scheibe nach unten ziehen kann, bevor sie untergeht. Wir vermuteten, dass der Auftrieb bei einem stärkeren Wasserstrahl größer ist. Außerdem sollte eine schwere Scheibe früher untergehen.

Um die Scheibe mit einer messbaren Kraft nach unten zu ziehen, haben wir zunächst eine Fadenkonstruktion entwickelt, die an der Scheibe befestigt ist (siehe Abschnitt 3.3). Da man mit dem Kraftmesser schlecht unter Wasser arbeiten kann, benötigten wir des weiteren eine Konstruktion am Boden des Wasserbeckens, mit der man den Faden umlenken kann (siehe Abschnitt 3.4). An dem umgelenkten Faden haben wir dann mit einem Kraftsensor gezogen und Kraft-Zeit-Diagramme aufgenommen (siehe Abschnitt 3.5).

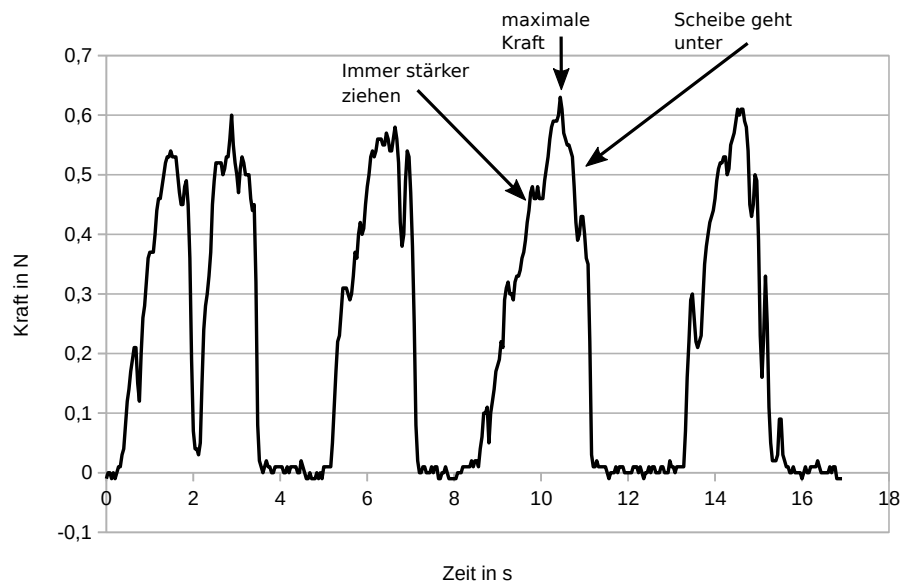


Abb. 13. Kraft-Zeit-Diagramm: Die Scheibe wird immer stärker nach unten gezogen, bis sie untergeht. Die Scheibe hatte einen Durchmesser von 7 cm, eine Dicke von 0,3 mm und wurde mit 60% Wasserstrahlstärke getroffen.

Abbildung 13 zeigt ein solches Kraft-Zeit-Diagramm. Über den Kraftsensor haben wir die Scheibe immer stärker nach unten gezogen, bis sie untergegangen ist. Man sieht, dass die Scheibe hier bei einer Kraft von 0,6 N untergeht. Bei späteren Messungen haben wir langsamer und vorsichtiger die Zugkraft erhöht und herausgefunden, dass diese Scheibe auch bereits bei 0,5 N untergeht. Diese Abbildung dient lediglich als Beispiel, wie so ein Kraft-Zeit-Diagramm aussieht und wie wir es auswerten.

