

# Anhang zum Text „Öko-Trimaran“

(Hintergrundwissen)

Version 9 – November 2006. Letzte Änderung: 16. 5. 2007

## Inhalt:

	Seite
Dynamik des Kurvenfahrens .....	2
Bewegungsformen von Schiffen .....	3
Andere Windräder .....	4
Andere Wellenkraftwerke .....	5
Andere Speichermöglichkeiten .....	6
Physik (Berechnungen) .....	7
Andere Schiffsantriebe .....	10
Andere umweltfreundliche Motorschiffe.....	15
Links und Quellen .....	16

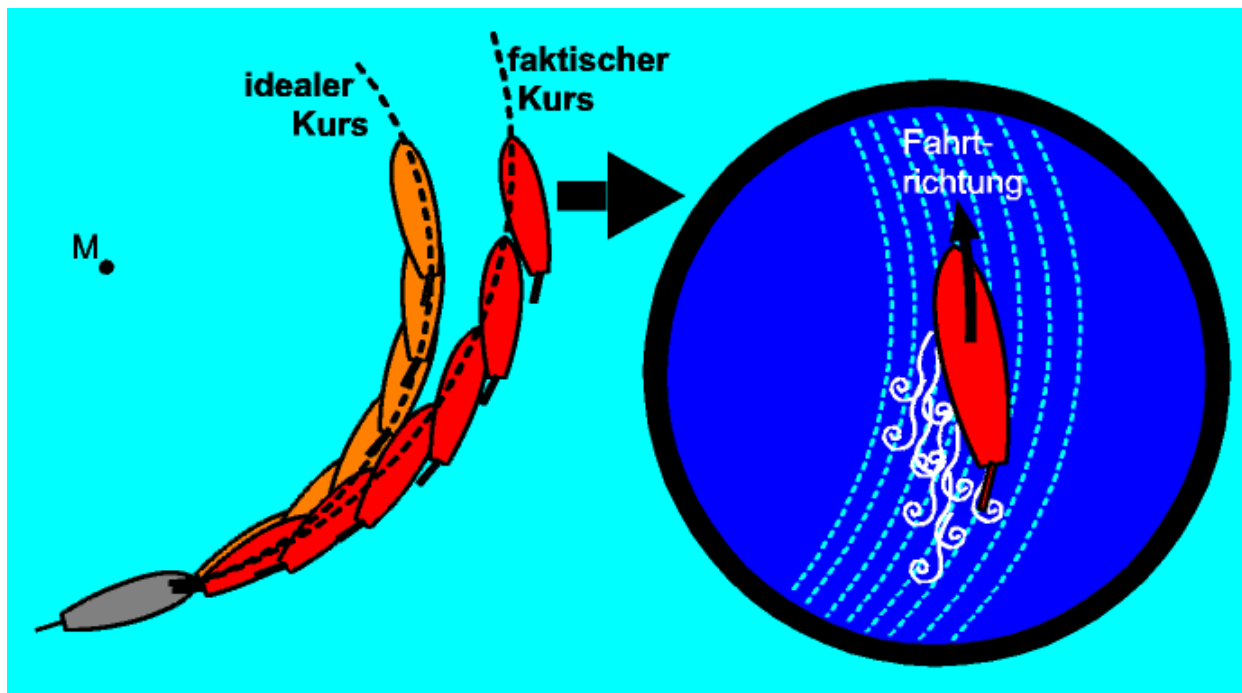
## Dynamik des Kurven-Fahrens

Schon das Steuerruder wirkt als Bremse, wenn es eingeschlagen wird. Noch stärker aber ist der folgende Bremseffekt bei allen Abweichungen vom geraden Kurs: Ein einrumpfiges Schiff biegt (unten links in der Zeichnung) in eine Kurve nach backbord ein. Ideal wäre ein Kurs auf einer Kreisbahn um den Mittelpunkt M, wie wir ihn von Landfahrzeugen her kennen. Bei ihnen halten die Räder die Spur ein. Das Wasser gibt aber den bei jeder Kurvenfahrt auftretenden Fliehkräften nach, im faktischen Kurs driftet das Schiff deshalb nach der Außenseite der Kurve ab (rot dargestellt). Die Drift wirkt natürlich auf Bug und Heck gleichermaßen, weshalb sich das Schiff etwas quer zur Fahrtrichtung ausrichtet, wie in der Vergrößerung rechts im Bild dargestellt. Die Querstellung bremst das Schiff in der Kurve erheblich ab. Andererseits ist diese Querstellung günstig zum Einhalten des angestrebten

Kurses, weil das Schiff auf diese Weise wenigstens teilweise die Abtrift kompensiert und sich nicht zu weit vom idealen Kurs entfernt.

Bei unserem Trimaran treten natürlich die gleichen Bremseffekte am vorderen Schwimmer auf. Weil dieser aber nur einen Teil der Gesamtkonstruktion ausmacht, sind die Bremskräfte - bezogen auf das gesamte Schiff und im Vergleich mit einem konventionellen Schiff - wesentlich kleiner. Deutlich kleiner sind auch die Bremskräfte am Steuerruder, weil dieses in seiner Größe an den Schwimmer und nicht an das Gesamtschiff angepasst ist.

Die beiden hinteren Schwimmer fallen gar nicht ins Gewicht, weil sie sich immer optimal der Fahrtrichtung anpassen (Rückstell-Effekt durch die am Ende des vorderen Drittels liegende vertikale Drehachse).



## Bewegungsformen von Schiffen

### 1. lineare Beschleunigungen

#### 1.1 Horizontalbeschleunigung

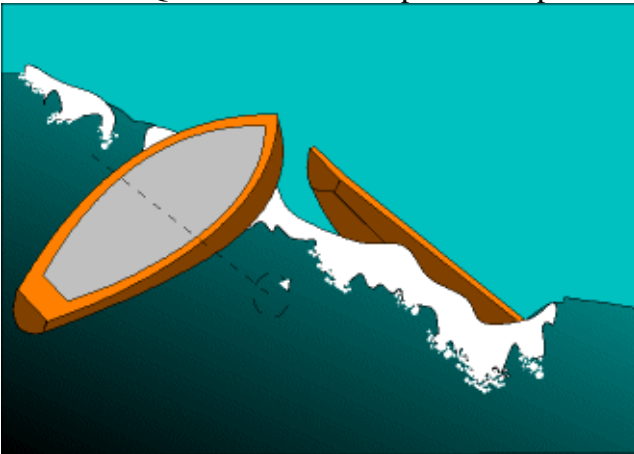
1.1.1 positive: Wieder-Aufnehmen von Fahrt nach dem Passieren des Wellenkamms. Relativ sanft, weniger nachteilig für den Komfort.

1.1.2 negative: Abbremsen beim Auffahren auf eine Welle. Heftiger als positive Beschleunigung, da sich der Bug in die Welle hinein bohrt. Deshalb abträglicher für den Komfort.

1.2 Vertikalbeschleunigung: Auf- und Ab-Bewegung im Wellengang (Fahrstuhleffekt). Positive und negative Beschleunigungen etwa gleich abträglich für den Komfort.

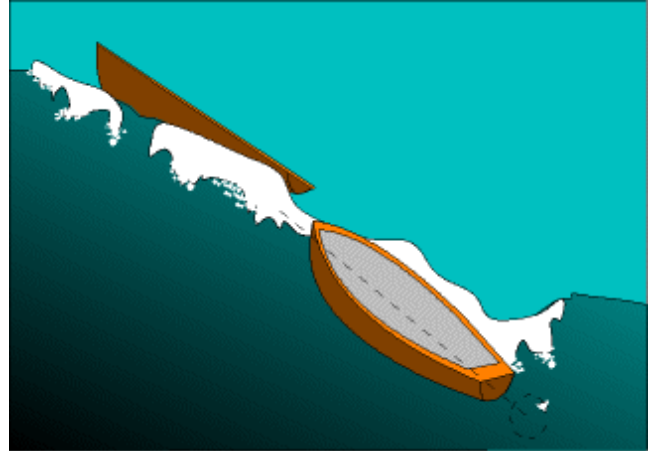
### 2. kreisförmige Beschleunigungen

#### 2.1 um die Querachse des Rumpfes: Stampfen



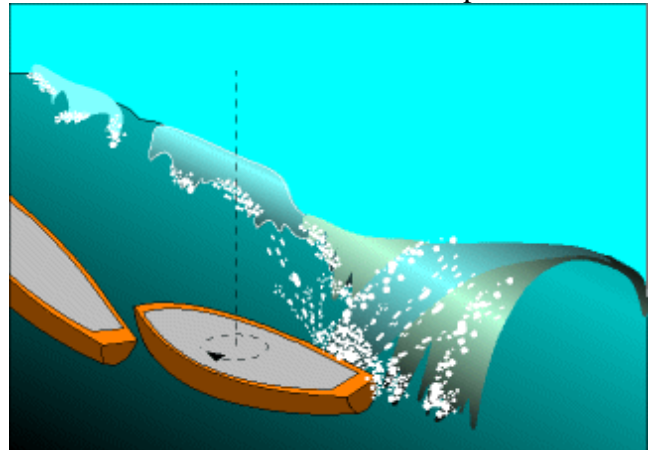
(Bild). Vor allem beim Überqueren von Wellenfronten in mehr oder weniger senkrechtem Winkel. Eine besonders schädliche spezielle Form des Stampfens ist das Slamming (von engl. to slam = heftig hinwerfen), besonders bei schneller Fahrt quer zu den Wellenfronten: Der Vorderteil des Schiffsrumpfes schlägt nach dem Passieren des Wellenkamms mit voller Wucht auf den abfallenden Teil der Welle auf.

