



Ein tropischer Wirbelsturm 920 Km nördlich von Hawaii (Quelle: [9], S. 99)

Spielt der geographische Ort eine Rolle bei der Dreh- richtung von Strudeln?

Wettbewerb „Jugend Forscht“ 1999

Karl Friedrich Dobberahn (16 Jahre)

**Arbeitsgemeinschaft „Jugend Forscht“
des Christian-Gymnasiums Hermannsburg**

Leitung: StD Thomas Biedermann



Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	3
1.1	Andere Länder, andere Sitten ...	3
1.2	Zufall oder nicht?	3
2.	Theoretische Grundlagen	3
2.1	Die Erde dreht sich ...	4
2.2	... deshalb drehen sich Luftmassen	4
2.3	Feuer, Erde, Wasser, Luft ...	5
2.4	Der „Sturm im Wasserglas“?	5
3.	Experimentelle Überprüfung	5
3.1	Der Versuchsaufbau	5
3.2	Die Versuche	6
3.2.1	Drehrichtung eines beim Abfließen entstehenden Strudels	6
3.2.2	Einfluss der Anfangsbewegung	7
3.2.3	Veränderung der Durchflussmenge durch einen Strudel	7
3.2.4	Krümmung der Oberfläche bei stationären Strudeln	8
3.2.5	Geschwindigkeit eines Objektes auf der Wasseroberfläche	9
3.2.6	Welche Kräfte wirken auf ein Teilchen auf der Wasseroberfläche?	9
4.	Fazit	11
5.	Anhang	12
5.1	Danksagung	12
5.2	Literatur	12



1. Einleitung

Sicherlich haben Sie schon tausende von Malen gesehen, wie das Wasser aus einem Waschbecken, einer Dusche oder einer Badewanne abläuft. Häufig kommt es dabei vor, dass das Wasser nicht einfach nur so herausläuft, sondern gleichzeitig sich so in Drehung versetzt, dass ein Strudel entsteht. Und nun kommt die Preisfrage: In welcher Richtung drehen sich diese Strudel?

Fragt man einen Erdkundelehrer oder einen Physiklehrer, so erhält man nach einer kurzen Denkpause häufig zur Antwort: „Natürlich gegen den Uhrzeigersinn - wegen der Corioliskraft!“. Stimmt das?

1.1 Andere Länder, andere Sitten ...

Bis zu meinem elften Lebensjahr lebte ich in Brasilien, was bekanntlich in der südlichen Hemisphäre liegt, und da sollen sich die Strudel angeblich anders herum drehen. Meine Erinnerung lässt mich da leider im Stich, ich muss zugeben, dass ich damals nicht so sehr darauf geachtet habe. Aber nun wollte ich es genauer wissen. Als ich von der Arbeitsgemeinschaft „Jugend Forscht“ an unserer Schule hörte, dachte ich mir, dass das ein geeignetes Thema für eine Arbeit wäre, zumal ich nun in der nördlichen Hemisphäre vielleicht Beobachtungen machen könnte, die sich dann auf Brasilien übertragen lassen, falls ich da mal wieder hin kommen sollte.

1.2 Zufall oder nicht?

Meine Beobachtungen an Waschbecken, Badewannen und bei anderen Gelegenheiten ließen keine Systematik erkennen, aus der ich schließen konnte, ob meine Lehrer Recht haben oder nicht. Irgendwie hatte ich den Eindruck, dass z.B. die Form des Behälters oder eine anfangs schon vorhandene Bewegung des Wassers eine Rolle spielen könnte. Andererseits sieht man beim Wetterbericht, dass sich ein Hochdruckgebiet immer im Uhrzeigersinn, ein Tiefdruckgebiet - das wegen seiner Strömungsrichtung am ehesten einem ablaufenden Strudel ähnelt - gegen den Uhrzeigersinn dreht. Und auf der Südhalbkugel der Erde ist es genau anders herum. Also doch kein Zufall?

2. Theoretische Grundlagen

Als ich begann, über dieses Phänomen in der Literatur Informationen zu sammeln, stieß ich immer wieder auf den Begriff „Corioliskraft“, den ich schon in meiner Einleitung erwähnt habe. In [1] heisst es dazu:

„Die (...) Corioliskraft ist eine besondere Kraft, die auf jeden Körper, der sich auf der Erdoberfläche bewegt, wirkt. Ihre Größe ist allerdings (...) klein im Verhältnis zur Schwerkraft.“

Um genauere Aussagen über diese Kraft machen zu können, habe ich Physikbücher zu Rate gezogen. Darin wurde deutlich, dass diese Kraft nur dann auftritt, wenn die im Zitat erwähnte Bewegung in einem *rotierenden* System stattfindet. Z.B. heißt es in [2]:

„Die Coriolis-Kraft existiert nur für einen mit dem Bezugssystem mitrotierenden Beobachter. Für einen fest stehenden Beobachter tritt sie nicht auf.“



Sie führt dazu, dass ein Gegenstand, der auf einem drehenden Körper geworfen wird, in Bezug auf den Körper scheinbar eine gekrümmte Bahn verfolgt, während ein Beobachter, der sich nicht mitdreht, eine gerade Linie sieht.

