

Die Physik der Hydrofoils im Segelsport

Eric Pernet

26. August 2024

Betreuer: Dipl.Phys. ETH Bernhard Brunner

Maturaarbeit im Fach Physik, Kantonsschule Kreuzlingen



Inhaltsverzeichnis

1	Abstract	3
2	Vorwort	4
3	Einleitung	5
4	Theorieteil	6
4.1	Geschichte	6
4.2	Funktion	9
4.3	Verschiedene Arten gefoilter Segelboote	13
4.3.1	America's Cup	13
4.3.2	Imoca class	15
4.3.3	69F	16
4.4	International Class Moth	18
4.4.1	Aufbau und Funktion	18
4.4.2	Moth Generationen	24
4.5	Faktoren für das effiziente Segeln der Motte	29
4.5.1	Material	29
4.5.2	Aerodynamik und Hydrodynamik	30
4.5.3	Praxis	31
4.5.4	Wetter- und Wasserbedingungen	32
5	Material und Methoden	34
5.1	Erstes Experiment	34
5.2	Polardiagramm	38
5.3	Zweites Experiment	41
6	Ergebnisse	42
7	Diskussion	48
8	Schlusswort	52
9	Verzeichnisse	54
10	Anhänge	60

1 Abstract

Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit widmet sich den Hydrofoils und deren Vorteilen gegenüber herkömmlichen Segelbooten. Durch Hydrofoils kann der Wasserwiderstand eines Bootes stark reduziert werden, weshalb diese Technologie auf vielen der modernsten Segelboote zu finden ist. Diese Arbeit setzt sich mit der Funktion der Hydrofoils auseinander und soll zunächst die physikalische Funktion der Hydrofoils erklären und den aktuellen Stand der Technik erläutern, mithilfe von Geschwindigkeitsmessungen einer gefoilten Bladerider X8 Moth und einem 29er Skiff untersuchen, ob und wieso gefoilte Boote schneller sein können als herkömmliche Segelboote. Ausserdem soll auch der Fortschritt der Entwicklung gefoilter Boote aufgezeigt werden, indem zwei gefoilte Segelboote verschiedener Generationen, eine Bladerider X8 Moth und eine Bieker V2 Moth, mit den gleichen Methoden verglichen werden. Die Analyse der Ergebnisse zeigt, dass gefoilte Segelboote zwar in allen Winkeln zum Wind schneller segeln können als herkömmliche Segelboote, jedoch herkömmliche Segelboote bei sehr leichtem Wind schneller sind. Anhand dieser Ergebnisse ist zu erkennen, dass die Technologie der Hydrofoils eine der aktuell bedeutendsten ist, um ein Segelboot mithilfe der Windkraft auf sehr hohe Geschwindigkeiten zu beschleunigen.

2 Vorwort

Bereits in frühen Jahren kam ich mit dem Segeln in Kontakt und übte seither auf diversen Booten diesen Sport aus. Aufgrund des Interesses meiner Eltern wurde ich schon früh Mitglied im Segelverein des Jugendsegeln Steckborns und begann dort den Optimist, eine Bootsklasse für junge Segler, zu segeln. Heute segle ich seit etwa fünf Jahren aktiv den 29er. Da der Segelsport einer der Sportarten ist, in denen sich die Technik ständig weiterentwickelt und aufgrund meines Interesse in physikalischen Themen, in diversen naturwissenschaftlichen Fächern als auch Ingenieurwissenschaften, liess ich mich schon immer leicht für die Innovationen im Segelsport begeistern. Eine dieser Innovationen, welche vor allem im letzten Jahrzehnt stark an Interesse gewann, ist das Hydrofoil. Durch das Aufkommen der Hydrofoils bei einigen Mitgliedern meines Segelclubs wurde auch ich mit dieser Technik konfrontiert. Ich beschloss Ende des letzten Jahres, mir mit der Hilfe eines Freundes eine eigene International Class Moth zu beschaffen, welche mir dazu dienen sollte, das Segeln mit dieser Bootsklasse zu erlernen. Mit den Ressourcen, die mir anschliessend zur Verfügung standen, beschloss ich, das Segeln mit der Motte zum Teil meiner Maturaarbeit zu machen, da mich die Funktion schon immer interessierte und ich die Details erforschen wollte. Es interessiert mich vor allem, was mithilfe von Hydrofoils alles möglich ist und wie diese Boote weiter optimiert werden können, um noch schneller und geschickter zu werden. Mit meiner Maturaarbeit will ich unter anderem dem Leser die Welt der Hydrofoils etwas näher bringen um das allgemeine Bewusstsein für solche Boote zu vergrössern. Die vorliegende Arbeit besteht somit aus vielen verschiedenen Interessen, welche in einer Sportart zusammenkommen, und ist das Resultat von viel Tüfteln und Optimieren. Erfolgreich konnte ich das Segeln mit der Motte innerhalb einer Saison erlernen, um somit ein eigenes Polardiagramm zu erstellen. Polardiagramme zu erstellen gehört normalerweise nicht zu den alltäglichen Aktivitäten eines Seglers. Die Ergebnisse führen einerseits zu einem besseren Verständnis für die Bootsklasse, als auch für das eigene Boot und bieten einen sehr einheitlichen Vergleich zwischen verschiedenen Bootsklassen. Ich wünsche viel Spass beim Lesen und hoffe ein näheres Verständnis über Hydrofoils und die damit verbundene Faszination vermitteln zu können.