#### 2.2 Um die Längsachse des Rumpfes: Rollen.



(Bild). Bei einem Kurs in spitzem Winkel zu den Wellenfronten.

#### 2.3 Um Vertikalachse des Rumpfes: Gieren



(Bild) Tritt z. B. ein, wenn das Schiff an Heck oder Bug seitlich von einem Brecher getroffen wird. Die dabei auftretenden Kursabweichungen sind natürlich wichtig für die Navigation, relativ unbedeutend aber für den Komfort.

## Andere Windräder

Zur Stromerzeugung mit ortsfesten Anlagen hat sich der horizontalachsige Schnellläufer mit schmalen Flügeln und horizontaler Welle auf rundem Mast allgemein durchgesetzt. Für den Öko-Trimaran weist diese Windradform jedoch einige Nachteile auf:

1. Der Winddruck auf den Rotor und auf den Mast ist relativ groß; das bewirkt bei Seitenwind eine **Krängung** des Schiffs, was unter Extrembedingungen die Gefahr des Kenterns erhöht. Der Mast wirkt dabei wie ein Hebel, der die auf das Schiff einwirkenden Kräfte noch verstärkt.

2. Der Winddruck erhöht auch die **Abdrift** bei Seitenwind. Um den Kurs zu halten, muss gegengesteuert werden, was wiederum den Fahrtwiderstand erhöht. Um die Geschwindigkeit zu halten, muss mehr Antriebsenergie eingesetzt werden.

Andere Windradtypen haben eine **senkrechte Welle**, was zwei Vorteile mit sich bringt: Sie benötigen keine Vorrichtung, um in den Wind gedreht zu werden und die erzeugte Drehbewegung ist direkt am Boden verfügbar. Nachteilig ist jedoch der geringere Wirkungsgrad und der Umstand, dass sie eine Gierung des Schiffes erzeugen, die ihrer Drehbewegung entgegengesetzt ist. Um den Kurs zu halten, muss gegengesteuert werden, was Antriebsenergie kostet.

Bekannt sind vier Ausführungen (Links & Quellen, Nr.5):

Der **Darrius-Rotor**: Drei oder mehr bogenförmige Flügel sind mit ihrem oberen und unteren Ende an einer senkrechten Welle befestigt; jeder Bogen der Flügel liegt in einer vertikalen Ebene. Es handelt sich um einen Schnellläufer, der ca. 75% des Wirkungsgrades eines vergleichbaren horizontalachsigen Schnellläufers erreicht. Er läuft nicht von alleine an, sondern muss durch einen Motor oder einen Savonius-Rotor (siehe nächsten Punkt) auf eine Mindest-Drehzahl gebracht werden, damit er dann selbsttätig weiterläuft.

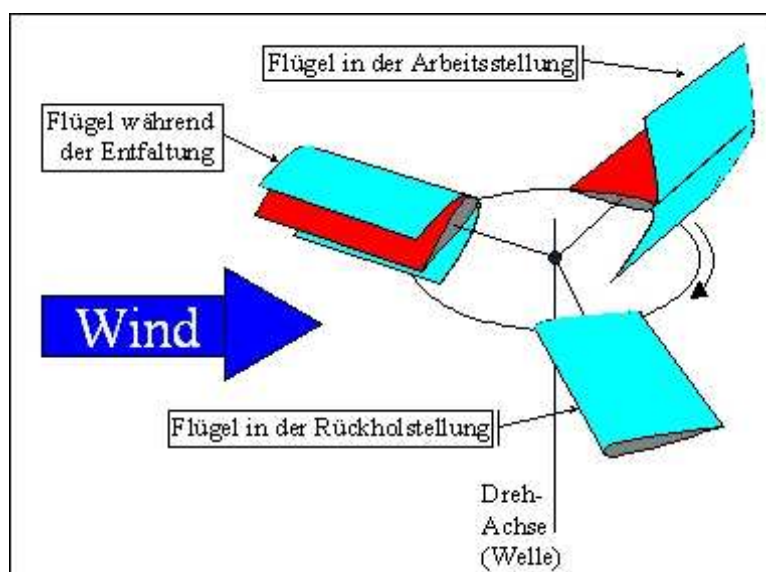
Der **H-Rotor** kann als eine Variante des Darrius-Rotors betrachtet werden, nur sind die Flügel nicht bogenförmig, sondern gerade. Die zwei-flügelige Ausführung erscheint von oben bzw. unten gesehen als der große Buchstabe „H“, der waagrechte Verbindungsstrich entspricht den Armen, welche die Flügel tragen.

Bei einer Weiterentwicklung des H-Rotors der Hochschule Bremen, die als „Twister“ bezeichnet wird (Links & Quellen Nr. 39), liegen die Flügel mit ihrer Hauptebene wie beim H-Rotor auf einer Zylinderfläche, sie sind jedoch von oben nach unten verdreht: Die Flügelvorderkante liegt oben auf einer anderen Mantellinie des Zylinders als unten. Dadurch wird das Anlaufvermögen und der Wirkungsgrad verbessert

und die Anlage arbeitet auch bei starkem Wind praktisch geräuschlos.

Ein Nachteil ist die von diesem Windrad ausgelöste Gierung des Schiffes (wie bei einem Hubschrauber). Diese kann nur durch eine doppelte Ausführung vermieden werden, wobei die beiden Windräder koaxial und gegenläufig rotieren.

Der **Savonius-Rotor**: Er besteht aus zwei oder drei gewölbten Schaufeln, die vertikal zwischen zwei Deckscheiben so eingebaut sind,



dass zwischen ihnen noch ein Spalt frei bleibt. Es handelt sich um einen Langsamläufer mit gutem Anlauf-Vermögen, jedoch einem noch schlechteren Wirkungsgrad als der Darrius-Rotor.

Das **Faltflügelwindrad** (Abb.) oder „side-winder wind turbine“ (Links & Quellen, Nr. 32) ist wenig bekannt und kaum erforscht; sein Wirkungsgrad ist vermutlich deutlich geringer als beim horizontalachsigen Schnellläufer. Von einer senkrechten Achse zweigen drei oder mehr waagrechte Rahen ab (alle in einer Ebene). An jeder dieser Rahen sind bewegliche Windflügel so befestigt, dass sie sich bei der Bewegung gegen den Wind parallel zur Windrichtung einstellen und so nur einen minimalen Widerstand aufweisen; bei der Bewegung mit dem Wind falten sich die Flügel auseinander, so dass der Wind den für die Rotation erforderlichen Druck auf sie ausüben kann.

Anmerkung: Der **Flettner-Rotor** gehört zu den Schiffsantrieben und dort zur Kategorie der Segel; er wird auch als "Walzensegel" bezeichnet (siehe Abschnitt "Entwicklung – was bisher geschah" S. 20).

Für den Öko-Trimaran kommt der Savonius-Rotor wegen des schlechten Wirkungsgrades und des hohen Winddrucks nicht in Frage. Interessant sind evtl. die beiden anderen Windradtypen. Der geringere Wirkungsgrad des Darrieus-Rotors bzw. des H-Rotors könnte dadurch ausgeglichen werden, dass er einen geringen Winddruck erzeugt und deshalb größer als der horizontalachsige Schnellläufer ausgeführt werden kann. Außerdem ist er vielleicht ästhetisch befriedigender, weil er ein filigraneres Erscheinungsbild aufweist.

Das Faltflügel-Windrad könnte für den Öko-Trimaran insofern interessant sein, als es relativ flach über dem Haupttrumpf rotieren kann. Der senkrechte Mast ist also kurz und hat nur eine geringe Hebelwirkung, die von ihm bewirkte Krängung bleibt dementsprechend gering. Deshalb kann es mit einem sehr großen Rotordurchmesser ausgeführt werden, was den vermutlich geringen Wirkungsgrad kompensieren könnte. Nachteilig ist es, dass es sich hier um einen ausgesprochenen Langsamläufer handelt, der für den

Stromgenerator eine große Übersetzung verlangt und damit höhere Reibungsverluste erzeugt.

Ein weiterer Nachteil ist die von dem Faltflügel-Windrad ausgelöste Gierung des Schiffes (wie bei einem Hubschrauber). Diese kann nur durch eine doppelte Ausführung vermieden werden, wobei die beiden Windräder koaxial und gegenläufig rotieren.

Auch der größere Schattenwurf auf die Solarzellen spricht eher gegen diesen Windradtyp.

Eine Sturmsicherung ist mit einfacher Technik dadurch zu realisieren, dass ab einer bestimmten Windstärke das Auf-Falten der Windflügel gesperrt wird, wodurch das Windrad stehen bleibt und sein horizontaler Luftwiderstand sehr klein wird. Problematisch bleibt allerdings der Luftwiderstand bei stärkerem Rollen oder Stampfen des Schiffes, weil dann die Windflügel nicht mehr waagrecht im Luftstrom stehen. Sie können von unten angehoben oder von oben niedergedrückt werden.

## Andere Wellenkraftwerke

Die meisten der schon bekannten Wellenkraftwerke sind als stationäre Offshore-Anlagen konzipiert, die ihre Energie an Land liefern. Für ein Schiff braucht man mobile Wellenkraftwerke. Trotzdem werden wir uns auch ein neueres stationäres Wellenkraftwerk ansehen, weil es unserer Konstruktion sehr nahe kommt. Es handelt sich um den "Pelamis Wave Energy Converter" des schottischen Unternehmens "Ocean Power Delivery Ltd." (Links & Quellen Nr. 6). Er besteht aus zylinderförmigen Pontons, die mit ihren Spitzen bzw. Enden zu einer beweglichen Kette miteinander verbunden sind. Durch die Wellen werden die Längsachsen der Pontons relativ zueinander abgelenkt. Diese Bewegung wird durch Hebel in das Innere eines jeden Pontons geleitet und setzt dort Hydrauliköl unter Druck. Mit diesem wird wiederum ein Hydraulikmotor in Gang gesetzt, der einen elektrischen Generator antreibt. Die elektrische Energie wird mit Kabeln an Land geleitet. Im Sommer 2006 wurde an der portugiesischen Küste eine 2,25 MW-Anlage in Betrieb genommen. Eine weitere 5 MW-Anlage ist in England an der Küste von Cornwall geplant.

