



DEUTSCHE  
GESELLSCHAFT FÜR  
ZERSTÖRUNGSFREIE  
PRÜFUNG E.V.

ZfP-Sonderpreis der DGZfP beim Regionalwettbewerb Jugend forscht

## BRANDENBURG OST

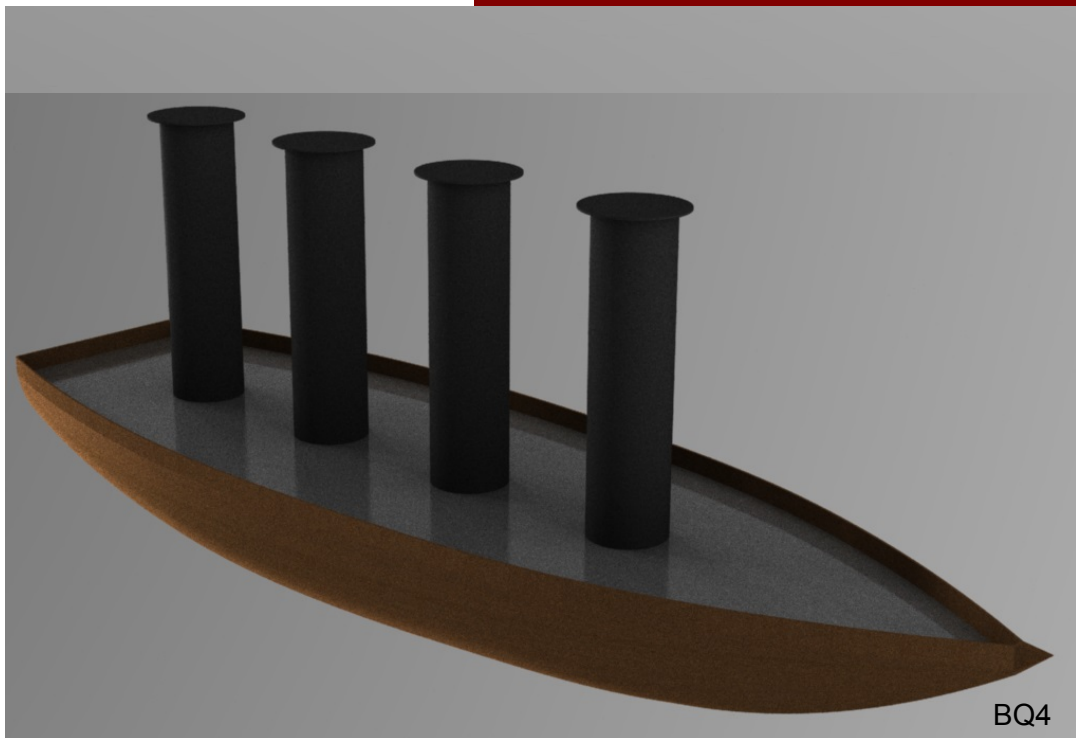


Analyse des MAGNUS-Effektes am  
Beispiel des Flettner-Rotors in Hinblick  
auf die Anwendungsmöglichkeiten in  
der Schifffahrt

Julian Kraul  
Silvan Verhoeven

Schule:  
Carl-Friedrich-Gauß-Gymnasium  
Frankfurt (Oder)

Analyse des Magnus-Effektes am Beispiel des  
Flettner-Rotors in Hinblick auf die  
Anwendungsmöglichkeiten in der Schifffahrt



## Inhalt

Das Team.....	2
1. Einleitung .....	3
2. Motivation.....	4
3. Aufgabenstellung - Vorgehensweise.....	5
4. Untersuchung des Magnus- Effektes .....	6
4.1 Geschichte des Magnus- Effektes .....	6
4.2 Grundlagen des Magnus- Effektes .....	6
4.3 Anwendungsbeispiele.....	8
5. Der Flettner- Rotor .....	9
5.1 Geschichte des Flettner- Rotors.....	9
5.2 Grundlagen des Flettner- Rotors .....	10
5.3 Aufbau und Funktionsprinzip .....	10
5.4 Anwendung in der Schifffahrt.....	11
6. Praktischer Projektablauf .....	11
7. Ausblick.....	12
8. Quellennachweis.....	13

## Das Team

Silvan Verhoeven, 14 Jahre alt und Schüler der 9. Klasse am Carl-Friedrich-Gauß-Gymnasium in Frankfurt (Oder).