#### 4.4 Auftriebskraft bei verschiedenen Scheiben

Wir haben Messung wie in Abbildung 13 für zwei verschiedene Scheibendicken und dann jeweils für zwei verschiedene Wasserstrahlstärken durchgeführt. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse gezeigt.

| Wasser-<br>stärke | Dicke  | Durch-<br>messer | Zug-<br>kraft | Reibung<br>(geschätzt) | Gewichts-<br>kraft | Zugkraft – Reibung<br>= effektive Zugkraft | effektive Zugkraft<br>+ Gewichtskraft |
|-------------------|--------|------------------|---------------|------------------------|--------------------|--|---------------------------------------|
| 100%              | 0,3 mm | 70 mm            | 0,8 N         | 0,35 N                 | 0,12 N             | 0,45 N                                     | 0,57 N                                |
| 60%               | 0,3 mm | 70 mm            | 0,5 N         | 0,25 N                 | 0,12 N             | 0,25 N                                     | 0,37 N                                |
| 100%              | 0,8 mm | 70 mm            | 0,6 N         | 0,25 N                 | 0,35 N             | 0,35 N                                     | 0,7 N                                 |
| 60%               | 0,8 mm | 70 mm            | 0,3 N         | 0,2 N                  | 0,35 N             | 0,1 N                                      | 0,45 N                                |

Tab. 1. Scheibenparameter, und ab welcher Kraft die Scheiben untergehen.

Da in unseren Experimenten trotz der kugelgelagerten Umlenkung nicht die volle gemessene Kraft an der Scheibe ankommt (siehe Abschnitt 3.4), haben wir abgeschätzt, wie groß der Kraftverlust aufgrund der Reibung ist (Tabellenspalte „Reibung (geschätzt)“). Aus unseren Messungen (siehe Abschnitt 3.4) wussten wir, dass man bei einer gemessenen Kraft von 0,5 N etwa 0,25 N verliert, bei einer gemessenen Kraft von 1,5 N etwa 0,5 N. Entsprechend haben wir z.B. bei einer gemessenen Kraft von 0,8 N den Verlust auf 0,35 N geschätzt usw.

Die Spalte „Zugkraft – Reibung = effektive Zugkraft“ zeigt die geschätzte Zugkraft, die tatsächlich an der Scheibe ankommt. Zu dieser haben wir in der letzten Spalte die Gewichtskraft der Scheibe addiert, da beide Kräfte zusammen die Scheibe nach unten ziehen.

Wie wir vermutet hatten, geht eine schwerere Scheibe schneller unter (Vergleich in der Tabelle: 1. und 3. Zeile, 2. und 4. Zeile). Außerdem hat sich bestätigt, dass bei einem stärkeren Wasserstrahl auch der Auftrieb größer ist (Vergleich in der Tabelle: 1. und 2. Zeile, 3. und 4. Zeile).

## 5 Zusammenfassung und Ergebnisdiskussion

In unseren Versuchen hatte die Form der Scheibe keine besondere Auswirkung, quadratische und kreisförmige Scheiben mit verschiedenen Durchmessern sind alle gut geschwommen.

Der Durchmesser der Scheibe spielte ebenfalls keine besondere Rolle. Durch den Durchmesser wird vor allem das Gewicht und somit die Gewichtskraft verändert. Nur wenn die Scheibe sehr klein ist, geht sie bei zu starker Wasserstrahlstärke unter.

Eine Bedeutung des Loches in der Scheibenmitte konnten wir nicht nachweisen, obwohl dies im Artikel [2] und im Youtube-Video [3] wichtig erscheint. Eine Scheibe ohne Loch ist bei uns genauso geschwommen. Wenn natürlich der Durchmesser des Loches größer, als der des Wasserstrahles war, ist die Scheibe nicht geschwommen.

Die Vertiefung in der Mitte (Delle) hat nach unseren Tests keine Bedeutung für die Auftriebskraft oder Schwimmfähigkeit. Sie bewirkt nach unseren Erkenntnissen nur, dass die Scheibe immer zentriert unter dem Wasserstrahl positioniert bleibt und nicht von diesem seitlich weggedrückt wird.

Als wir untersucht haben, wie stark man von unten an der Scheibe ziehen kann, bis diese untergeht, spielte die Scheibendicke eine Rolle. Je dicker die Scheibe, bei gleicher Wasserstrahlstärke, desto weniger stark kann man von unten an der Scheibe ziehen, bis sie untergeht. Dies liegt aber nicht daran, dass die archimedische Auftriebskraft sich verändert (durch die veränderte Dicke ändert sich diese nur sehr, sehr wenig), sondern daran, dass die Gewichtskraft der Scheibe größer ist.