Die wenigen bisher bekannten mobilen Anlagen beziehen sich überwiegend auf einrumpfige Fahrzeuge und nutzen das Stampfen des Schiffes im Seegang. Dadurch werden flüssige oder feste bewegliche Massen im Schiffsrumpf hin- und herbewegt, die elektrische Generatoren antreiben. Dadurch können die (für Komfort und Sicherheit nachteiligen) Bewegungen des Schiffsrumpfes gedämpft, bei bestimmten Wellenfrequenzen aber auch verstärkt werden - ein wesentlicher Nachteil dieser Konstruktionen. Ein weiterer Nachteil: Wenn viel Energie produziert werden soll, müssen die beweglichen Massen im Rumpf entsprechend groß sein, was aber auf Kosten der Nutzlast geht. (Dem Autor ist nicht bekannt, ob derartige Systeme jemals realisiert wurden). Auf dem Gebiet der mehrrumpfigen Schiffe (Katamarane und Trimarane) fanden sich einige Vorschläge zur beweglichen Anordnung der Schwimmkörper, die aber nicht zur Energiegewinnung genutzt werden. Bei der üblichen starren Anordnung der Schwimmer versucht man das mit Platten oder Flossen, die seitlich an den Rümpfen angebracht sind.

Das neueste Projekt dieser Art ist ein 250 m langer Hochsee-Autotransporter "Orcelle" der Reederei Wallenius Wilhelmsen (Links & Quellen Nr. 7). Es handelt sich um einen Pentamaran mit einem im Wasser liegenden Haupttrumpf und mit je zwei starr montierten Auslegern auf jeder Seite. Zwischen dem Haupttrumpf und den Auslegern sind je drei Platten („fins“) angeordnet. Jede kann sich um eine waagrechte, quer zur Fahrtrichtung liegende Achse drehen, so dass sie durch den Wellengang bewegt wird und auf diese Weise Energie erzeugt. Gleichzeitig sollen die Platten nach dem Prinzip der Fischflossen auch für den Antrieb genutzt werden können. "The fins are also propulsion units that are driven by wave energy or by the electricity or mechanical energy

available on board". Über den Stand der Realisation teilt das Unternehmen mit: "We saw the opportunity to present our vision for the year 2025 in the shape of a concept car carrier. Although a carrier like this will never be built in entirety, we hope to see its elements in future vessels." (Nils P. Dyvik, Chief Executive Officer, Wallenius Wilhelmsen). Diese Wellenkraftanlage hat die folgenden Nachteile: 1. Sie wird durch die vom Schiff selbst erzeugten Wellen gestört. 2. Sie erhöht auch dann den Fahrtwiderstand, wenn sie keine Energie liefert. 3. Sie ist in der Relation zur Größe des Schiffes zu klein. 4. Es ist nicht nachvollziehbar, wie die Flossen gleichzeitig Energie gewinnen und Energie (als Schiffsantrieb) verbrauchen können.

## Andere Speichermöglichkeiten

Für die Speicherung von Wasserstoff kommen außer der hier gewählten Form der Komprimierung noch andere Möglichkeiten in Betracht. Die wichtigsten sind:

**Kältespeicher** für flüssiges  $H_2$  ( $-253^\circ C$ ).

**Metallhydridspeicher** durch chemische Verbindung von  $H_2$  mit dem Pulver bestimmter Metall-Legierungen in einem Druckbehälter.

Der Kältespeicher für flüssigen Wasserstoff liefert die größte Energiedichte aller bekannten Energiespeicher. Allerdings erfordert die Verflüssigung des Gases eine komplizierte und teure Technik, weshalb wir dem Druckspeicher den Vorzug gegeben haben.

Der Metallhydridspeicher wurde wegen seines hohen Gewichtes verworfen. Diese Eigenschaft wäre allenfalls bei einrumpfigen Schiffen von Vorteil, sofern sie zur Stabilisierung ihrer Lage Ballast benötigen.

Wegen des hohen Gewichtes scheidet auch die Energiespeicherung in **Akkumulatoren** aus. Um die für das Standardszenario "Nord" ermittelte Energiemenge von 39,2 MWh mit Akkumulatoren zu speichern, müssten diese ein Gewicht von 845 t haben (siehe Kapitel „Energie speichern“ im Hauptteil, Abschnitt 4, sowie das Kapitel „Physik“ in diesem Anhang). Allenfalls für den Kurzzeitspeicher kämen Akkumulatoren in Frage.

Bei der **Druckluftspeicherung** ist das Volumen der begrenzende Faktor. Pelte 2002 (Links & Quellen Nr. 34) berechnet für den großtechnischen Bereich eine Energiedichte von 1 kWh /cbm bei einer Kompression von 200 bar und einem Wirkungsgrad von 0,6. Für die oben genannten 38,2 MWh käme man damit auf 38200 cbm. Pelte geht von einer Nutzung der Dekompressionswärme nach dem Prinzip der Wärmepumpe, nicht aber einer Nutzung der Kompressionswärme aus. Selbst wenn sich die Speicherdichte bei 700 bar mehr als verdoppelt und die Kompressionswärme ebenfalls genutzt werden könnte, sieht man sofort, dass diese Speicherart für unsere Zwecke nicht ausreicht. Sogar wenn die Schwimmer insgesamt als Druckluftbehälter ausgebildet wären, würden sie nur etwas über 60 cbm Rauminhalt liefern (siehe das Kapitel „Physik“ in diesem Anhang).

Nicht einmal für den Kurzzeitspeicher käme Druckluft in Frage; in dieser Funktion wird er bei der in der Entwicklung befindlichen Druckluftautos („Links & Quellen“ Nr. 1) verwendet. Um die auf dem Öko-Trimaran über Nacht produzierte Energie von 294 kWh (Standard-Szenario „Nord“) mit Druckluft zu speichern, wären selbst bei 700 bar mehr als die o. g. 60 cbm erforderlich.

Noch eine andere Speichermöglichkeit stellt die kinetische Energie in Form eines „**Gyrospeichers**“ dar. Ein runder Körper mit möglichst

großer Masse wird in Rotation versetzt. Beim Abbremsen wird die Rotationsenergie wieder frei. Bei dem Rotationskörper kann es sich um den Läufer eines kollektorfreien Elektromotors handeln, der beim Abgeben von Energie als Generator funktioniert. Die rotierende Masse besteht in diesem Fall hauptsächlich aus Dauermagneten. Um die Speicherverluste zu minimieren, muss der Läufer auf hochwertigen Wälzlagern laufen; der Innenraum der Maschine muss

evakuiert werden, damit keine Reibungsverluste durch Luft entstehen. Außerdem muss die Maschine kardanisch aufgehängt werden, damit die Bewegungen des Schiffes keine Energieverluste erzeugen.

Das Prinzip wurde bereits bei Omnibussen praktisch erprobt (Links & Quellen Nr. 33); ob es auch bei Schiffen angewandt wurde, ist nicht bekannt.

## Physik (Berechnungen)

### 1. Sonnenenergie

Die Jahresproduktion der Solarzellen im nördlichen Szenario von 12 MWh (S. 9 im Hauptteil) ergibt sich folgendermaßen:

Insgesamt hält sich das Schiff an 64 Tagen/Jahr in Regionen mit einer Globalstrahlung von 800 kWh/Jahr und  $q_m$  auf (Reise: 11 + 3 Tage, Liegezeiten mit und ohne Besatzung 50 Tage). Aus 800 kWh/Jahr = 2,1918 kWh/Tag und einem Wirkungsgrad der Solarzellen von 0,12 ergibt sich  $64 \times 2,1918 \times 0,12 = 16,833$  kWh. In analoger Weise erhält man für die Regionen mit einer Globalstrahlung von 850 kWh/Jahr und 7 Tagen/Jahr einen Betrag von 1,9561 kWh. Auf diese Weise wird der Jahresertrag auch für die anderen Globalstrahlungs-Regionen berechnet. Addiert man diese Beträge, kommt man auf 114,7397 kWh. Wegen der Verschattung ziehen wir davon 20% ab, das sind 22,9479 kWh. Es verbleiben 91,7918 kWh/Jahr. Dieser Betrag bezieht sich auf eine Fläche von einem Quadratmeter. Auf dem Schiff haben wir 132,75  $q_m$  zur Verfügung, wir kommen also auf  $132,75 \times 91,7918 = 12185$  kWh = 12,18 MWh.

### 2. Windenergie

Die Jahresproduktion des Windrades im nördlichen Szenario von 38 MWh/Jahr (Hauptteil, S. 11) kommt folgendermaßen zustande:

Die theoretisch maximale Leistung  $P_{th}$  eines horizontalachsigen Schnellläufers in  $W$  (Watt) berechnet sich nach der Formel:

$$P_{th} = 0,61 \text{ mal } A \text{ mal } v^3$$

Darin ist 0,61 eine Konstante, die mit der Dichte der Luft zusammenhängt,  $A$  die von den Flügeln des Windrades überstrichene Fläche in  $q_m$  und  $v$  die Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe in Meter/Sekunde.