3 Einleitung

Tragflügelboote sind heutzutage vom Wassersport kaum wegzudenken. Was vor einem Jahrzehnt noch als Kuriosität oder Zukunftsmusik galt, ist heute ein wichtiger Teil des Segel- als auch Surfsports geworden. Die fliegenden Segelboote stossen heute nicht nur im Profisport, sondern auch im Amateurbereich auf grosses Interesse. Trotz dem eher kürzlich entdeckten Interesse im Breitensport, tüfteln Ingenieure bereits seit einigen Jahrzehnten daran, Segelboote mithilfe von Tragflügeln zum fliegen zu bringen. Ob für eine Atlantiküberquerung oder für internationale Inshore-Regatten (Kurzstreckenregatten) wie dem America's Cup, es stellt sich heraus, dass die fliegenden Segelboote viele Vorteile mit sich bringen. Somit segeln die modernsten Segelboote, ausgestattet mit dem neusten Stand der Technik, oft nicht auf, sondern über dem Wasser. Die Tragflügel für das Wasser, auch Hydrofoils genannt, können als eine regelrechte Revolution im Segelsport betrachtet werden, da diese das Segeln auf eine neue Ebene brachte und zu völlig neuartigen Bootsklassen führte. Hydrofoils bringen neue Möglichkeiten mit sich und sorgen für einen Wettkampf um Innovation und Fähigkeiten in einer neuen Dimension. Nicht selten sind neue Entwicklungen im Segelsport von Schöpfungen aus Bereichen des Rennsports oder der Aviatik inspiriert.

Diese Arbeit soll aufzeigen, wie die Physik des Foiling funktioniert und wie sich Hydrofoils beim Segeln verhalten. Ebenfalls soll sie einen Einblick in den aktuellen Entwicklungsstand der Foiling-Klassen im Segelsport geben und aufzeigen, welche Faktoren die Geschwindigkeit gefoilter Boote beeinflussen. Der Fokus liegt auf den verwendeten Materialien, Segeltechniken in der praktischen Anwendung und den physikalischen Faktoren. Bei Letzterem soll vor allem eine spezielle Bootsklasse, die International Class Moth im Vordergrund stehen, da sich der anschliessende praktische Teil ebenfalls vor allem mit dieser Klasse auseinandersetzt. Zusätzlich konnte ein schriftliches Interview mit Aurore Kerr, einem Statiker, welcher für Alinghi Red Bull Racing (Challenger für den America's Cup 2024) arbeitet, durchgeführt werden. Die Antworten aus dem Interview konnten für einige Teile der Arbeit genutzt werden um die Informationen eines Experten zu integrieren. Das komplette Interview mit dem Alinghi Ingenieur ist im Anhang zu finden.