Wie man sieht, treffen hier zwei Disziplinen zusammen: in der Geographie versucht man, die Bewegungen von Luft- und Wassermassen zu beschreiben und stellt unversehens fest, dass man dazu Erkenntnisse aus der Physik benötigt. Insofern ist meine Arbeit der Geophysik zuzuordnen.

2.1 Die Erde dreht sich ...

In meinem Fall ist der sich drehende Körper die Erdkugel. Sie dreht sich vom Nordpol aus gesehen gegen den Uhrzeigersinn in 24 Stunden einmal um ihre Achse. Diese Drehgeschwindigkeit nennt man die Winkelgeschwindigkeit ω , sie beträgt also $360^\circ/24\text{h}$ oder $0,00417^\circ/\text{s}$.

Nimmt man einen beliebigen Punkt auf der Erdoberfläche, so bewegt sich dieser mit einer bestimmten Geschwindigkeit, die man als Tangentialgeschwindigkeit v bezeichnet. Sie hängt außerdem vom Breitengrad ab, auf dem man sich befindet. Am geographischen Nordpol (90° nördlicher Breite) ist diese Geschwindigkeit 0, am Äquator (0° nördlicher Breite) beträgt sie 1667 km/h bzw. 463 m/s . Hier in Celle befinden wir uns an $52^\circ 37' 22''$ nördlicher Breite [3], hier beträgt die Bahngeschwindigkeit immerhin schon 281 m/s .

Wirft man nun einen Gegenstand genau längs eines Längengrades, also z.B. von Norden nach Süden, nimmt er die Tangentialgeschwindigkeit mit, die er an seinem Abwurfpunkt hatte. Je weiter er nach Süden kommt, desto schneller dreht sich aber der Erdboden unter ihm seitlich weg, so dass er scheinbar gleichzeitig nach Westen hin abgelenkt wird. Verfolgt man seine Bahn über der Erdoberfläche, so ergibt sich eine Kurve statt einer eigentlich zu erwartenden geraden Linie.

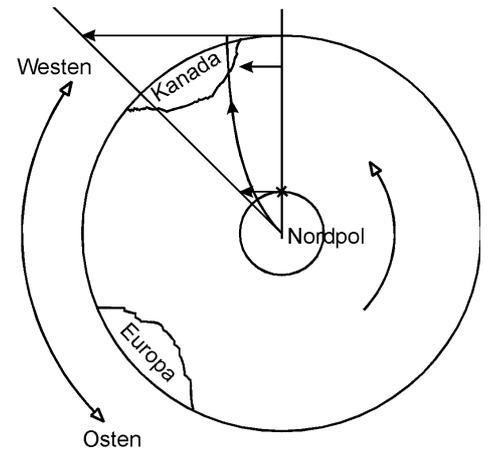


Abb. 1: Auswirkungen der Corioliskraft

2.2 ... deshalb drehen sich Luftmassen

Handelt es sich bei dem geworfenen Gegenstand nicht um einen Ball oder ähnliches, sondern betrachtet man die Luftmassen der Atmosphäre, so gilt für diese das selbe: Wenn Luft von Norden nach Süden strömt, so wird sie gleichzeitig durch die Corioliskraft in westlicher Richtung abgelenkt. Auf dem Erdboden bewegt sich die Luft also sowohl in südlicher Richtung als auch scheinbar in westlicher Richtung, es weht ein Wind. Insgesamt beginnt

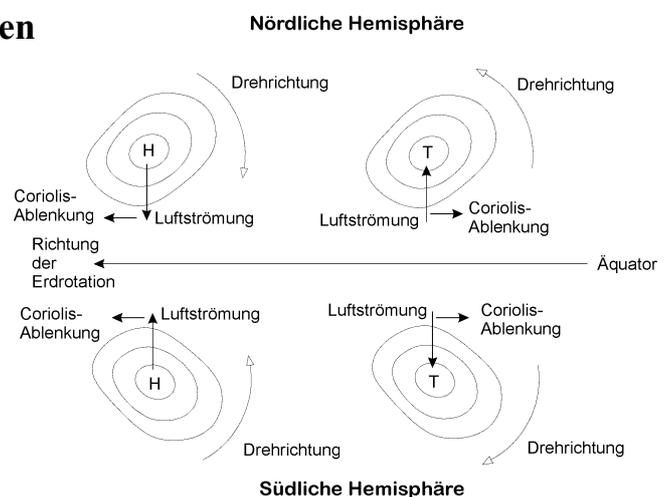


Abb. 2: Auswirkungen der Corioliskraft auf Hoch- und Tiefdruckgebiete in den beiden Hemisphären