Julian Kraul, 21 Jahre alt und Auszubildender zum Mikrotechnologen an der IHP GmbH in Frankfurt (Oder).

Betreuer Felix Neß, 28 Jahre alt und Service Ingenieur am IHP

Wir bedanken uns bei den Mitarbeitern und Auszubildenden des IHP Frankfurt (Oder), die uns bei der Umsetzung des Projekts unterstützt haben.

# 1. Einleitung

## **"Die höchsten Türme fangen beim Fundament an."<sup>1</sup>**

Dieses Zitat stammt vom US-amerikanischen Erfinder und Entdecker des glühelektrischen Effekts Thomas Edison und beschreibt sehr schön, dass alle Themen ihren Ursprung in den Grundlagen haben.

In den letzten Jahrzehnten hat sich die Erde stark verändert und es ist notwendig, neue Wege zu gehen, um den Herausforderungen, die die Globalisierung mit sich bringt, zu begegnen.

Dabei müssen Grundlagen überdacht werden.

Ich habe mich dabei mit den Grundlagen von Schiffen auseinandergesetzt, da sie eines der wichtigsten Transportmittel der modernen Welt sind.

Dabei haben die meisten Schiffe eins gemein, egal ob klein oder groß.

Alle benötigen Unmengen an Treibstoff, produzieren rund 3% des weltweiten CO<sub>2</sub>s und 30% der Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub>),<sup>2</sup> die zur Vergrößerung des Ozonlochs beitragen. Das wiederum hat Einfluss auf alle Menschen.

Was liegt also näher, als einen Antrieb zu entwickeln, der so wenig wie möglich Treibstoff – wenn möglich auch keinen – verbraucht. Diesen Antrieb gibt es schon. Er heißt „Flettner-Rotor“, benannt nach seinem Erfinder Anton Flettner.

Ich möchte dabei einerseits auf die theoretischen Grundlagen eingehen, aber auch ein Experiment durchführen, welches die Funktionsweise des Flettner-Rotors wiedergibt und als Grundlage für Weiterentwicklungen dient.

---

<sup>1</sup> <http://www.aphorismen.de>: "Alle Texte des Autors: Thomas Alva Edison"  
URL: [http://www.aphorismen.de/suche?f\\_autor=1159\\_Thomas+Alva+Edison&seite=3](http://www.aphorismen.de/suche?f_autor=1159_Thomas+Alva+Edison&seite=3)  
[27.01. 2014, 11:14 Uhr]

<sup>2</sup> <http://www.spiegel.de>: „CO<sub>2</sub>-Ausstoß von Schiffen: Mini-Bremse für schwimmende Dreckschleudern“  
URL: <http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/co2-ausstoss-von-schiffen-mini-bremse-fuer-schwimmende-dreckschleudern-a-774505.html>  
[27. 01. 2014, 14:38 Uhr]

## 2. Motivation

Ich habe in einer Zeitschrift einen Artikel über den Flettner-Rotor gelesen. Mich interessierte das Thema sehr, weil ich vorher noch nie etwas davon in meinem Umfeld gehört hatte. Auch wenn ich jetzt noch gefragt werde, mit welchem Thema ich denn bei JugendForscht antrete, kann sich niemand etwas unter einem Flettner-Rotor vorstellen, sodass ich dann meistens mehr über den Rotor erzählen muss. Ich recherchierte im Internet zu dem Thema, und entschloss mich dann den Flettner-Rotor als JugendForscht-Thema anzumelden. Im Zuge der Vorab-Recherche entdeckte ich, dass der Flettner-Rotor nicht nur als Schiffsantrieb, sondern auch als Tragflächenersatz für Flugzeuge diente. Im Grunde ist das auch sehr naheliegend, denn Tragflächen als auch Flettner-Rotoren erzeugen beide einen Unter- und Überdruck, der das Flugzeug abheben lässt. Mehr zur Funktionsweise jedoch später.