Im praktischen Teil dieser Arbeit werden mithilfe einer international class Moth diverse Geschwindigkeitsmessungen durch eine eigene Methode aufgenommen. Die Ergebnisse sollen anschliessend mit anderen Bootsklassen verglichen werden, um eine Antwort auf die Frage geben zu können, welche Vorteile Segelboote mit Hydrofoils gegenüber gewöhnlichen Segelbooten bieten. In Betrachtung der Hydrofoils stellt sich die Frage, ob foilende Segelboote den herkömmlichen Segelbooten in allen Bereichen im Geschwindigkeitsaspekt überlegen sind, oder ob es gewisse Punkte gibt, an denen ein herkömmliches Segelboot ohne Foils mit höheren Geschwindigkeiten punkten kann. In einem zweiten Schritt soll ein gefoiltes Boot auf modernstem Stand mit einem seiner vielen Vorgänger verglichen werden, um die Effizienz neuer eingeführter Techniken und deren Auswirkung auf die Geschwindigkeit zu diskutieren.

4 Theorieteil

4.1 Geschichte

Die heute technisch fortgeschrittenen und filigranen Segelbooten mit Foils erwecken auf den ersten Blick den Anschein, als wäre die Technologie eine vergleichsweise moderne Erfindung. Jedoch entstanden die ersten autonom fahrenden Boote mit Tragflächen, auch wenn sie damals noch keine Anwendung im Segelsport fanden, bereits im gleichen Jahrzehnt als auch die Brüder Wright den ersten Flug in der Geschichte der Menschheit mit einem motorisierten Flugkörper absolvierten.

Die Geschichte beginnt mit einem italienischen Ingenieur namens Enrico Forlanini. Dieser begann 1898 mit der Durchführung einiger Tests, welche ihm wichtige Erfahrungen für seine späteren Entwicklungen einbrachten. Zum einen erkannte Forlanini, dass sich der Auftrieb mit der Geschwindigkeit im Quadrat proportional vergrößert. Das bedeutet, je schneller sein Boot fährt, desto kleiner kann die Fläche der Tragflächen sein, da auch mit kleineren Tragflächen genug Auftrieb generiert wird um das Boot über Wasser zu halten. Ausserdem wird die Geschwindigkeit bei der Fahrt über Wasser vergrößert, da die Angriffsfläche im Wasser deutlich verringert wird. Mit diesen zwei Erkenntnissen entwickelte Forlanini ein "Leitersystem", welches es ihm ermöglichte, die Fläche seiner Foils mit ansteigender Geschwindigkeit zu verringern, da jede Stufe der Leiter nach unten kleiner wird. Das bedeutet, dass das Boot durch höhere Geschwindigkeit über eine immer kleiner werdende Tragfläche verfügt.

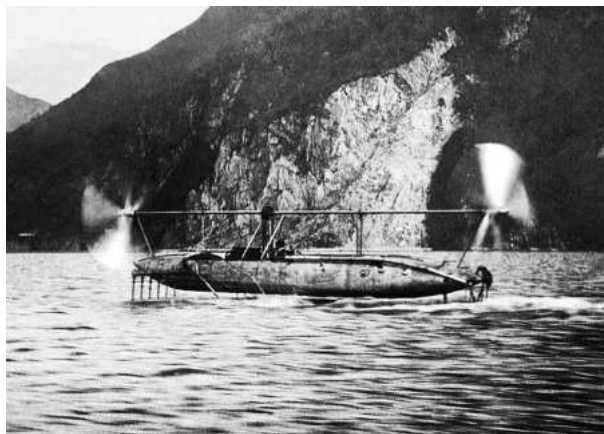


Abbildung 1: *Hydroplano 1* von Enrico Forlini. Lars Bolle et al. (2018). Aufgerufen am 05.07.2024 von <https://www.yacht.de/segelwissen/manoeuver/foilen-foil-spezial-was-sie-zum-segeln-auf-fluegeln-wissen-muessen/>

Dieses System konnte Forlanini 1906 erfolgreich auf dem Lago Maggiore in Italien testen. Sein Testfahrzeug, das *Hydroplano1* (Abbildung 1), verfügte über einen Motor mit 60 Pferdestärken, was ihm eine Spitzengeschwindigkeit von 38 Knoten (70 Kilometer pro Stunde) einbrachte. Dixon (2024)