Um die effektive Leistung  $P_{eff}$  eines Windrades zu ermitteln, muss das ganze noch mit dem Wirkungsgrad des Windrades multipliziert werden. Da die Speicherverluste gesondert berücksichtigt werden, setzt sich der Wirkungsgrad zusammen aus dem aerodynamischen Wirkungsgrad der Flügel (0,4) mal dem Lager-Wirkungsgrad (0,95) mal dem Wirkungsgrad des Generators (0,9) = 0,34. Ein Getriebe-Wirkungsgrad entfällt, weil der Rotor des Generators direkt auf der Welle sitzt. Das ist vor allem deshalb möglich, weil das Windrad für den Eloktrolyseur Gleichstrom (Konstanthaltung der Frequenz entfällt) und keine konstante Spannung liefern muss. Somit ist in unserem Fall

$$P_{eff} = 0,34 \text{ mal } P_{th}$$

Als nächstes muss die Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe ermittelt werden. Der Windatlas liefert Windgeschwindigkeiten in 50 m Höhe über Grund bzw. Wasser. Die Nabenhöhe über Wasser beträgt beim Öko-Trimaran 14 m. Die Reduktion der Windgeschwindigkeit mit abnehmender Höhe ist von der Oberflächengestalt abhängig – bei glatten Oberflächen (z.B. Ebenen ohne Bewuchs oder Wasser) ist die Reduktion geringer als bei rauen Oberflächen (z.B. Stadt mit Hochhäusern). Um die Reduktion zu berechnen, wurden verschiedene Formeln vorgeschla-

gen – wir haben uns für die Hellmann-Formel entschieden:

$$v_2 = v_1 (h_2/h_1)^a$$

Darin ist  $v_1$  die Windgeschwindigkeit (m/sec) in 50 m Höhe,  $v_2$  die Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe,  $h_1 = 50\text{m}$ ,  $h_2 = \text{Nabenhöhe} = 14\text{m}$  und  $a$  der sog. „Rauigkeits-Exponent“, der von der Oberfläche der betr. Region abhängt. Für die Operationsgebiete des Öko-Trimaran wurden ausgewählt:

Hafen: 0,4, Ufer vor Steilküste: 0,15, Ufer vor Flachküste: 0,12 und offenes Meer: 0,12.

Die Unterscheidung zwischen „windoffenem“ und „windgeschütztem“ Hafen sowie zwischen „Ufer vor Flachküste“ und „offenes Meer“ kommt in den jeweils unterschiedlichen Windstärken zum Tragen, nicht in dem Rauigkeits-Exponenten.

Die Berechnung der Windradleistung für eine gegebene Windgeschwindigkeit in 50 m Höhe (aus dem Windatlas) und einen gegebenen Rauigkeits-Exponenten beginnt mit der Berechnung der Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe: Beträgt die Windgeschwindigkeit in der betr. Region z.B. 5,5 m/sec und der Rauigkeits-Exponent 0,4, ist die Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe  $v_2 = 5,5(14/50)^{0,4} = 3,29\text{ m/sec}$ . Mit diesem Wert und der Windradfläche  $A = \pi r^2 = 153,9\text{ qm}$  ergibt sich als theoretische Windradleistung  $P_{th} = 0,61\text{ mal } 153,9\text{ mal } 3,29^3 = 3343\text{ W} = 3,343\text{ kW}$ . Die effektive Windradleistung beträgt dann  $P_{eff} = 3,343\text{ mal } 0,34 = 1,137\text{ kW}$ . Das sind in einer Stunde 1,137 kWh, in einem Tag 24 mal so viel, also 27,28 kWh. Dieser Wert muss dann noch mit der Anzahl der Tage multipliziert werden, in denen sich das Schiff in der betr. Windregion aufhält. Berechnet man dies für alle 365 Tage des Jahres und die jeweiligen Regionen, erhält man schließlich die Jahresleistung des Windrades.

### 3. Wasserstoffproduktion

Der Elektrolyseur muss so ausgelegt sein, dass er auch Spitzenwerte der Energieproduktion auf dem Schiff verarbeiten kann. Im „best case scenario“ liefern Sonne, Wind und Wellen zusammen rund 29 kW. Das sind jedoch Durchschnittswerte für das ganze Jahr. Nehmen wir den Faktor 3 als Spitzenwert, kommen wir auf

rund 90 kW. Insoweit erscheint ein Elektrolyseur vom Typ „AGE-20,0“ der Fa. AccaGen (siehe „Links & Quellen“ Nr. 29) geeignet, der einen Spitzenwert von 101 kW verkraftet. Sein Wirkungsgrad wird mit **4,6 kWh/Norm-Kubikmeter H<sub>2</sub>** angegeben. Zur Umrechnung des Wirkungsgrades in die übliche Größe zwischen Null und eins bzw. in einen %-Wert muss der Energieinhalt (kWh) dieses Norm-Kubikmeters bekannt sein. Damit stellt sich die Frage, ob der Brennwert oder der Heizwert zu verwenden ist. Das Gas soll seine Energie in einer Brennstoffzelle umwandeln, in der keine Energieverluste durch in die Atmosphäre entweichenden Wasserdampf entstehen. Also verwenden wir den **Brennwert**. Er beträgt 3,25 kWh/m<sup>3</sup>. Als Wirkungsgrad ergibt sich also  $3,25/4,6 = \mathbf{0,7065}$  oder **71%**.

Im Standard-Szenario „Nord“ werden im Jahr 51448,22 kWh el. Strom zur Speicherung erzeugt, das ergibt 0.7065 mal so viel H<sub>2</sub>. Dieses muss allerdings noch von 200 bar, mit denen es den Elektrolyseur verlässt, auf 700 bar des Speichers komprimiert werden, was zusätzliche Energie verbraucht.

### 4. Wasserstoffspeicherung

Pölte (2002, siehe Links & Quellen Nr. 34) schreibt zum Thema: „Bei der Kompression ... geht ein großer Teil der im Wasserstoff enthaltenen Exergie durch Wärmeaustausch mit der Umgebung verloren. Z.B bei einer Kompression  $r = 200$  beträgt der Wärmeverlust ca 60%. Diese Wärme kann im Prinzip wegen ihrer großen Temperatur von  $T = 1300\text{ K}$  mit hohem Wirkungsgrad in andere, speicherfähige Energieformen gewandelt werden. In der Literatur wird der Gesamtwirkungsgrad für die Speicherung von Wasserstoffgas bei  $r = 30 \dots 80$  mit **0.95** angegeben, was mir aber zu optimistisch erscheint.“

Den isothermischen Wirkungsgrad des Kompressors setzen wir deshalb vorsichtig mit nur 0,9 an. Einige der im obigen Zitat erwähnten Möglichkeiten zur Reduktion der Verlustenergie sind:

**1. Wärme:** tritt – anders als bei den meisten anderen Gasen und Luft – bei der Dekompression von Wasserstoff auf, sofern sie bei Umge-

bungstemperaturen oberhalb von  $-53\text{ °C}$  (sog. Inversionstemperatur) stattfindet. Komprimierter Wasserstoff ist insofern, ganz abgesehen von seinem Heizwert, ein **Wärmespeicher**, mit dem man Wärme beliebig lange speichern kann. Die Wärme kann zum Heizen verwendet werden. Wird keine Heizung benötigt, kann die Wärme zusammen mit der Kälte (nächster Punkt) zum Betreiben eines Sterlingmotors verwendet werden (Ziffer 3).

**2. Kälte** entsteht bei der Kompression von Wasserstoff. Die kann zur **Klimatisierung** auf dem Schiff oder für Kühlschränke verwendet werden – beides verschlingt ansonsten viel Bordenergie. Wird keine Kühlung benötigt, dient die Kälte zusammen mit der Wärme zum Betreiben eines Sterlingmotors (nächster Punkt).

**3. Kombination von Wärme und Kälte:** Oft fallen Wärme und Kälte auf dem Schiff gleichzeitig an, wenn nämlich Energie (in Form komprimierten Wasserstoffs) gespeichert und gleichzeitig verbraucht wird. Das sind besonders günstige Voraussetzungen zum Betreiben eines **Sterlingmotors**, denn seine Leistung steigt mit dem Temperaturgefälle zwischen dem warmen und kalten Teil seines Zylinders (zur Funktionsweise siehe „Links & Quellen“ Nr. 22 und 23). Mit dem Sterlingmotor kann ein Stromgenerator angetrieben werden, der einen Teil der Verlustenergie in Nutzenergie zurückverwandelt.

**4. Gasexpansionsmotor:** Wenn Energie auf dem Schiff benötigt wird, muss Wasserstoffgas aus den Druckbehältern entnommen werden, und zwar unter Druckreduktion. Diese wird im einfachsten Fall durch ein Drosselventil erzielt. An seiner Stelle kann aber auch ein Gasexpansionsmotor verwendet werden, wie er z.B. in der Erdgastechnik in Gebrauch ist. Er funktioniert wie eine Dampfmaschine, nur dass ihn anstelle des komprimierten Wasserdampfes ein komprimiertes Gas antreibt. Der Gasexpansionsmotor ist ebenfalls mit einem Stromgenerator verbunden.