dabei aber die gesamte Luftmasse zu rotieren. In einem Hochdruckgebiet (Antizyklone) strömen die Luftmassen aus dem Kern nach unten und außen ab, auf der nördlichen Halbkugel führt das dazu, dass das gesamte Hochdruckgebiet sich in Uhrzeigerichtung zu drehen beginnt. Auf der südlichen Halbkugel ist das genau umgekehrt: hier drehen sie sich gegen den Uhrzeigersinn [4]. Bei Tiefdruckgebieten (Zyklone) ist die Luftströmung umgekehrt: im Innern ist sie nach oben gerichtet und die Luftmassen strömen nach innen zum Kern des Tiefdruckgebietes. Die Coriolis-Kraft bewirkt hier eine Drehung gegen den Uhrzeigersinn. Auf der Südhalbkugel ist die Drehung wieder genau entgegengesetzt.

2.3 Feuer, Erde, Wasser, Luft ...

Was ich hier für die Luftmassen gesagt habe, gilt entsprechend auch für die Wassermassen der Ozeane. Auch dort bilden sich Wirbel [5], die sich auf der Nordhalbkugel mit dem Uhrzeigersinn drehen (Golfstrom im Atlantik, Kuro-Schio im Pazifik) und auf der Südhalbkugel gegen den Uhrzeigersinn (Humboldtstrom im Südpazifik, Brasilstrom in Südatlantik, Westaustralstrom im Indischen Ozean). Damit verhalten sich die Wasserströmungen wie Hochdruckgebiete. Man kann sich das so vorstellen, als würden im Inneren die Wassermassen aufsteigen und aus den Zentren der Ozeane zu den Kontinentalküsten hin strömen. Ursache dafür könnte sein, dass z.B. über dem mittelatlantischen Rücken durch die dünnere Erdkruste mehr Wärme an das Wasser abgegeben wird als im Bereich der Kontinentalschelfe [6]. Das führt dazu, dass das Wasser aufsteigt und nach „außen“ hin abfließt. Solche Rücken finden sich außer im Nord-Pazifik auch in allen anderen Ozeanen, dort übernimmt eventuell der Hawaii-Rücken diese Funktion.

2.4 Der „Sturm im Wasserglas“?

Die Klimaforscher hätten bestimmt etwas dagegen, würde ich mit den Wasser- oder Luftwirbeln unserer Erde herumexperimentieren. Schon ein so kleines Wirbelphänomen wie der El Niño zeigt von Zeit zu Zeit die verheerenden Auswirkungen von der Norm abweichender Verhältnisse.

Um die Entstehung von Wirbeln dennoch näher untersuchen zu können, habe ich mich für einen deutlich kleineren Maßstab entschieden. So verwende ich ein rundes Gefäß von ca. 120 l Inhalt, was normalerweise zum Anrühren von Mörtel benutzt wird, um darin Wirbel zu erzeugen. Da sich Luftwirbel nur sehr schlecht nachverfolgen lassen, beschränke ich mich außerdem auf die Untersuchung von Wasserströmungen, da ich denke, dass sich die Ergebnisse übertragen lassen.

3. Experimentelle Überprüfung

3.1 Der Versuchsaufbau

Auf einem Gerüst ist der Behälter auf einer Holzplatte befestigt, die auf zwei Böcken aufliegt. Genau in der Mitte des Kübels ist ein handelsüblicher Waschbeckenauslauf eingesetzt, aus dem alle den Durchlauf behindernden Teile entfernt wurden. Unter dem Auslauf befindet sich ein Kugelhahn, um die Durchflussmenge einstellen zu können, die pro Zeiteinheit durchläuft.

Ein zweiter gleichgroßer Behälter steht zwischen den Böcken genau unter dem ersten und dient als Auffangbecken für das auslaufende Wasser.



Um das Wasser in den oberen Behälter zurückpumpen oder einen stationären Wasserdurchlauf erzielen zu können, ist eine Pumpe vorgesehen. Durch mit Schnellverschlüssen versehene Schläuche kann die Pumpe jeweils so angeschlossen werden, dass sie je nach Versuch verschiedene Funktionen erfüllen kann. Zur Steuerung der Durchflussgeschwindigkeit ist die Pumpe an einem Regeltrenntrafo angeschlossen (vergl. Abb. 3).