Wie in der Einleitung schon gesagt, tragen Schiffe nicht unwesentlich zur Umweltverschmutzung bei. Und bei meiner Internetrecherche, bei der ich mir einen Überblick über den Flettner-Rotor verschafft hatte, tauchten auch keinerlei negative Artikel oder Widerlegungsversuche für das Funktionieren eines Flettner-Rotors auf. Deswegen möchte ich nun mithilfe eines Modellbootes, auf das ich Flettner-Rotoren gebaut habe, prüfen, ob der Flettner-Rotor wirklich eine Alternative für Diesel-Schiffsmotoren sein kann. Weiterführend möchte ich noch untersuchen, wie man den Flettner-Rotor eventuell noch optimieren kann.

### 3. Aufgabenstellung - Vorgehensweise

Ich habe mich mit dem Projekt an das IHP gewandt, um das Thema in der Realität umsetzen zu können, aber auch um Hilfestellung zu theoretischen sowie praktischen Problemen zu erhalten. Dort habe ich auch den Auszubildenden Julian Kraul kennengelernt, der nun mit mir das Projekt bearbeitet.

Das erste Ziel von uns ist es, ein Boot mit einem funktionierenden Flettner-Rotor-Antrieb zu bauen und erfolgreich zu testen. Anschließend wollen wir untersuchen, ob Flettner-Rotoren einen wirtschaftlichen Nutzen haben, und vielleicht auch bestimmen, wie groß dieser ist.

Sollten unsere Forschungen nur Positives bzw. überwiegend Positives zutage fördern, hoffen wir auch, dass JugendForscht mehr zur Bekanntheit der Flettner-Rotoren beitragen wird.

Gestartet sind wir in der Kategorie Arbeitswelt, weil der Flettner-Rotor Vorteile für die Arbeiter in seiner Umgebung hat. Zum Beispiel sind Sie um einiges leiser als Motoren, fast geräuschlos. Außerdem benötigt man für ihren Betrieb keine schädlichen oder giftigen Chemikalien. Sie verbrauchen keine fossilen Rohstoffe wie Öl, weil sie mit Elektromotoren angetrieben werden können, die durch Solarstrom betrieben werden und leichter gewartet werden können.

## 4. Untersuchung des Magnus- Effektes

Den Magnus-Effekt kennt nahezu jeder – ob er es weiß oder nicht. Zum Beispiel ist der Magnus-Effekt dafür verantwortlich, dass der Fußball bei einer „Bananen“flanke die Kurve fliegt. Oder dass beim Tischtennis angeschnittene Bälle in eine ganz andere Richtung fliegen, als es zuerst den Anschein hat. Man könnte noch unzählige andere Beispiele nennen.

### 4.1 Geschichte des Magnus- Effektes

Der Magnus-Effekt ist benannt nach seinem „Entdecker“, der Physiker Heinrich Gustav Magnus (1802–1870). Wobei er „nur“ der Erste war, der den Effekt physikalisch erklären konnte. Entdeckt hatte ihn genau genommen Benjamin Robins 100 Jahre vor Magnus.

### 4.2 Grundlagen des Magnus- Effektes

Damit der Magnus-Effekt auftritt, müssen drei Bedingungen erfüllt sein:

1. Der Körper muss eine gekrümmte Oberfläche haben bzw. möglichst zylinder- oder kugelförmig sein
2. Um den Körper muss ein (scheinbarer) Luftstrom fließen
3. Der Körper muss rotieren

Beim Beispiel der Bananenflanke wird der Ball beim Abschuss leicht seitlich getroffen. Dadurch rotiert er im Flug. Und da er während des Fluges in Bewegung ist, strömt Luft um den Ball, obwohl vielleicht gar kein Wind weht. Da sich der Ball dreht, strömt „mehr Luft“ in der Richtung um den Ball, in die der Ball rotiert. Zudem strömt die Luft auf der Seite auch weiter um den Ball, ihr Weg wird länger. Die Luft muss sich auf dieser Seite des Balls also schneller bewegen, damit hinten (B) genauso viel Luft wieder zusammenströmt, wie vorne (A) auf den Ball trifft. Durch die höhere Geschwindigkeit der Luft entsteht auf dieser Seite ein Unterdruck, während auf der Seite