## 5. Schiffsantrieb

Um die für den Schiffsantrieb verfügbare Energie zu berechnen, werden zunächst die Jahreserträge der drei Energiequellen (Sonne, Wind und Wellen) auf den Tag umgerechnet, und zwar getrennt für die Liege- und Reise-

zeiten, weil hierfür die Wind- und Sonnenverhältnisse unterschiedlich sind.

		kWh
WL	Wind Liegez. tägl.	101,00
WR	Wind Reisez. tägl.	313,09
SL	Sonne Liegez. tägl.	33,67
SR	Sonne Reisez. tägl.	33,44
ML	Wellen Liegez. tägl.	156,55
MR	Wellen Reise tägl.	156,55

In der obigen Tabelle sind die Ergebnisse für das Standard-Szenario „Nord“ dargestellt – an diesem Beispiel soll der weitere Rechengang erläutert werden. Für die Wellen wird der Ertrag im Hafen gleich Null gesetzt, für die Liegezeiten außerhalb des Hafens wird der Ertrag als identisch mit dem während der Reise angenommen und dieser wiederum als die Hälfte des Windertrages während der Reise, wie im Abschnitt „Die beweglichen Schwimmer als Wellenkraftwerk – Energieausbeute“ des Hauptteils bereits ausgeführt und begründet. Berechnet wird nacheinander:

**Für den Speicher am Ende aller Liegetage produzierte Energie SP** in kWh (als  $\text{H}_2$ ):

$$SP = (WL * LT + SL * LT + ML * AH - VO * LO - VM * LM) * \eta_s,$$

wobei LT = Anzahl der Liegetage, AH = Anzahl der Liegetage außer Hafen, VO = Energieverbrauch auf dem Schiff ohne Besatzung (kWh), LO = Liegetage ohne Besatzung und VM = Energieverbrauch auf dem Schiff mit Besatzung (kWh), LM = Liegetage mit Besatzung und  $\eta_s$  = Wirkungsgrad zur Umwandlung in speicherfähige Energie. Die restlichen Abkürzungen sind der Tabelle links zu entnehmen.

Setzt man die Werte für das „Standard-szenario Nord“ ein, erhält man:

$$SP = (101 \text{ kWh} * 323 + 33,67 \text{ kWh} * 323 + 156,55 \text{ kWh} * 178 - 0,1 \text{ kWh} * 50 - 33,8 \text{ kWh} * 273) * 0,71 = \mathbf{44114 \text{ kWh}}.$$

Das ist der Energieinhalt des im Laufe von 323 Liegetagen an Bord produzierten Wasserstoffs. Er muss noch komprimiert werden, wofür wir bereits einen Wirkungsgrad von 0,9 veranschlagt hatten: Der Energieinhalt des von 200 auf 700 bar komprimierten Wasserstoffs ist somit  $44114 \text{ kWh} * 0,9 = \mathbf{39702 \text{ kWh}}$ . Für weitere Umrechnungen be-

dienen wir uns der folgenden Eigenschaften des Wasserstoffgases unter dem Druck von 1 bar und 20 °C:

1 kWh = 0,025 kg H <sub>2</sub>
1 kg = 40 kWh
1 m <sup>3</sup> = 0,0899 kg
1 kg = 11,12 m <sup>3</sup>

Der komprimierte Wasserstoff mit einem Brennwert von 39702 kWh wiegt 39702 kWh \* 0,025 kg = **992 kg**, sein Volumen bei 700 bar ist  $992 * 11,12 / 700 = 15,77 \text{ m}^3$ . Dieses Volumen wird auf die drei Schwimmer verteilt, pro Schwimmer also  $5,26 \text{ m}^3$ . Die Druckbehälter sind zylinderförmig mit je einer halbkugeligen Abdeckung auf beiden Seiten. Setzt man den Radius des Zylinders und der Halbkugeln mit 0,5 m an und die Höhe des Zylinders mit 5,4 m, kommt man auf ein Volumen von  $\frac{4}{3}\pi r^2 + \pi r^2 h = \frac{4}{3} * 3,1416 * 0,25 + 3,1416 * 0,25 * 5,4 = 1,0472 + 4,2412 = 5,29 \text{ m}^3$ . Die Länge der drei Behälters ist jeweils  $5,4 \text{ m} + 2 * 0,5 \text{ m} = 6,4 \text{ m}$ .

Der während der Liegetage produzierte Wasserstoff mit einem Energieinhalt von 39702 kWh steht für die Reisetage (hier angenommen: 42 Tage) zur Verfügung. Die Bordenergie für die Reise kommt aus dem Kurzzeitspeicher, so dass die Energie aus dem Langzeitspeicher vollständig für die Schiffsmotoren verwendet werden kann - das sind also pro Reisetag  $39702 \text{ kWh} / 42 = 945 \text{ kWh}$ . Da wir 6 Betriebsstunden/Tag angenommen hatten, kommen wir auf  $945 \text{ kWh} / 6 \text{ h} = 157 \text{ kW}$  Motorleistung.

Das wird ergänzt durch die **während der Reise direkt produzierte Energie**: Aus der Tabelle links auf S. 9 ist zu entnehmen: Windenergie während 24 h = 313 kWh, also pro Stunde  $313 \text{ kWh} / 24 \text{ h} = 13 \text{ kW}$ . Bei der Sonnenenergie gehen wir davon aus, dass die

33,44 kWh (Tabelle) nur während der hellen Stunden des Reisetages produziert werden, so dass wir vereinfacht rechnen:  $33,44 \text{ kWh} / 6 \text{ h} = 5,57 \text{ kW}$ . Bei der Wellenenergie gehen wir von der halben Windenergie aus, also **6,52 kW**. **Macht zusammen 25 kW**.

Schließlich steht den Motoren noch Energie aus dem **Kurzzeitspeicher** zur Verfügung, allerdings abzüglich der Bordenergie von 33,8 kWh / Tag, die ebenfalls dem Kurzzeitspeicher entnommen wird. Dieser wird während der 18 Stunden des Tages bzw. der Nacht gefüllt, während der die Motoren nicht laufen. Zunächst zur **Füllung** des Kurzzeitspeichers: Weil das vorwiegend in den Nachtstunden erfolgt, lassen wir die Sonnenenergie außen vor. Wind und Wellen ergeben  $13 \text{ kW} + 6,52 \text{ kW}$ , während 18 Stunden sind das  $351 \text{ kWh} / \text{Tag}$ . Daraus wird mit einem Wirkungsgrad von 0,7 Wasserstoff hergestellt, es verbleiben 246 kWh. Der Wasserstoff wird mit einem Wirkungsgrad von 0,9 verdichtet, der Rest beträgt 221 kWh. Die Brennstoffzelle wandelt mit einem Wirkungsgrad von 0,71 in Nutzenergie um, es verbleiben schließlich 157 kWh. Davon wird der Verbrauch an Bordenergie (33,8 kWh/Tag) abgezogen, es verbleiben 123 kWh/Tag, die den Motoren zusätzlich zur Verfügung stehen. Verteilt auf 6 Stunden Betriebsdauer sind das  $123 \text{ kWh} / 6 \text{ h} = 20,53 \text{ kW}$ .

Zum Antrieb der Motoren steht also zur Verfügung:

Aus direkter Energieproduktion: 25 kW

Direkt + Kurzzeitspeicher:  $25 + 20,5 = 45,5 \text{ kW}$ .

Direkt + Kurzzeitspeicher + Langzeitspeicher:  $45,5 + 157 = 202,5 \text{ kW}$ .

## Andere Schiffsantriebe

### 1. Der Propeller (Schiffsschraube)

Als Schiffsantrieb hat sich heute allgemein der Propeller (Schiffsschraube) durchgesetzt. Der Grund ist wohl seine kompakte Bauweise und seine Drehbewegung, die eine unmittelbare Umsetzung der von den Schiffsmotoren (Dieselmo-

toren oder Turbinen) erzeugten Drehbewegung erlaubt. Er hat jedoch auch Nachteile:

**1. Die komplizierte Konstruktion.** Die Wirkung beruht auf dem Auftriebseffekt, der durch die Schrägstellung der Propellerflügel zur Rotationsebene erzeugt wird ("Anstellung"); zusätzlich ist dazu noch der gewölbte Rücken (die nach vorn gerichtete Seite des Propellerflügels) erforder-

derlich. Dieser Auftriebseffekt setzt sich zusammen aus einem Überdruck, der hinter dem Propeller im Wasser entsteht, und einem Unterdruck vor dem Propeller. Der Unterdruck senkt den Siedepunkt des Wassers u.U. so weit, dass sich örtlich Dampfblasen bilden, sog. "Kavitationen". Diese bewirken ein Abreißen der Wasserströmung am Propeller und damit einen Leistungsabfall. Außerdem implodieren sie sehr plötzlich, wenn der Unterdruck wieder verschwindet und sie können dann Materialschäden am Propeller verursachen. Um solche Kavitationen zu vermeiden oder sie in Regionen zu verlagern, in denen sie keinen Schaden anrichten, ist eine sehr genaue rechnerische Konstruktion des Propellers erforderlich, die dann auch empirisch überprüft und optimiert werden muss. Letzteres erfolgt in sog. "Kavitationstunneln" der schiffbautechnischen Versuchsanstalten. Das sind riesige, über mehrere Stockwerke reichende ringförmige wasserdurchströmte Tunnels, in denen der zu entwickelnde Propeller aufgehängt und die Kavitationsbildung bei verschiedenen Drehzahlen und Strömungsgeschwindigkeiten des Wassers beobachtet wird.

**2. Der Radeffekt** (Schraubeneffekt) beruht darauf, dass die Propellerflügel ihre Leistung in tieferen Wasserschichten wegen des dort höheren Drucks besser an das Wasser abgeben können als in höheren Schichten. Weil sich aber die Flügel in der Tiefe z.B. nach links bewegen, oben aber nach rechts, wird das Heck in diesem Fall nach rechts gedrückt. Bei der Geradeausfahrt muss gegengesteuert werden, was aber zusätzliche Antriebsenergie erfordert (siehe Abschnitt "Dynamik des Kurvenfahrens" im Anhang).