Nach dem Durchbruch Forlaninis wuchs das Interesse an Tragflügelbooten, was immer mehr Ingenieure dazu ermutigte ihre eigenen Boote zu entwickeln. Schliesslich stellte der Erfinder Alexander Graham Bell



Abbildung 2: HD-4 von Alexander Graham Bell. Wikipedia. (2024). Aufgerufen am 05.07.2024 von https://de.wikipedia.org/wiki/Hydrodrome_IV

im Jahre 1919 einen Geschwindigkeitsrekord von 61.6 Knoten (114 Kilometer pro Stunde) mit seinem HD-4 (Abbildung 2) auf, welcher über ein Jahrzehnt lang als ungeschlagen galt. Es sollten jedoch noch fast zwei Jahrzehnte vergehen, bis schliesslich das Hydrofoil Anwendung im Segelsport fand.

Die Amerikaner Robert Gilruth und Bill Carl segeln schliesslich erstmals 1938 ihren selbst gebauten Kattamaran mit einer V-förmigen Tragfläche und erreichen dabei eine Höchstgeschwindigkeit von 12 Knoten (etwa 22 Km/h). Diese Geschwindigkeit ist zwar verglichen mit den Meilensteinen davor nicht sehr beachtlich, jedoch darf nicht unbeachtet bleiben, dass alleine mit der Windkraft weniger hohe Geschwindigkeiten erreicht werden können als mit der Kraft eines Motors. Daher ist die Geschwindigkeit von 12 Knoten für einen ersten Test sehr beachtlich.

Anschliessend folgten weitere Prototypen, wie beispielsweise das Einrumpf-Boot mit zwei Leiter-Foils wie jene von Enrico Forlanini. An dem Projekt beteiligte sich damals sogar die US-Navy.

Einen weiteren Meilenstein in der Entwicklung von Hydrofoils für den Segelsport setzte der Franzose Éric Tabarly, welcher mithilfe eines umgebauten Bootes mit Auslegern und Hydrofoils im Jahre 1980 einen 75 Jahre alten Rekord brach. Mit seinem Boot, der *Paul Ricard*, gelang Tabarly eine Atlantiküberquerung in nur 10 Tagen und fünf Stunden - der vorherige Rekord, aufgestellt von Charles Barr lag bei 12 Tagen und vier Stunden [Charlie Barr \(2023\)](#). Dieser Zeitunterschied zeigt, wie effizient Tragflächen im Segelsport genutzt werden können. Der hohe Geschwindigkeitsunterschied zwischen herkömmlichen Segelbooten und Tragflächenbooten beeindruckte bereits damalige Segler.

Durch neue Materialien wie Kohlefasern und das Einsetzen neuer Technologien (siehe dazu Kapitel [4.2](#)) konnten immer höhere Geschwindigkeiten in diversen Bootsklassen erreicht werden (siehe Kapitel [4.3](#)).



Abbildung 3: *Vestas Sailrocket 2*. *Yachting World*. (2021). Aufgerufen am 05.07.2024 von <https://www.yachtingworld.com/yachts-and-gear/worlds-coolest-yachts-vestas-sailrocket-2-133560>

Schliesslich erreicht Paul Larsen mit seiner *Vestas Sailrocket 2* im Jahr 2011 eine Geschwindigkeit von über 65 Knoten (120 Km/h) auf einer Strecke von 500 Metern [World \(2021\)](#). Die Sailrocket 2 ist damit das schnellste Segelboot aller Zeiten. Der Geschwindigkeitsrekord bleibt bis heute ungebrochen.

Heute sind Hydrofoils zu einem grosser Bestandteil des Segelsports geworden. Internationale Segelregatten wie der *America's Cup* (siehe Kapitel [4.3.1](#)) fördern durch die Einführung von Foils den Wettbewerb um Innovation und Weiterentwicklung der schnellsten Segelboote aller Zeiten.