Eine einfache Messvorrichtung erlaubt die Bestimmung der Krümmung der Oberfläche bei stationären Wirbeln sowie reproduzierbare Einsetzpunkte von Probekörpern. Zur Bestimmung von Umlauf- oder Ablaufzeiten steht eine digitale Stoppuhr mit einer Auflösung von 1/100 Sekunde zur Verfügung.

Um den Strudelverlauf aufzeichnen zu können, ist eine Kamera vorgesehen. Sie ist auf einen Spiegel ausgerichtet, der so geneigt ist, dass die Kamerablickrichtung mit der senkrechten Mittelachse des Behälters übereinstimmt. Außerdem kann man so in einen entstehenden Strudel hineinschauen, ohne mit einer Leiter auf die Apparatur steigen zu müssen.

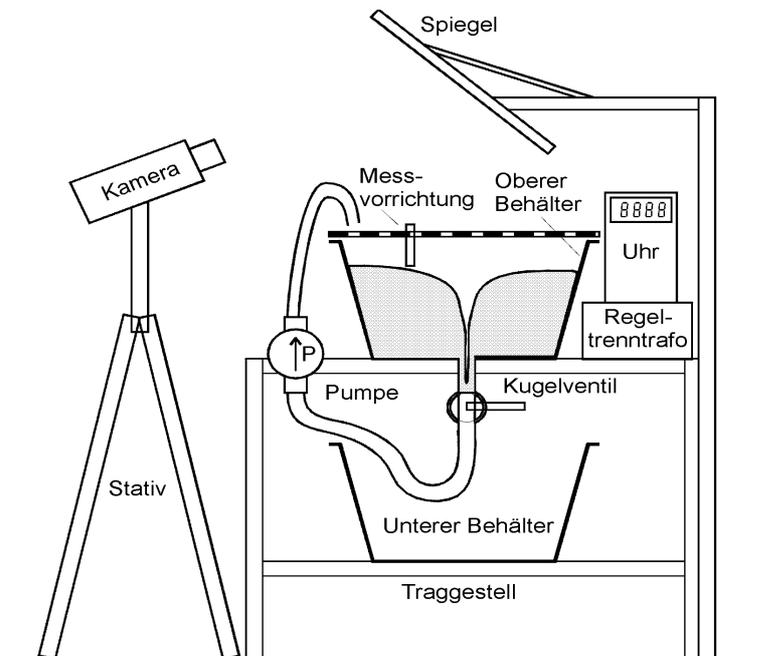


Abb. 3: Versuchsaufbau (Dargestellt ist die Anordnung zur Erzeugung stationärer Strudel)

3.2 Die Versuche

3.2.1 Drehrichtung eines beim Abfließen entstehenden Strudels

In der ersten Versuchsreihe wollte ich feststellen, ob sich jedesmal beim Abfließen des Wassers aus dem Behälter ein Strudel entwickelt.

Dazu habe ich das Wasser (73,5 l) aus dem unteren Behälter durch den Abfluss nach oben gepumpt. Dieser umständlich erscheinende Weg erwies sich deswegen als vorteilhaft, weil das Wasser sich anschließend schnell beruhigte und keine nennenswerte Anfangsbewegung mehr aufwies. Vorversuche, bei denen ich das Wasser mit einem Schlauch zurückpumpte, hatten ergeben, dass dabei eine Rotation des Wassers entstand, die das Ergebnis stark verfälschte.

Nachdem das Wasser sich beruhigt hatte, entfernte ich den Pumpenschlauch vom Abfluss und öffnete das Kugelventil. Beim Abfließen beobachtete ich, ob sich ein Wirbel ausbildet und in welcher Richtung er sich dreht.



Die Auswertung von 41 Durchläufen ergab folgendes Ergebnis:

12 mal entsteht ein schwacher linksdrehender Wirbel

20 mal entsteht ein schwacher rechtsdrehender Wirbel

8 mal entsteht gar kein Wirbel

In einem Fall begann sich ein linksdrehender Wirbel auszubilden, der aber kurz vor Ende des Auslaufens seine Drehrichtung änderte.

In allen Fällen bildeten sich die Wirbel erst sehr spät, außerdem waren sie nur sehr schwach ausgebildet, in einigen Fällen war die Drehrichtung nur sehr schlecht festzustellen.

Das Ergebnis dieses Versuches entspricht eigentlich nicht der Voraussage, dass die Wirbel immer links herum - also gegen den Uhrzeigersinn - drehen müssten. Die Zahlen sind aber nicht eindeutig genug zur Bestätigung oder Widerlegung dieser Aussage, dafür hätte ich erheblich mehr Messungen machen müssen.

Da in einigen Fällen überhaupt kein Wirbel zu erkennen war, nehme ich an, dass zu Beginn der Tests noch zu viel Eigenbewegung im Wasser war, als dass die Auswirkungen der Coriolis-Kraft eindeutige Ergebnisse liefern konnten.