**3. Radialströmung:** für den Vortrieb des Schiffes ist die vom Propeller erzeugte Axialströmung maßgeblich, also die nach hinten gerichtete Strömung. Der Propeller erzeugt aber wegen seiner Drehbewegung auch eine Radialströmung (wie eine Kreiselpumpe). Auch dafür muss Energie aufgebracht werden, die aber für den Vortrieb verloren geht. Das mindert den Wirkungsgrad des Propellers. Eine Verbesserung kann durch einen sog. „Tunnel“ erreicht werden – ein kurzes Rohr, das den Propeller umgibt, oder durch Endplatten an den einzelnen Flügeln des Propellers, wodurch die Radialströmung in

eine Axialströmung umgewandelt wird (Links & Quellen Nr. 35 und 36).

**4. Umweltschäden:** Die Kavitationen, die nicht immer ganz vermieden werden können, erzeugen Unterwasserlärm und Stoßwellen. Beides ist schädlich für die Unterwasserfauna und wasserbautechnischen Anlagen. Der rotierende Propeller selbst ist eine Gefahr für Tiere und Menschen im Wasser. Auch der Lärm im Schiff selbst wird nicht nur durch die Motoren, sondern eben auch durch den Propeller erzeugt.

Insgesamt ist der Propeller als kompliziert, teuer und umweltschädigend einzuordnen – das Gegenteil dessen, was man unter "sanfter" oder "angepasster" Technik versteht. Nur unter günstigen Betriebsbedingungen erreicht er einen Wirkungsgrad von maximal 80%.

Neben die allgemeinen Nachteile des Propellers treten noch **spezielle Probleme beim Öko-Trimaran**, die mit der Beweglichkeit der Schwimmer zusammenhängen. Vorausgeschickt werden muss, dass die Propeller normalerweise am Heck sitzen: Das hat sich aus strömungstechnischen Gründen als vorteilhaft erwiesen. Die speziellen Probleme beim „Öko-Trimaran“ sind:

1. Bei den beweglichen Schwimmern hebt sich das Heck im Wellengang öfter aus dem Wasser heraus; die dort befindlichen Propeller würden dann leer laufen. Günstiger wäre eine Antriebsmechanismus, der sich nicht am Heck befindet.

2. Der Radeffekt wirkt sich bei beweglichen Schwimmern noch stärker aus als bei einrumpfigen Schiffen. Deshalb müsste jeder Schwimmer mit zwei gegenläufigen Propellern ausgestattet werden. Das verkompliziert und verteuert die Konstruktion.

3. Ein Antriebsmechanismus am Heck würde die Beweglichkeit der Schwimmer um die vertikale Achse hemmen. Optimal wäre ein Antrieb in der Nähe der vertikalen Achse (also mittschiffs).

Um diese Nachteile zu vermeiden, haben wir uns für die Pod-Anordnung entschieden, die aber den Nachteil hat, den Tiefgang des Schiffes zu vergrößern; die Positionierung der Gondeln unterhalb der tiefsten Stelle der Schwimmer führt

zur Gefahr der Beschädigung der Propeller bei der Navigation in Flachwassergebieten.

## 2. Der Voith-Schneider-Antrieb

besteht aus einer waagrecht unter dem Schiffsrumpf angebrachten Scheibe, die mit einer senkrechten Welle in Drehung versetzt wird. Am Rand der Scheibe sind 3 – 7 spatenförmige Flügel angebracht, die senkrecht nach unten zeigen und sich um je eine eigene senkrechte Achse drehen können. Mittels Exzenter und Gestänge werden die Flügel so gesteuert, dass sie sich, wenn sie sich mit der Scheibe in Fahrtrichtung des Schiffes bewegen, parallel zu dieser einstellen und so kaum einen Strömungswiderstand darstellen. Während der Bewegung der Flügel quer zur Fahrtrichtung werden sie schräg zum Rand der Scheibe gestellt und erzeugen so einen Auftrieb, der den nötigen Schub bewirkt.

Der Vorteil dieser Antriebsart besteht darin, dass er durch Verstellung des Exzenters seine Schubrichtung beliebig verändern kann, womit die damit ausgestatteten Schiffe eine große Wendigkeit aufweisen und ohne Steuerruder auskommen. Nachteilig ist die komplizierte Bauweise und ein geringerer Wirkungsgrad gegenüber dem Propeller.

Am Öko-Trimaran könnte der Voith-Schneider-Antrieb auch unter der Mitte der Schwimmer angebracht werden, womit einige Nachteile des Propellers entfallen würden. Dafür käme ein neues Problem hinzu: Dieser Antrieb erzeugt immer ein Drehmoment entgegen seiner Drehrichtung, so dass sich der Schwimmer quer zur Fahrtrichtung stellen würde. Zwar könnte man gegensteuern, was aber wieder zusätzliche Energie kosten würde. Deshalb kommt diese Antriebsart für den Öko-Trimaran nicht in Frage.

## 3. Der inversionskinematische Antrieb

Auch als **Dettwiler-Antrieb** (nach dem Erfinder) bezeichnet (Links & Quellen Nr. 13). Er entspricht dem Voith-Schneider-Antrieb, nur wird die Stellung der Flügel mit einem Planetengetriebe anstelle des Exzenters gesteuert. Das hat den Nachteil, dass die Umdrehung der Flügel um ihre eigene Vertikalachse völlig gleichmäßig ist. Dagegen kann diese Umdrehung beim Voith-

Schneider-Antrieb mittels des Exzenters auch unregelmäßig gestaltet und auf diese Weise eine Optimierung vorgenommen werden. Ein Vorteil des Dettwiler-Antriebs besteht darin, dass die Flügel nicht nur den Auftriebseffekt, sondern zusätzlich eine Stauwirkung in Schub umsetzen. Für den Öko-Trimaran kommt der Dettwiler-Antrieb aus den gleichen Gründen, die gegen den Voith-Schneider-Antrieb sprechen, nicht in Frage.

## 4. Der Strahlantrieb

Auch Jet-Antrieb oder Wasserstrahl-Antrieb genannt. Eine Kreiselpumpe oder ein Propeller in einem Rohr saugt Wasser an und stößt es nach hinten aus. Dieser Antrieb ist laut, braucht Motoren mit hohen Drehzahlen und hat einen geringen Wirkungsgrad; er wird deshalb vorzugsweise für Sport- und Polizeiboote verwendet (Treibstoffverbrauch zweitrangig).

Eine spezielle Variante des Strahlantriebes wäre die Strahlpumpe, bei der Druckluft durch eine Düse in ein Rohr geblasen wird. Dadurch saugt es vorne Wasser an und stößt hinten ein Wasser-Luft-Gemisch aus. Für den Öko-Trimaran mit Druckluftspeicher besticht diese Anordnung durch ihre extreme Einfachheit; allerdings wird der Wirkungsgrad von Strahlpumpen mit nur maximal 30% angegeben (**Links & Quellen** Nr. 10, S. 1184), weshalb diese Antriebsform allenfalls als Zusatzantrieb zum Navigieren im Hafenbereich in Betracht kommt (Bugstrahlruder).

## 5. Der Zentrifugalantrieb

Einer der beim Propeller erwähnten Nachteile war es, dass er neben der erwünschten Achsialströmung auch eine Radialströmung erzeugt, die nicht zum Schub beiträgt und insofern Verlustenergie ist. Dieser Nachteil wird bei dem Zentrifugalantrieb (Links & Quellen Nr. 14) in einen Vorteil umgewandelt. An die Stelle der Schiffsschraube tritt der Läufer einer Kreiselpumpe, der entweder mit einer vertikalen Welle angetrieben wird, oder mit einer horizontalen Welle im rechten Winkel zur Fahrtrichtung. Gegen die Fahrtrichtung ist der Läufer durch ein Gehäuse abgeschirmt, so dass die auch dort erzeugte Radialströmung nicht nach außen treten kann. Die am Gehäuse abprallende und umge-

lenkte Radialstömung erzeugt den erforderlichen Schub. Zusätzlich wirkt der Schub des Wasserstroms, der aus dem nicht abgedeckten Teil des Läufers direkt nach hinten gerichtet ist. Der bei horizontaler Anordnung der Welle eintretende Radeffekt kann durch eine doppelte Ausführung mit entgegengesetzter Drehrichtung vermieden werden – eine Lösung, die auch beim Propeller angewandt werden kann, aber natürlich eine Verteuerung mit sich bringt. Inwieweit die anderen Nachteile des Propellers vermieden oder gemindert werden können, muss sich noch zeigen; der Antrieb befindet sich noch in der Entwicklung.

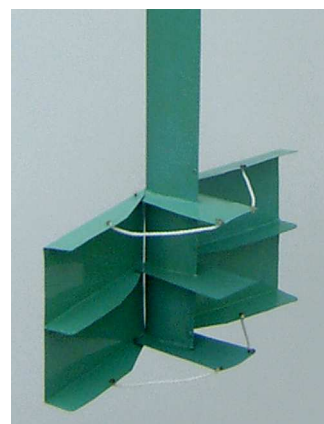
## 6. Das Schaufelrad

ist von den alten Raddampfern bekannt, die vereinzelt noch aus Nostalgiegründen in Betrieb sind. In seiner technisch ausgereiften Form sind die Schaufeln exzentriergesteuert und bewegen sich unter Wasser immer in einer annähernd senkrechten Position (Links & Quellen Nr. 15). Das Schaufelrad hat einen besseren Wirkungsgrad als die Schiffsschraube und stellt eine "sanftere" Technik dar, weil es mit langsameren Drehzahlen auskommt. Vermutlich wegen seines großen Raumbedarfs vor allem oberhalb der Wasseroberfläche, der sich besonders im Hochseebetrieb störend auswirkt, ist er aus der Mode gekommen. An der schiffbautechnischen Versuchsanstalt Potsdam wird aber derzeit untersucht, ob das Schaufelrad etwa für die Elbeschifffahrt wieder in Frage kommt, wo er vor allem bei niedrigem Wasserstand Vorteile bietet. An den schlanken Schwimmern des Öko-Trimarans würde ein Schaufelradantrieb wegen seines großen Raumbedarfs allerdings sehr störend wirken.