[Bolle, Kiessler, Rieker und Good \(2018\)](#)

4.2 Funktion

Jedes Objekt, welches sich durch eine Flüssigkeit bewegt, wird durch verschiedene Einflüsse Widerstand durch diese Flüssigkeit erfahren. Der Einfluss des Luftwiderstandes sei in diesem Fall aussen vor gelassen. Der Widerstand der Flüssigkeit auf den Körper hängt jedoch stark von dessen Oberflächeneigenschaften des Objekts ab. Die Querschnittsfläche des Objekts, welches der Flüssigkeit ausgesetzt ist, ist ebenfalls von Bedeutung, da diese Fläche den Druck, welchen das Objekt bei Bewegung erfährt, beeinflusst. Um hydrodynamische Probleme zu lösen, müssen beide Faktoren in Betracht gezogen werden. Hydrodynamischer Widerstand ist in praktischen Anwendungen von Booten der Hauptfaktor des Widerstands, welcher für das Boot verantwortlich ist. Hydrodynamischer Widerstand ist jedoch nur ein Überbegriff für alle Kräfte, welche entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung eines Objekts in einer Flüssigkeit existieren und mit der Reynolds Zahl, den Flüssigkeitseigenschaften als auch mit den Dimensionen des Körpers zusammenhängen.

Es wird vor allem zwischen zwei Prinzipien des Widerstandes unterschieden: dem quadratischen hydrodynamischen Widerstand und der viskosen Reibung. Letzteres entsteht lediglich durch die Viskosität der Flüssigkeit und kann als Form des Widerstandes angesehen werden. Reibungskraft steht im Verhältnis $F_W \propto -\mu * v$ zur Geschwindigkeit des Objektes und des Viskositätsfaktors der umgebenden Flüssigkeit (Wasser hat bei 20 Grad Celsius beispielsweise einen Viskositätsfaktor von nahezu 1). Das bedeutet, die Reibungskraft eines Objektes, welches sich durch das Wasser bewegt, ist proportional zur Geschwindigkeit mal dem Viskositätsfaktor. Das Minuszeichen zeigt, dass die Richtung des Betrags der Reibungskraft immer entgegengesetzt dem Betrag der Zugkraft des Objekts verläuft. [Leifiphysik \(2024b\)](#)

Der quadratische Widerstand hingegen beinhaltet nicht die Viskosität, sondern die Dichte der Flüssigkeit. Nach der Formel $F_w = \frac{1}{2} * C_f * \rho * A * v^2$ ist der hydrodynamische Widerstand das Resultat von Geschwindigkeit des Objekts v , die Dichte der Flüssigkeit ρ (Wasser hat eine Dichte von rund 1000 kg/m^3), der Querschnittsfläche A des Teils welcher dem Wasser ausgesetzt ist, als auch der Reynolds Zahl C_f . [Leifiphysik \(2024a\)](#)

Die Reynolds Zahl ist hierbei ein dimensionsloser Wert, welcher das Verhältnis von Trägheits- und Viskositätskräften einer Flüssigkeit bestimmt. Sie kann vorhersagen, wie sich die Flüssigkeit verhält: eine hohe Reynolds Zahl steht für turbulenten Fluss, während eine tiefe Reynolds Zahl für laminaren Fluss steht. [Studysmarter \(2024\)](#)

Die beiden Widerstände Reibungskraft und quadratischer Widerstand sind somit, wenn auch nur vereinfacht, auf ein Boot, welches durch das Wasser fährt, übertragbar. Je grösser die Querschnittsfläche, die dem Wasser ausgesetzt ist, desto grösser ist die Kraft des hydrodynamischen Widerstandes welche dadurch entsteht. Bei einer höheren Geschwindigkeit des Bootes vergrössert sich der Widerstand, wie in der Gleichung aufgrund der Multiplikation der Geschwindigkeit (v) im Quadrat errechnet werden kann. Dies

bedeutet, dass Segelboote zwar theoretisch um einiges schneller sein könnten, wenn der Widerstand des Rumpfes geringer wäre. Zwar fanden immer wieder Verbesserungen der hydrodynamischen Eigenschaften von Segelbooten statt, jedoch bleibt trotzdem stets ein grosser Widerstand des Rumpfes vorhanden.