Dies bestätigt meine nächste Versuchsanordnung.

3.2.2 Einfluss der Anfangsbewegung

Hierzu benutzte ich die gleiche Versuchsanordnung wie im ersten Versuch, aber vor dem Öffnen des Ventils versetzte ich mit einem Brett das Wasser gezielt in eine Rotation im bzw. gegen den Uhrzeigersinn. Diesen Versuch führte ich 10 mal aus.

In beiden Fällen entstand bereits nach wenigen Sekunden ein sehr stark ausgeprägter Wirbel mit der vorgegebenen Drehrichtung. Zusätzlich konnte ich ein Schwanken der Wasseroberfläche beobachten, das zum Ende stark zunahm und eine um den Strudel herumlaufende Wasserwelle bildete.

Dieser Versuch bestätigt meine Vermutung, dass die Anfangsbewegung einen sehr großen Einfluss auf den Strudel hat und somit für das Versagen des ersten Experimentes verantwortlich sein kann.

3.2.3 Veränderung der Durchflussmenge durch einen Strudel

Bei dem letzten Versuch fiel mir auf, dass es *mit* einem Strudel deutlich länger dauerte, bis das ganze Wasser abgelaufen ist als *ohne* Strudel. Um diese Vermutung zu überprüfen, stoppte ich bei sonst unveränderter Versuchsanordnung die Zeit vom Beginn des Auslaufens bis zur vollständigen Leerung des Behälters. Es ergaben sich folgende Werte (Mittelwerte aus je 5 Messungen):

93 s bei rechts drehenden Strudeln

84 s bei links drehenden Strudeln

49 s ohne Bildung eines Strudels



Damit läuft das Wasser bei Ausbildung eines Strudels fast halb so schnell aus dem Behälter! Für diese Beobachtung gibt es eine einfache Erklärung: Beim Auslaufen „fällt“ das Wasser im Prinzip senkrecht durch den Querschnitt des Ablaufrohres nach unten. Bildet sich ein Strudel aus, so entsteht innerhalb dieser Wassersäule ein luftgefüllter Raum, der den Querschnitt verringert. Also dauert es entsprechend länger, bis das Wasser abgelaufen ist.

Andererseits zeigen die Zahlen auch, dass mit einem rechtsdrehenden Strudel eine noch längere Zeit verbunden ist als mit einem linksdrehenden, anscheinend ist dieser noch etwas stärker ausgeprägt. Vergleicht man das mit dem Ergebnis aus dem ersten Versuch, scheint meine Anordnung eine Vorliebe für rechtsdrehende Wirbel zu haben, was vielleicht doch durch Unsymmetrien im Abflussrohr hervorgerufen werden könnte.

3.2.4 Krümmung der Oberfläche bei stationären Strudeln

Wenn sich ein Wirbel ausbildet, so verändert sich auch die Oberfläche des Wassers: sie ist nicht mehr flach, sondern weist eine Krümmung auf, die zum Zentrum des Wirbels immer größer wird. Um diese Oberflächenkrümmung näher zu untersuchen, brauchte ich einen stationären Wirbel. Die bisher erzeugten Wirbel waren nicht geeignet, da sie zu kurzlebig waren und durch das Auslaufen des Wassers sich der Wasserspiegel dauernd änderte.

Hierzu schloss ich die Pumpe direkt an den Ablauf des oberen Behälters an und pumpte das Wasser über einen schräg eingehängten Schlauch sofort zurück. Durch die Drehzahl der Pumpe konnte ich in weiten Grenzen die Stärke des Strudels bestimmen und über eine beliebig lange Zeit konstant halten.

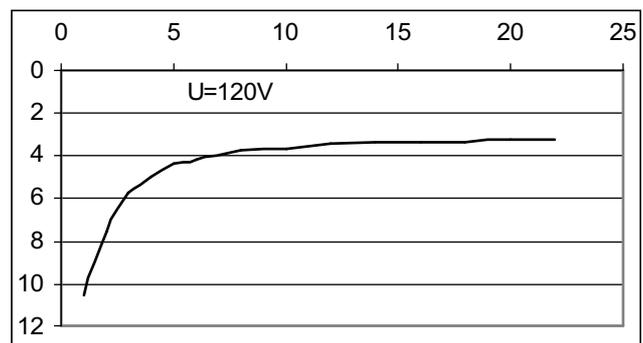
Im Abstand von jeweils einem bis zwei Zentimetern tastete ich die Höhe der Wasserfläche vom Rand des Gefäßes bis zum Zentrum des Wirbels längs eines Lineales ab und notierte die Messwerte. Es ergaben sich die nebenstehend wiedergegebenen Werte.