## 7. der Flossenantrieb

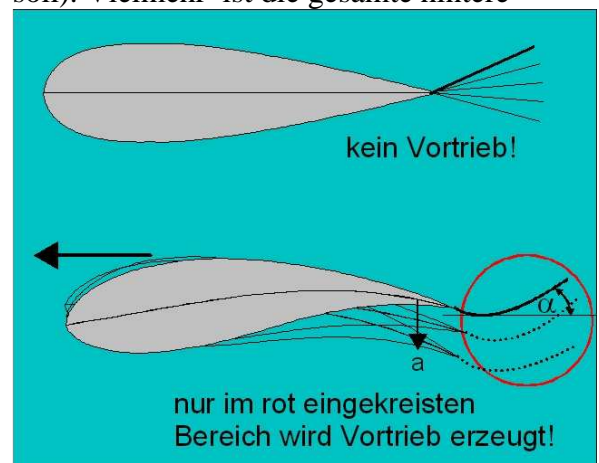
Für ihn liefert die Natur drei unterschiedliche Vorbilder:

**7.1 Entenfuß-Antrieb** nach dem Vorbild der Wasservögel: Bei der Vorwärtsbewegung unter Wasser faltet sich das Paddel zusammen, bei der Rückwärtsbewegung breitet es sich aus und erzeugt den für den Antrieb erforderlichen Widerstand. Die Abbildungen einer eigenen Entwicklung zeigen links oben das Paddel während



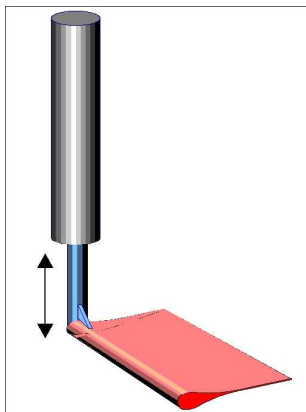
Der Entfaltung (Beginn der Rückbewegung), rechts oben das zusammenfaltete Paddel während der Vorwärtsbewegung (Minimaler Widerstand) und unten das Paddel in entfaltetem Zustand.

**7.2 Der Schwanzflossenantrieb** resultiert nicht aus der einfachen Hin- und Herbewegung der Flosse (oben in der folgenden Abbildung), die einen Fisch von oben gesehen darstellen soll). Vielmehr ist die gesamte hintere

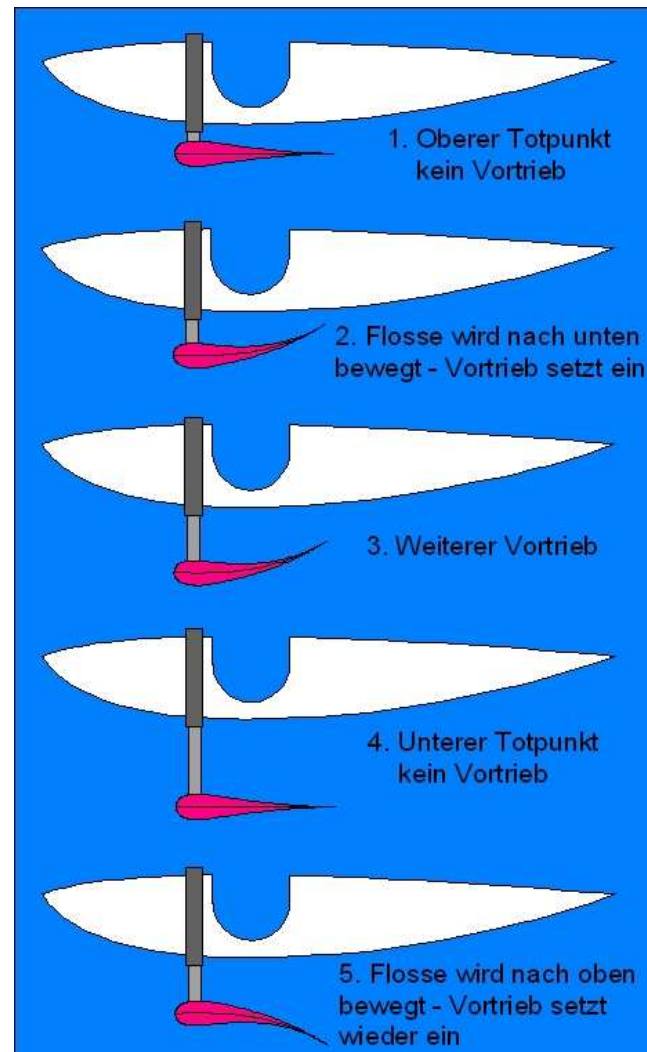
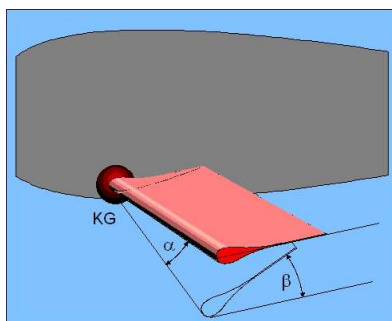


Partie des Fischkörpers beteiligt, also der muskulöse Schwanz. Bewegt sich dieser nach links (in Schwimmrichtung gesehen, siehe vorangehende Abb., Pfeil a), krümmt sich die Schwanzflosse passiv aufgrund ihrer Elastizität und des Wasserwiderstandes nach rechts. Dadurch entsteht ein **Anstellwinkel  $\alpha$** , welcher bei der Bewegung der Schwanzflosse nach links den eigentlichen Vortrieb erzeugt.

Bei einer bionischen Anwendung muss diese Flosse nicht unbedingt am Heck des Schiffes befestigt sein. An dieser Stelle würde sie beim Öko-Trimaran die passive Beweglichkeit der Schwimmer um die vertikale Achse empfindlich stören und eine andauernde Stampfbewegung auslösen. Unter Beibehaltung des Antriebsprinzips kann die „Schwanz“-Flosse auch an anderen



Stellen platziert werden. Die Abb. oben zeigt eine Ausführung mit hydraulischer Auf- und Abbewegung. Diese Antriebseinheiten können seitlich an den Schwimmern angebracht werden, wodurch die o. g. Nachteile vermieden



werden. In der Abb. oben ist die Bewegungsabfolge dargestellt.

7.3 *Der Armflossenantrieb* entspricht der Unterwasserbewegung der Pinguine und Meereschildkröten. Voraussetzung für seine Funktion ist ein Kugelgelenk (KG in der Abb. links), um das der Arm um den Winkel  $\alpha$  nach unten oder oben bewegt wird, also in einer Ebene senkrecht zur Fahrtrichtung. Gleichzeitig dreht sich der Arm um seine Längsachse im Kugelgelenk, und zwar um den Winkel  $\beta$ . Diese Drehung erfolgt passiv durch den Wasserwiderstand und ist durch einen Anschlag begrenzt. Der Winkel  $\beta$  fungiert also als Anstellwinkel im Wasser, der bei der Auf- und Abbewegung des Armes eine Strömung nach hinten und damit den Vortrieb des Tieres bzw. Schiffes erzeugt. Auch bei dieser Antriebsform gibt es einen oberen und unteren Totpunkt, und zwar bei der Bewegungsumkehr des Armes mit gleichzeitigem Wechsel des Anschlagwinkels  $\beta$ .

Der Unterschied zwischen dem Schwanz- und dem Armflossenantrieb besteht darin, dass sich die Armflosse immer um ein Kugelgelenk dreht, welches sich an der Außenfläche des (Tier- oder Schiffs-) Rumpfes befindet. Dagegen wird die Schwanzflosse ohne ein Gelenk in großem Bogen oder geradlinig quer zur Schwimmrichtung durch das Wasser bewegt.

Bei einem Vergleich dieser verschiedenen Flossenantriebe ist es hilfreich zu überlegen, welche Wassermassen in jeder Bewegungsphase nach hinten geschoben werden. Daraus resultiert nämlich der erzeugte Vorschub („Repulsion = Propulsion“). Bei dem **Entenfußantrieb** ist diese Wassermasse eine Funktion der aufgeklappten Fußflossen-Fläche. Er arbeitet nach dem sog. **Widerstandsprinzip**: Der Vortrieb

resultiert aus dem Widerstand, den die aufgeklappte Flosse im Wasser findet.

Die **anderen Flossenantriebe** gehorchen stattdessen dem sog. **Auftriebsprinzip**. Bei ihm ist der Vortrieb eine Funktion des von der Flosse bei ihrer Bewegung überstrichenen Wasserquerschnitts, der in der Regel viel größer ist als die Flossenfläche selbst. Bei gleicher Flossenfläche ist demnach der Schwanzflossenantrieb und der Armantrieb wirkungsvoller als der Entenfußantrieb.

Die **Wirkungsgrade** der verschiedenen Flossenantriebe konnten bisher noch nicht recherchiert werden. Es gibt eine Reihe von Forschungsarbeiten, die noch studiert werden müssen (Stand: Mitte Mai 2007).

## Andere umweltfreundliche Motorschiffe

Für die Binnen-Personenschifffahrt wurden **Solarschiffe** entwickelt und gebaut, die mit Solarzellen bestückt sind und den damit gewonnenen elektrischen Strom in Akkumulatoren speichern. Als Beispiel sei hier die Werft „Kopf Solar design“ genannt (Links & Quellen Nr. 16).