An diesem Punkt spielen Hydrofoils eine wichtige Rolle: Sie bieten eine Möglichkeit, den Widerstand des Bootes auf das Kleinste zu minimieren, indem die dem Wasser ausgesetzte Fläche des Rumpfes komplett über die Wasseroberfläche gehoben wird. Dadurch wird der Widerstand drastisch verkleinert, was im Gegenzug bedeutet, dass das Segelboot schneller wird. Bis auf die Foils sollte im Normalfall kein anderer Teil des Bootes das Wasser berühren, was bedeutet, dass der einzige hydrodynamische Widerstand auf die Foils beschränkt werden kann und das restliche Boot lediglich Widerstandskräfte durch den Luftwiderstand zu Spüren bekommt. Das Boot muss zwar trotzdem noch hydrodynamische Eigenschaften aufweisen um vor dem Fliegen genügen Geschwindigkeit zum Abheben des Bootes aufzubringen, jedoch ist dies mit komplizierten Berechnungen verbunden und überschreitet den Rahmen dieser Arbeit.

In der Abbildung 4 ist der Widerstand mit der Zunahme der Geschwindigkeit bei normalen Booten und im Vergleich mit Hydrofoils ersichtlich. Es zeigt, dass sobald genügend Geschwindigkeit erreicht ist und das Boot zu fliegen beginnt (der sogenannte "Take-off point"), der Widerstand drastisch reduziert wird, während er bei einem nicht foilenden Boot weiterhin ansteigt.

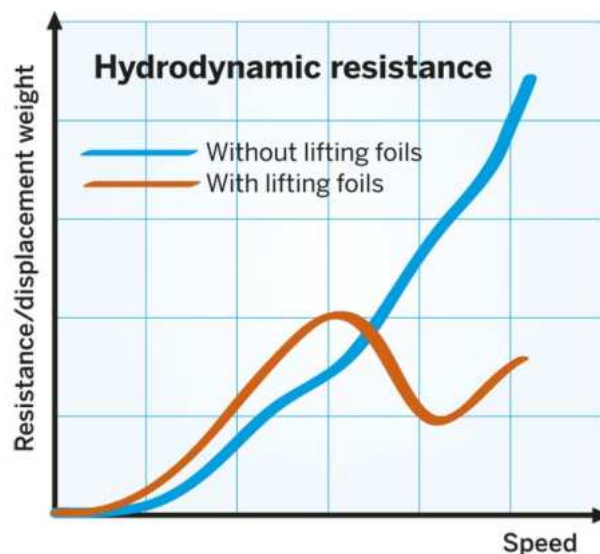


Abbildung 4: Unterschied des Widerstandes bei grösser werdender Geschwindigkeit zwischen nicht foilendem Segelboot und Segelboot mit Hydrofoils (lifting foils). Matthew Sheahan. (2015). Aufgerufen am 26.06.2024 von <https://www.yachtingworld.com/special-reports/the-foiling-phenomenon-66269>

Es bleibt noch übrig zu klären, wie es Hydrofoils ermöglichen, ein Boot inklusive Körpergewicht des Seglers und Eigengewicht aus dem Wasser zu heben. Hydrofoils funktionieren im Grunde genommen gleich wie normale Flugzeugflügel - mit dem Unterschied, dass die Tragflächen um einiges kleiner sein können, da die Dichte von Wasser etwa um das Tausendfache grösser ist als die der Luft (Die Dichte von Luft beträgt etwa 1225 Kg/m^3 , während Wasser eine Dichte von etwa 997 Kg/m^3 aufweist). Dadurch kann die Flügelspannweite bei Hydrofoils im Vergleich zu Flugzeugflügeln für den gleichen generierten Auftrieb

kleiner sein.

Wie ein Hydrofoil an Auftrieb durch Geschwindigkeit gewinnt kann mithilfe von zwei verschiedenen Gleichungen erklärt werden: Der Bernoulli-Gleichung und der Euler-Gleichung.