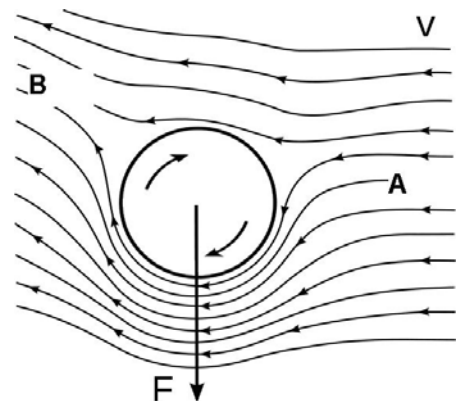


Abb. 1: Strömungen am Flettner-Rotor; BQ1



mit der langsamen Luft ein Überdruck entsteht. Das entspricht der Funktionsweise der Tragfläche eines Flugzeugs. Denn wie bei der Tragfläche entsteht auch eine Kraft  $F$  in Richtung des größten Unterdrucks, der Ball wird durch den Überdruck in diese Richtung gepresst. Und die Kurve kommt zustande, weil der Ball ja noch durch die Schusskraft nach vorne getrieben wird. Analog zum Fußball läuft das auch beim Tischtennisball. Und dieser Effekt wird beim Flettner-Rotor genutzt.

Wenn man wüsste, wie schnell der Wind auf der Seite in Drehrichtung und entgegen der Drehrichtung ist, dann könnte man später auch die wirkenden Kräfte herausfinden. Um das berechnen zu können benötigt man fünf grundlegende Faktoren:

- Den scheinbaren Wind  $(c_0)$
- Die Umfangsgeschwindigkeit  $(u)$
- Die Winkelgeschwindigkeit  $(\omega)$
- Den Rotorenradius  $(r)$
- Die Drehzahl  $(n)$

Die *Drehzahl* gibt an, wie oft sich der Körper in einer bestimmten Zeit dreht. Mit ihrer Hilfe lässt sich die *Winkelgeschwindigkeit* berechnen:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$$

Die Winkelgeschwindigkeit gibt an, wie viel Zeit der Körper für eine 360°-Drehung benötigt. Mit dem *Rotorenradius* und der Winkelgeschwindigkeit kann man die *Umfangsgeschwindigkeit* berechnen:

$$u = \omega \cdot r$$

Die Umfangsgeschwindigkeit beschreibt, wie schnell sich ein Punkt auf der äußeren Körperkante bewegt. Mit ihr kann man nun die Geschwindigkeit der schnelleren und der langsameren Luft ( $c_1, c_2$ ) berechnen:

$$c_1 = c_0 + u$$

$$c_2 = c_0 - u$$

Damit können wir jetzt die wirkenden Kräfte bestimmen.

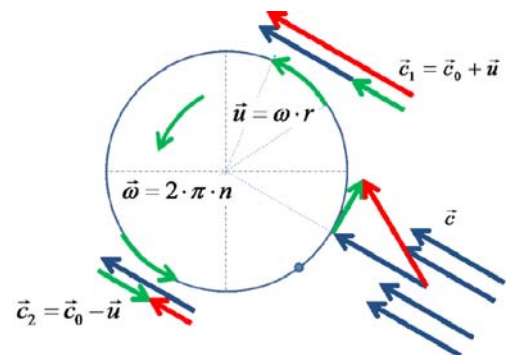


Abb. 2: Geschwindigkeiten an einem Probekörper; BQ2

Beim Flettner-Rotor ist die Strömungsgeschwindigkeit ( $c_1, c_2$ ) indirekt proportional und die Dichte der Luft ( $p_1, p_2$ ) proportional zur Länge des Weges. Deswegen kann man hier das BERNOULLI Gesetz anwenden. Es besagt für jeden Stromfaden:

$$p_0 + \frac{\rho}{2} \cdot c_0^2 = p_1 + \frac{\rho}{2} \cdot (c_0 + \omega \cdot r)^2 = p_2 + \frac{\rho}{2} \cdot (c_0 - \omega \cdot r)^2$$

Damit ist die Druckdifferenz zwischen den beiden Seiten ( $p_1, p_2$ ) senkrecht zur anströmenden Luft:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2} \cdot (c_0 - \omega \cdot r)^2 - \frac{\rho}{2} \cdot (c_0 + \omega \cdot r)^2 = \frac{\rho}{2} \cdot (4 \cdot c_0 \cdot \omega \cdot r) = \underline{2 \cdot \rho \cdot c_0 \cdot \omega \cdot r}$$

Die daraus resultierende maximale Auftriebskraft wird dann folgendermaßen berechnet:

$$F_A = \Delta p \cdot A_{\text{eff}} \approx \rho \cdot (2 \cdot c_0 \cdot \omega \cdot r) \cdot (d \cdot h)$$

### 4.3 Anwendungsbeispiele

Wie eben schon erwähnt, gibt es unzählige Anwendungsbeispiele für den Magnus-Effekt.