Es fällt auf, dass die Krümmung zum Zentrum des Wirbels sehr stark zunimmt. Noch weiter im Inneren waren mit meiner Anordnung keine genaueren Messungen mehr möglich.

Die darunter angegebene graphische Darstellung gibt die Krümmung der Wasserfläche im Quer-

Messtation	U=120V	U=130V	U=140V
1	10,5	11,5	14,3
2	7,5	8,8	9,1
3	5,7	6,5	6,8
4	5,0	5,5	5,8
5	4,4	4,7	5,0
6	4,2	4,4	4,5
8	3,8	4,0	4,1
10	3,6	3,6	3,7
12	3,4	3,4	3,5
14	3,3	3,3	3,4
16	3,3	3,3	3,3
18	3,3	3,3	3,2
20	3,2	3,2	3,2
22	3,2	3,15	3,2
cm	V	V	V

Tab. 1: Oberflächenkrümmung bei verschiedenen starken Durchflussraten der Pumpe



Diag. 1: Graphische Darstellung von Tab. 1 für eine Spannung von 120V



schnitt prinzipiell wieder. Zur besseren Anschaulichkeit wurde die Y-Achse an der X-Achse gespiegelt, um den in der Wirklichkeit vorhandenen Verlauf wiederzugeben. Das Zentrum des Strudels befindet sich in der Abbildung links.

3.2.5 Geschwindigkeit eines Objektes auf der Wasseroberfläche

Mit der selben Versuchsanordnung untersuchte ich auch die Geschwindigkeit, mit der sich ein Objekt auf der Wasseroberfläche bewegt, wenn es um den Strudel kreist. Mittels eines Röhrchens ließ ich ein Styroporkügelchen in einem genau bestimmten Abstand vom Zentrum auf die Wasseroberfläche fallen und stoppte die Zeit, die es benötigt, um zehn Umläufe auszuführen.

Die Messungen erwiesen sich als sehr ungenau. Häufig kam es vor, dass das Styroporkügelchen sich nicht auf einer Kreisbahn, sondern auf einer eher ellipsenförmigen Bahn bewegte, was dazu führte, dass die Zeiten von einem Umlauf zum nächsten sehr stark schwankten. In der Nähe des Zentrums war dieser Effekt besonders stark.

Weiter zum Rand hin war die Gefahr sehr groß, dass das Kügelchen am Rand des Behälters kleben blieb und die Messwerte verfälschte. In der graphischen Darstellung zeigen sich große Schwankungen, die durchgezogene Linie ist der Versuch einer Ausgleichskurve.

Zusammen mit dem vorhergehenden Versuch läßt sich ein Zusammenhang zwischen der Oberflächenkrümmung und den auf das Kügelchen wirkenden Kräften herstellen, die damit auch verantwortlich sind für die Umlaufbewegung. Aus dem physikalischen Zusammenhängen kann man eine Formel für die Umlaufzeit herleiten.

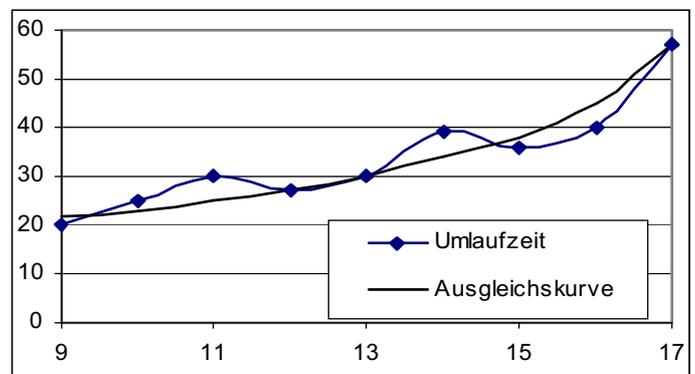
3.2.6 Welche Kräfte wirken auf ein Teilchen auf der Wasseroberfläche?

Auf ein Teilchen - z.B. ein Styroporkügelchen - wirken im Wirbel grundsätzlich zwei Kräfte: die erste Kraft ist die Gewichtskraft F_g , die zweite Kraft ist die durch die Drehbewegung entstehende Zentrifugalkraft F_z . An der Stelle, wo sich das Teilchen befindet, kann man die Wasseroberfläche als eine schiefe Ebene ansehen, was in der Abbildung als Tangente eingezeichnet ist.

Nach den Gesetzen der schiefen Ebene lässt sich die Gewichtskraft in zwei Komponenten zerlegen: die Komponente F_H wirkt parallel zur Ebene und würde ein Abrutschen des Teilchens nach unten

Ort	Zeit f. 10 Uml.	Geschwindigkeit
9	20	28,3
10	25	25,1
11	30	23,0
12	27	27,9
13	30	27,2
14	39	22,6
15	36	26,2
16	40	25,1
17	57	18,7
cm	s	cm/s

Tab. 2: Umlaufzeit und Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Bahnradius



Diag. 2: Graphische Darstellung der Umlaufzeit



bewirken. die dazu senkrechte Komponente F_N versucht, das Teilchen in die Flüssigkeit hineinzudrücken.