Bei gleicher Wasserstrahlstärke und gleichem Scheibendurchmesser vermuteten wir, dass die Dicke der Scheibe eigentlich keine Rolle spielt, außer, dass man die Gewichtskraft der Scheibe zur Zugkraft nach unten addieren muss. Dies ergab für uns Sinn, da man, wenn man an der Scheibe zieht, sie eigentlich nur „beschwert“.

Somit sollte bei gleicher Wasserstrahlstärke die effektive Zugkraft plus die Gewichtskraft irgendeiner Scheibe immer dasselbe ergeben. In unseren Messungen hat sich dies auch einigermaßen bestätigt. In Tabelle 1 sieht man, dass die Werte der letzten Spalte bei 100% Wasserstrahlstärke für die 0,3 mm und 0,8 mm dicke Scheibe (Zeilen 1 und 3) halbwegs übereinstimmen (0,57 N und 0,7 N), ebenso für 60% Wasserstrahlstärke (Zeilen 2 und 4): 0,37 N und 0,45 N. Wir glauben, dass die Ungenauigkeit der nicht genau zu bestimmenden Reibung der Umlenkkonstruktion zuzuschreiben ist. Hier sollte man versuchen, eine bessere Umlenkung zu bauen, damit die Reibung die Messung möglichst nicht mehr beeinflusst.

Bei stärkerem Wasserstrahl auf der gleichen Scheibe muss man stärker von unten an der Scheibe ziehen, damit diese untergeht. Wir überlegten, ob die Wasserstärke vielleicht proportional zur benötigten Kraft ist, bis die Scheibe untergeht.

Für 100% Wasserstrahlstärke ist der Mittelwert von effektiver Zugkraft + Gewichtskraft gleich  $\frac{0,57\text{ N} + 0,7\text{ N}}{2} = 0,64\text{ N}$ . Bei 60% Wasserstrahlstärke ergibt sich 0,41 N, was 64% von 0,64 N ist, unsere Vermutung könnte also stimmen.

Um dem Phänomen der nicht untergehenden Scheibe weiter auf den Grund zu gehen, könnte man eine Formel zur Bestimmung des Auftriebs der Scheibe aufstellen. Dann könnten wir unsere Messergebnisse mit der Formel vergleichen. Vielleicht könnten wir damit schon im Voraus berechnen, ob eine Scheibe schwimmen wird oder nicht.

Durch weiteres Testen verschiedener Scheibendurchmesser könnten wir herausfinden, ob der Durchmesser (abgesehen von der Gewichtskraft auf die Scheibe) eine Rolle spielt.

Man könnte auch Düsen für den Wasserausgang bauen (3D-Drucker) und anbringen, um die Flussgeschwindigkeit bei gleicher Flussmenge zu verändern.

## 6 Literatur

- [1] Douglas C. Giancoli. *Physik Lehr und Übungsbuch*. Pearson, 2010.
- [2] A. Luzin. “An Unsinkable Disk (Hands on hydraulics)”. In: *Quantum* Sep/Okt (1999).
- [3] Youtube. *Unsinkable disc*. URL: [https://www.youtube.com/watch?v=eP5\\_9eUjfkI](https://www.youtube.com/watch?v=eP5_9eUjfkI). (aufgerufen: 8.1.2022).

## 7 Danksagung

An dieser Stelle möchten wir uns bei all denjenigen bedanken, die uns bei unserer Projektarbeit unterstützt haben.

Besonderer Dank gilt [REDACTED], der unser Projekt betreut hat, uns bei Problemen immer zur Seite stand und uns beim Erarbeiten der Inhalte unterstützt hat. Außerdem möchten wir Herrn Scheppach für das Korrekturlesen unserer Arbeit danken.

Großer Dank gilt außerdem [REDACTED], der uns unter anderem bei technischen Fragen geholfen hat, uns Rat bei Konstruktionen gab, sowie unsere Arbeit korrekturgelesen hat.