Hier sind einige aufgezählt:

- Bananenflanke im Fußball
- Angeschnittener Tennisball
- Flettner-Rotor (Schiffsantrieb, Flugzeugtragflächen und Windradflügel)
- Golf
- Tennis

## 5. Der Flettner- Rotor

### 5.1 Geschichte des Flettner- Rotors

Anton Flettner wurde am 1. November 1885 in Eddingen in der Nähe von Frankfurt (Main) geboren. Er war Lehrer, autodidaktischer Ingenieur und Erfinder. Im Alter von 29 Jahren begann er, seine ersten Erfindungen vorzustellen, darunter ein lenkbarer Torpedo oder ein ferngesteuerter Kampfwagen für das Reichsmarineamt. Beide wurden jedoch abgewiesen, weil sie für nicht realisierbar befunden wurden. Nach dem ersten Weltkrieg begann er Forschungen an Metallsegeln, als er von den Experimenten der Aerodynamischen Versuchsanstalt in Göttingen mit rotierenden Zylindern hörte. Davon inspiriert baute er 1923 zunächst einen kleinen Prototypen und lies es auf dem Berliner Wannsee fahren. Es war ein kleines einfaches Modellboot mit einem Papierzylinder, der von einem Uhrwerk angetrieben wurde. Aber es zeigte, dass seine Vision in die Tat umgesetzt werden konnte. Mithilfe der Forschungsergebnisse der Versuchsanstalt in Göttingen baute er nun auf den Segelschoner „BUCKAU“ (später „Baden-Baden“) 2 Flettner-Rotoren, die das Schiff antreiben sollten. Mit dem Schiff führte er 1924-1926 Probefahrten auf der Ostsee durch, die alle erfolgreich waren. Später fuhr er für Werbezwecke nach Schottland, Cuxhaven, Danzig und Amerika. Nie gab es nennenswerte Probleme. Unter guten Bedingungen fuhr sie allein mit den Rotoren schneller als mit Motorkraft. Nach dieser Zeit wurde die BUCKAU ihrem eigentlichen Eigentümer übergeben, wo sie für Vergnügungsfahrten genutzt wurde. Später wurde sie von der von Flettner gegründeten „Flettner-Rotorschiffahrt GmbH“ aufgekauft.

Der BUCKAU folgte noch die „BARBARA“. Sie lief 1926 vom Stapel und war ein wenig größer als die BUCKAU. Sie besaß 3 Flettner-Rotoren. Sie fuhr zuerst im Mittelmeer, wo sie mit zwei Segelschiffen auf ihre Wirtschaftlichkeit getestet wurde. Die Ergebnisse waren durchweg sehr positiv.

Trotzdem wurde die Idee nicht richtig weiter verfolgt. Grund dafür waren sehr niedrige Ölpreise und die neuen Dieselmotoren. Erst jetzt sind Flettner-Rotoren langsam wieder im Kommen, wo die Forderung nach „grünen“ Antrieben lauter wird, die fossilen Rohstoffe zur Neige gehen und die Preise immer weiter steigen.

Nach dem Flettner-Rotor widmete sich Anton Flettner noch anderen Projekten, z.B dem Flettner-Lüfter, der den Luftaustausch in geschlossenen Räumen ohne zusätzlichen Energie-

aufwand ermöglichen soll, oder den „Krupp-Flettner-Großkraftwagen“, der einem LKW ähnelt und als Transportfahrzeug noch lange bei Thyssen-Krupp verwendet wurde.

Anton Flettner starb am 25. Dezember 1961 in New York. Heute ist er auf dem Eddersheimer Friedhof begraben. Sein Grab steht unter Denkmalschutz.

## 5.2 Grundlagen des Flettner- Rotors

Der Flettner-Rotor basiert wie die Bananenflanke oder ein angeschnittener Tennisball auf dem Magnus-Effekt.