Da das Teilchen gleichzeitig um den Mittelpunkt des Strudels rotiert, entsteht eine Zentrifugalkraft F_Z , die senkrecht auf der Drehachse steht. Auch sie lässt sich in zwei Komponenten zerlegen: die Komponente F_T versucht ebenfalls, das Teilchen in das Wasser zu drücken, während die Kraft F_{ZH} entgegengesetzt zu F_H wirkt und das Teilchen nach oben aus dem Strudel versucht herauszudrängen.

Die zur Gewichtskraft F_g und zur Zentrifugalkraft F_Z gehörenden Kräfteparallelogramme bilden ähnliche Dreiecke, also sind die entsprechenden Verhältnisse der Kräfte gleich groß.

Es gilt also:

$$\frac{F_g}{F_Z} = \frac{F_N}{F_{ZH}} = \frac{F_H}{F_T} \quad (1)$$

Für die Gewichtskraft gilt die Beziehung:

$$F_g = m \cdot g \quad (2)$$

dabei ist m die Masse des Teilchens und g die Erdbeschleunigung von $9,81 \text{ m/s}^2$.

Durch die Drehbewegung entsteht die Zentrifugalkraft F_Z [7], die bestimmt wird durch die Bahngeschwindigkeit v , die Masse des Teilchens m sowie den Abstand r vom Rotationsmittelpunkt mit:

$$F_Z = m \cdot \frac{v^2}{r} \quad (3)$$

Setzt man dies in die Gleichung (1) ein, so erhält man

$$\frac{F_g}{F_Z} = \frac{m \cdot g}{m \cdot \frac{v^2}{r}} = \frac{g \cdot r}{v^2} \quad (4)$$

Wenn das Teilchen im Wirbel weder nach oben noch nach unten wandert, bedeutet das, dass die beiden Kräfte F_H und F_{ZH} sich gegenseitig aufheben: es besteht ein Kräftegleichgewicht. Unter dieser Voraussetzung erhält man aus (1) und (4) die Gleichung

$$\frac{F_N}{F_H} = \frac{g \cdot r}{v^2} \quad (5)$$

Das heißt, zu jedem Abstand r vom Mittelpunkt des Strudels gehört genau eine Geschwindigkeit v , bei der das Teilchen weder nach außen noch nach innen wandert.

Aus der Formelsammlung [8] und nach einem entsprechenden Hinweis meines Lehrers konnte ich

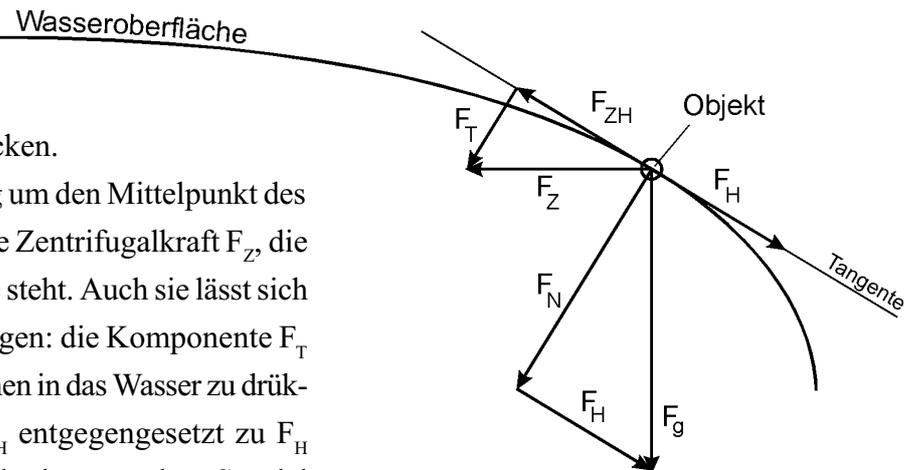


Abb. 4: An einem Objekt an der Flüssigkeitsoberfläche angreifende Kräfte



entnehmen, dass Gleichung (5) ein Maß für den Steigungswinkel der Tangente an die Flüssigkeitsoberfläche darstellt, es gilt demnach:

$$\tan \alpha = \frac{g \cdot r}{v^2} \quad (6)$$

Eine rechnerische Überprüfung meiner Messwerte mit dieser Beziehung übersteigt leider meine derzeitigen mathematischen Kenntnisse, da ich nicht weiß, wie ich F_N ohne Verwendung von trigonometrischen Funktionen bestimmen kann. Es wäre aber möglich, aus der Steigung, die ich den Messungen über den Verlauf der Krümmung der Wasserfläche (vergl. Kap. 3.2.4) entnehmen kann, die zugehörige Geschwindigkeit zu bestimmen und mit den Ergebnissen zu vergleichen, die ich mit den Messungen der Umlaufzeit (vergl. Kap. 3.2.5) gewonnen habe.