Ein Hochsee-Solarschiff wurde von der Schweizer Fa. MW Line SA (Links & Quellen Nr. 38) entwickelt und gebaut, das im Sommer 2007 den Atlantik überqueren und am 8. Mai New York erreichen soll. Verlauf der Reise: Links & Quellen Nr. 31).

Die australische Werft "Solar Sailor Holdings Ltd" stellt Hochseeyachten her, bei denen die Solarpanels aufrecht stehen und auf diese Weise **gleichzeitig als Segel** dienen (Links & Quellen Nr. 37).

In der kommerziellen Hochsee-Schifffahrt wird der Wind heute nur noch als **Zusatzenergie** in Betracht gezogen. Bei Frachtschiffen werden Segel vorgeschlagen, deren Bedienung mit mechanischen Mitteln erfolgt, also nur geringe zusätzliche Personalkosten verursacht (Links & Quellen Nr. 17). Bisher ist nur eine Realisation bekannt geworden, und zwar bei einem kleineren japanischen Frachtschiff während der "ersten Ölkrise" 1973. Nach dem Fallen der Ölpreise wurde dieses Experiment jedoch wieder eingestellt.

Eine besondere Art zur Nutzung der Windenergie ist das **Drachensegel**. Die Firma Skysails entwickelt diesen Zusatzantrieb sowohl für Yachten, der 2007 serienreif sein soll, wie auch für Frachtschiffe, die 2008 in die Produktion gehen soll (Links & Quellen Nr. 18).

Die **Flettner-Rotoren** werden zwar immer wieder in die Diskussion gebracht, in neuerer Zeit sind jedoch keine Realisationen bei größeren Schiffen mehr bekannt geworden.

Im Bereich der Sport-Schifffahrt gibt es Einzelinitiativen zur Nutzung der Windenergie mittels **Windrädern**. Es handelt sich durchweg um Schnellläufer mit horizontaler Achse auf Katamaranen mit einem Direktantrieb über Schiffspropeller. Ein Beispiel ist in „Links & Quellen“ Nr. 19 zu finden.

Schiffe mit **mobilem Wellenkraftwerk** wurden bisher nur ganz vereinzelt konzipiert – diese Versuche wurden bereits im Kapitel "andere Wellenkraftwerke" dargestellt. Dort wurde auch das Projekt "Orcelle") der Reederei Wallenius Wilhelmsen beschrieben (Links & Quellen Nr. 7) – der einzige Versuch, die Energie von **Wind, Sonne und Wellen gleichzeitig zu nutzen** und zu speichern. Die Angaben über die Realisation des Projekts sind jedoch sehr vage – es ist fraglich, ob dieses Schiff jemals gebaut wird.

**Facit:** Offenbar wurde bisher noch nie ein Motorschiff gebaut, das **gleichzeitig alle** auf dem Meer verfügbaren Energiequellen nutzt. Am weitesten in diese Richtung gehen Versuche, Wind- und Sonnenenergie zu kombinieren: Aufrecht stehende Solarpanels dienen gleichzeitig als Segel. Damit wird man aber nicht weit kommen, denn die optimale Ausrichtung auf die Sonne

dürfte nur selten mit der optimalen Ausrichtung zum Wind überein stimmen. Dazu kommen statische Probleme bei starkem Wind und der Umstand, dass gerade in den sonnenreichen Regionen der Meere die Sonne einen steilen Einfallswinkel hat, also durch mehr oder weniger senkrecht stehende Solarpanels nur schlecht genutzt werden kann.

## Links und Quellen

1. Druckluftauto: <http://www.mdi.lu/>
2. Halbtaucherschiff: (<http://www.abeking.com/flash.html>). Siehe dort unter "SWATH")
3. Patentantrag für Schwimmer als Wellenkraftwerk: <http://depatisnet.dpma.de/> > Recherche > Patente & Gebrauchsmuster > Einsteiger-Recherche > DE10300599.4
4. Von 6 Solarbatterien (Bleisammler) dreier Hersteller (Banner, Sonnenschein, DETA) wurde das durchschnittliche Leistungsgewicht (kg/kWh) mit 22,7 kg berechnet. Multipliziert mit den 315 kWh des Druckluftspeichers ergibt sich ein Wert von 7150 kg Gesamtgewicht der Akkus.
5. Literatur über Windräder: Crome, Horst: Windenergie Praxis. Kassel, 2. Aufl. 1989. König, Felix von: Wie man Windräder baut. München, 3. Aufl. 1979. Menny, Klaus: Strömungsmaschinen. Stuttgart u.a., 4. Aufl. 2003
6. Pelamis Wellenkraftwerk: <http://www.oceanpd.com/>
7. Umweltfreundlicher Autotransporter: <http://www.2wglobal.com/www/newsFeatures/expo.jsp>
8. Speichermöglichkeiten für Wasserstoff: [http://www.energieportal24.de/wasserstoff\\_h2-motor.php](http://www.energieportal24.de/wasserstoff_h2-motor.php)
9. Brennstoffzellen: <http://www.diebrennstoffzelle.de/>
10. Böge, Alfred (Hrsg.): Das Techniker Handbuch. Braunschweig, Wiesbaden 16. Aufl. 2000
11. Schiffspropeller: <http://de.wikipedia.org/wiki/Propeller>
12. Voith-Schneider-Antrieb: [http://www.voithturbo.de/vt\\_de\\_pua\\_marine\\_vspropeller.htm](http://www.voithturbo.de/vt_de_pua_marine_vspropeller.htm)
13. inversionskinematischer Antrieb: <http://www.thurgautravel.ch/inv/de/index.htm>
14. Zentrifugalantrieb: <http://www.hansa-online.de/print.asp?artikelID=535>
15. Schaufelrad: <http://wissenglobal.de/Schaufelrad.html>
16. Solarschiffe: <http://www.kopf-solardesign.de/>
17. Windantrieb für Handelsschiffe: <http://www.windschiffe.de/>
18. Drachensegel: <http://www.skysails.info/>
19. Katamaran mit Windradantrieb: [http://foxxaero.homestead.com/indrad\\_007.html](http://foxxaero.homestead.com/indrad_007.html)
20. Moderner Dampfmotor: [http://www.enginion.com/de/web/technologie/Start\\_1.htm](http://www.enginion.com/de/web/technologie/Start_1.htm)
21. Flettner-Rotor: <http://de.wikipedia.org/wiki/Flettner-rotor>
22. Stirlingmotor, klassisch: <http://www.k-wz.de/vmotor/stirling.html>
23. Freikolben-Stirlingmotor: <http://www.energie.ch/themen/haustechnik/stirling/>

24. PM-Magazin, erscheint monatlich bei Gruner & Jahr, München
25. Brennstoffzellen-Newsletter: <http://213.133.112.117/BSZNLArchiv/newsletter0163.html>
26. Bordstromverbrauch bei konventionellen Yachten: <http://www.mcalc.com/>
27. Globalstrahlungskarten: [http://re.jrc.cec.eu.int/pvgis/pv/countries/europe/g13y\\_eu.png](http://re.jrc.cec.eu.int/pvgis/pv/countries/europe/g13y_eu.png)
28. Europäischer Windatlas: <http://www.windatlas.dk/Europe/oceanmap.html>
29. Elektrolyseure der Fa. AccaGen: <http://www.accagen.com/age-family.htm>
30. Crash-Versuche mit Wasserstoffauto:  
[http://shortnews.stern.de/shownews.cfm?id=436890&news\\_archive=1&CFID=32905160&CF\\_TOKEN=81914706](http://shortnews.stern.de/shownews.cfm?id=436890&news_archive=1&CFID=32905160&CF_TOKEN=81914706)
31. Solar-Katamaran, Atlantiküberquerung:<http://www.transatlantic21.ch/>
32. Faltflügel-Windrad: <http://youtube.com/watch?v=MZhHCyuEEDk&search=wind%20energy>
33. Gyro-Omnibus: <http://de.wikipedia.org/wiki/Gyrobus>
34. Wasserstoffspeicherung: [http://energie1.physik.uni-heidelberg.de/vrlsg/data/kap6/chem\\_s.htm](http://energie1.physik.uni-heidelberg.de/vrlsg/data/kap6/chem_s.htm)
35. Stein, von der Norbert: Konvergierende Entwicklungslinien der Düsenanordnung und der modernen Tunnelformgebung bei hochbelasteten Flachwasserschiffen als Grundlage einer neuen integrierten Düsenanordnung für Ruderpropeller. In Wietasch, Klaus (Hrsg.): 14. Duisburger Kolloquium Schiffstechnik/Meerestechnik: Das Schiff und der Antrieb, S. 150 - 175. Duisburg, 3. Aufl. 2001
36. Meyne, Klaus: Propeller – neue Entwicklungen. In Wietasch, Klaus (Hrsg. – siehe Nr. 35), S. 136 – 149.
37. Solarsailor: <http://www.solarsailor.com.au/solutions.htm>
38. Schweizer Solarschiff-Bauer WM Line SA: <http://www.mwline.ch/>
39. „Twister“ – eine Weiterentwicklung des H-Rotors: [http://www.hs-bremerhaven.de/Twister\\_zieht\\_Energie\\_aus\\_jeder\\_Windstaerke\\_Weiterentwicklung\\_des\\_H-Rotors\\_wird\\_praktisch\\_erprobt.html](http://www.hs-bremerhaven.de/Twister_zieht_Energie_aus_jeder_Windstaerke_Weiterentwicklung_des_H-Rotors_wird_praktisch_erprobt.html)