## 5.3 Aufbau und Funktionsprinzip

Der Flettner-Rotor besteht im Wesentlichen aus einer Antriebsachse, die den Rotormantel (meist aus Aluminium) antreibt. Oben ist der Rotor durch eine Endscheibe begrenzt, die breiter als die untere Endscheibe ist.

Dadurch wird die Auftriebskraft stark vergrößert.

Auf Ober- und Unterdeck des Schiffes sind Löcher eingelassen.

Über jedem Loch ist ein Kugellager montiert, durch das die Antriebsachse verläuft.

Angetrieben wird die Antriebsachse entweder direkt über einen Elektromotor oder mithilfe eines dazwischengeschalteten Getriebes.

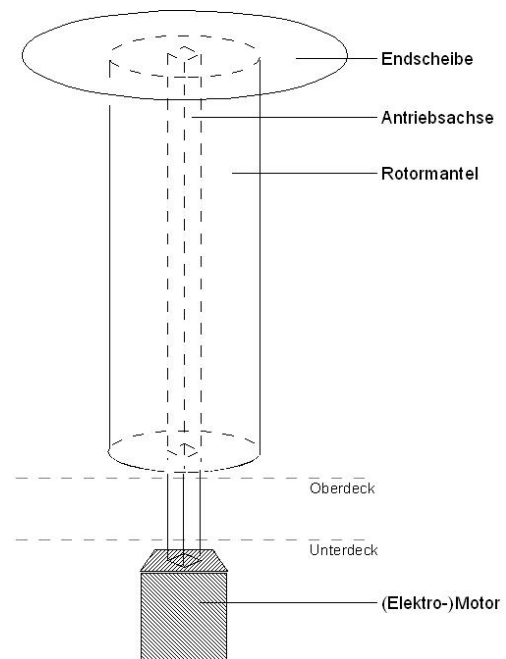


Abb: 3: Schematischer Aufbau eines Flettner-Rotors; BQ3

## 5.4 Anwendung in der Schifffahrt

Früher wurde der Flettner-Rotor bei kleinen Yachten und Freizeitbooten als Hauptantrieb verwendet. Heutzutage wird er, wenn er auf großen Containerschiffen und Frachtern wie z.B. der ESHIP 1 zur Anwendung kommt, als Hilfsantrieb benutzt. Dabei kann er heutzutage aber schon locker mal den jährlichen Kraftstoffverbrauch eines solchen Schiffes um 25%-30% reduzieren.<sup>3</sup>

## 6. Praktischer Projektlauf

Wie schon erwähnt gliedert sich das Projekt in drei Teile. Im ersten Teil werden die theoretischen Grundlagen dargestellt und der Umfang des Themas abgeschätzt. Im nächsten Abschnitt wird das Testobjekt konstruiert, gefertigt und getestet. Im letzten Teil der Arbeit werden diverse Messungen und Tests durchgeführt mit Hinblick auf das Verbesserungspotential der Rotoren. Das alles soll dazu beitragen das Thema bekannter zu machen auch in Verbindung mit der praktischen Nutzung auf Schiffen. Im Idealfall stellt der weiterentwickelte Flettner- Rotor eine echte Alternative zur kommerziellen Bewegung auf dem Wasser da und würde die Arbeitsumgebung der Besatzung maßgeblich verbessern.

Unser Projekt widmet sich im Moment erst einmal der Grundlagenforschung. Bisher haben wir schon einen Testkanal konstruiert, in dem wir ein Modellboot schwimmen lassen können. Zurzeit sind wir dabei, das Modellboot zu bauen und es mit funktionstüchtigen Flettner-Rotoren auszustatten, dass dann nach der Fertigstellung im Testkanal fahren kann. Zu diesem Zeitpunkt wollen wir schauen, ob sich das physikalische Prinzip überhaupt im Modell nachvollziehen lässt. Sollte der Miniaturlaufbau positive Ergebnisse bringen, so können wir dann verschiedene Experimente durchführen. Beispielsweise lässt sich feststellen, inwiefern sich die Oberfläche der Rotoren auf die Lautstärkebelastung der Besatzung auswirkt. Weitere Kriterien sind die Bauform oder die Anordnung bzw. die Anzahl der Rotoren in Bezug auf den Platzbedarf an Deck.