Es ist aber eindeutig erkennbar, dass die Bahngeschwindigkeit immer größer wird, je näher man an das Zentrum des Strudels gerät.

Die Umformungen - insbesondere nach Gleichung (4) - zeigen, dass die Kräfteverhältnisse unabhängig von der Masse sind, also auch prinzipiell für jedes Wassermolekül der Wasseroberfläche gelten müssen, das Styroporkügelchen macht die Bewegung lediglich sichtbar. Im unteren Bereich des Strudels kommt noch eine Bewegung hinzu, die hier nicht erfaßt ist und die durch das Abfließen des Wassers entsteht. Diese Komponente kann ich aber nicht genauer beschreiben.

4. Fazit

Eigentlich bin ich etwas überrascht, dass meine Messungen über die Drehrichtung nicht das Ergebnis gezeigt haben, das ich erwartet habe. Andererseits fand ich es spannend, zu sehen, dass auch bei einem so chaotischen System, wie es ein Strudel darstellt, es möglich ist, bestimmte Gesetzmäßigkeiten zu erforschen und - zumindest teilweise - auch durch physikalische Überlegungen zu untermauern. Die Tatsache, dass meine Styroporkügelchen trotz gut reproduzierbarer Einsetzpunkte jedesmal andere Bahnen durchlaufen haben, macht aber deutlich, wie auch geringfügige Veränderungen große Auswirkungen haben können. Wenn es auch nicht gerade der Schmetterling in New York war, der meine Versuche gestört hat, so wurde doch deutlich, wie schwierig z.B. eine Wettervorhersage sein muss, die sich ja schließlich mit der voraussichtlichen Bewegung von Luftwirbeln beschäftigt.

Es wäre außerdem interessant zu erforschen, wie die Vorgänge im Inneren des Strudels ablaufen. Ich hatte zwar einige dahingehende Versuche unternommen, indem ich mir mit Wollfäden die Strömungsrichtung anzeigen ließ, habe aber dieses Ziel aus Zeitgründen nicht weiter verfolgt. Eine weitere Untersuchung wäre die Frage wert gewesen, ob eine gezielte Asymmetrie des Behälters eine andere Vorzugsrichtung der Drehrichtung des Strudels bewirkt.

Es wäre natürlich schön, wenn ich noch einmal nach Brasilien reisen könnte, um dort meine Versuche zu wiederholen. Leider muss ich aus Kostengründen auf diese Überprüfung meiner Experimente verzichten. Ich befürchte allerdings, dass ich mit meinem jetzigen Aufbau keine deutlich anderen Ergebnisse erhalten würde, da ich ja schon hier Probleme hatte, die nach der Theorie zu erwartenden Verhältnisse nachzuweisen.



5. Anhang

5.1 Danksagung

Ich danke meinen Eltern für ihre stetigen Bemühungen, mich so zu motivieren, dass ich auch auf Durststrecken nicht die Lust an dieser Arbeit verlor, dem Förderkreis Jugend Forscht für die Bereitstellung der finanziellen Mittel zur Konstruktion meines Versuchsaufbaues und nicht zuletzt der Familie Biedermann für die Geduld und Bereitschaft, meine Experimente mit mancher Überschwemmung nicht nur zu erdulden, sondern mich auch tatkräftig bei meiner Arbeit zu unterstützen.

5.2 Literatur

- [1] Schülerduden „Die Geographie“, Dudenverlag, Mannheim 1997, S. 54
- [2] Schülerduden „Physik“, Dudenverlag, Mannheim 1995, S. 63
- [3] F.G. Gausz: „Fünfstellige Logarithmische und Trigonometrische Tafeln zum Gebrauch für Schule und Praxis“, Verlag Eugen von Strien, Halle a.S. 1904, S. 155
- [4] siehe [1], S. 153
- [5] „Diercke Weltatlas“, Westermann, Braunschweig 1996, S. 220f
- [6] siehe [5], S. 216f
- [7] Gerthsen, Chr. u.a.: „Physik“, Springer-Verlag, Berlin 1977, S. 13
- [8] Sieber: „Mathematische Formeln“, Klettverlag, Stuttgart 1991, S. 16

Weitere verwendete Literatur:

- [9] Feuerlein, R. u.a.: „Physik - Mechanik“, Bayerischer Schulbuch-Verlag, München 1993
- [10] Hardy, R. u.a.: „Das Wetterbuch“, Christian-Verlag, München 1982