---

<sup>3</sup> <http://www.enercon.de>: Segelrotorschiff «E-Ship 1» spart im Betrieb bis zu 25 Prozent Treibstoff  
URL: <http://www.enercon.de/de-de/2224.htm>  
[27.01. 2014, 20:09 Uhr]

Weiter soll untersucht werden, wie gut ein Schiff mit Flettner- Rotoren im Wasser schwimmt, welche Rolle die Parameter Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Umdrehungsgeschwindigkeit der Rotoren etc. spielen. Das alles hat Einfluss auf die Arbeitsumgebung und Arbeitsbedingungen der Bootsbesatzung.

## **7. Ausblick**

Wir arbeiten darauf hin, ein funktionstüchtiges Modellboot mit Flettner-Rotoren fertigzustellen. Wir wollen schon einige Experimente abgeschlossen haben, um neben dem fertigen Schiffsmodell auch ein paar Ergebnisse präsentieren zu können. Außerdem werden wir, soweit es uns zu dem Zeitpunkt schon möglich ist, Verbesserungsvorschläge für die wirtschaftliche, besonders aber für eine benutzerfreundliche Anwendung unterbreiten.

## 8. Quellennachweis

### Textquellen:

[http://www.dsm.museum/medien/17/4830/reuss\\_flettner\\_rotorschiffe.pdf](http://www.dsm.museum/medien/17/4830/reuss_flettner_rotorschiffe.pdf)

[24. 01. 2014, 10:19 Uhr]

[http://de.wikipedia.org/wiki/Anton\\_Flettner](http://de.wikipedia.org/wiki/Anton_Flettner)

[24. 01. 2014, 12:24 Uhr]

<http://de.wikipedia.org/wiki/Flettner-Rotor>

[24. 01. 2014, 12:36 Uhr]

[http://de.wikipedia.org/wiki/Heinrich\\_Gustav\\_Magnus](http://de.wikipedia.org/wiki/Heinrich_Gustav_Magnus)

[24. 01. 2014, 13:47 Uhr]

<http://www.cnc-lehrgang.de/berechnungen-bei-kreisfoermigen-bewegungen/>

[24. 01. 2014, 14:59 Uhr]

[http://de.wikipedia.org/wiki/Str%C3%B6mung\\_nach\\_Bernoulli\\_und\\_Venturi](http://de.wikipedia.org/wiki/Str%C3%B6mung_nach_Bernoulli_und_Venturi)

[24. 01. 2014, 15:23 Uhr]

[http://www.fh-flensburg.de/ima/Flettner-Rotor\\_ESHIP1.pdf](http://www.fh-flensburg.de/ima/Flettner-Rotor_ESHIP1.pdf)

[27. 01. 2014, 08:22 Uhr]

<http://www.enercon.de/de-de/2224.htm>

[27. 01. 2014, 20:02 Uhr]



## Bildquellen:

### **BQ1:**

[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Magnus\\_effect.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Magnus_effect.svg)

[Lizenz: siehe Link,

Kopierrechte vorbehalten,

Urheber: Bartosz Kosiorek;

Bearbeitet mit Paint 5.1, Microsoft Word 97-2003 Zeichentools,

24. 01. 2014, 14:32 Uhr]

### **BQ2:**

[http://www.fh-flensburg.de/ima/Flettner-Rotor\\_ESHIP1.pdf](http://www.fh-flensburg.de/ima/Flettner-Rotor_ESHIP1.pdf)

[Lizenz: keine,

Alle Rechte liegen bei dem Urheber des Bildes,

Urheber: Prof. Dr.-Ing. Holger Watter;

Bearbeitet mit Microsoft Word 97-2003 Zeichentools,

24. 01. 2014, 13:43 Uhr]

### **BQ3:**

[Lizenz: Urheberrechte,

Alle Rechte liegen bei dem Urheber des Bildes,

Urheber: Silvan Verhoeven;

Bearbeitet mit Microsoft Word 97-2003 Zeichentools,

23. 01. 2014, 16:59 Uhr]

### **BQ4:**

[Lizenz: Urheberrechte,

Alle Rechte liegen bei dem Urheber des Bildes,

Urheber: Julian Kraul, Silvan Verhoeven;

Bearbeitet mit Microsoft Word 97-2003 Zeichentools,

20. 01. 2014, 10:33 Uhr]