Bernoulli-Gleichung

$$P_o = P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh$$

P_o — Stagnationsdruck

P — Druck

ρ — Dichte

V — Geschwindigkeit

g — Gravitationskonstante

h — Höhe

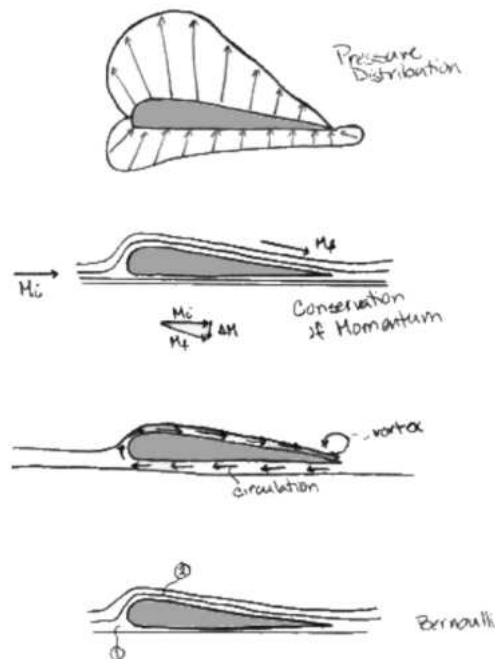


Abbildung 5: a) Druckprofil b) Impulsübertragung c) Zirkulation d) Stromlinien. Tina Rosado. (1999). Aufgerufen am 19.08.2024 von <https://web.mit.edu/2.972/www/reports/hydrofoil/hydrofoil.html>

Die Bernoulli-Gleichung (oben abgebildet), kann auf Fluide angewendet werden, die als verlustfrei, nicht komprimierbar und stationär vereinfacht werden. Die Höhe des Hydrofoils (Distanz zwischen dem untersten Punkt und dem obersten Punkt des Foils) ist klein genug, dass die Höhe h gegenüber hier keine Rolle spielt. Übrig bleibt lediglich der Druck plus die Hälfte der Dichte multipliziert mit dem Quadrat der Geschwindigkeit gleicht einer Konstante, dem Staudruck.

Sobald sich nun die Geschwindigkeit der Stromlinien entlang des Hydrofoils vergrößern, sinkt der Druck. Durch die Wölbung der Tragfläche ist die Geschwindigkeit der Strömung auf der Oberseite des Foils

grösser als die der Unterseite [Flurl \(2024\)](#): Um das Drehmoment, welches durch die im Gegenuhrzeigersinn drehenden Wirbel erzeugt wird, aufrechtzuerhalten, muss ein entgegengesetzter, aber gleich starker Impulsaustausch mit dem Wirbel an der hinteren Kante (die sogenannte "trailing edge") stattfinden. Dies führt zur Zirkulation der Flüssigkeit um das Hydrofoil herum (siehe Abbildung 5). Die Vektorsumme der Geschwindigkeiten resultiert in einer Höheren Geschwindigkeit der Strömung auf der Oberseite des Foils als auf der Unterseite. Sobald nun die Bernoulli-Gleichung angewendet wird, kann erkannt werden, dass durch den Geschwindigkeitsunterschied die nötige Druckdifferenz erzeugt wird, um Auftrieb zu generieren. Je höher die Geschwindigkeit, desto höher also der Auftrieb.

Euler-Gleichung

$$d(P + \rho gh)/dn = \rho v^2/R$$

P_o — Stagnationsdruck

P — Druck

ρ — Dichte

V — Geschwindigkeit

g — Gravitationskonstante

h — Höhe

R — Radius der Stromlinienkrümmung

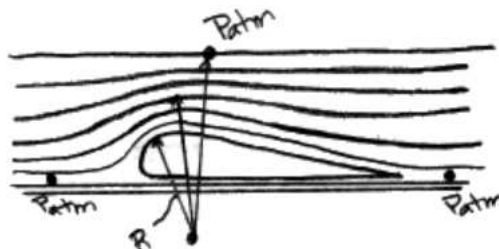


Abbildung 6: Der Druck auf der Oberseite des Hydrofoils nimmt bei grösser werdenden Entfernung (R) ab. Tina Rosado. (1999). Aufgerufen am 19.08.2024 von <https://web.mit.edu/2.972/www/reports/hydrofoil/hydrofoil.html>

Hier wird erneut die Höhe h aussen vor gelassen, da sie klein genug ist um in der Gleichung keine signifikante Auswirkung auf das Resultat zu haben. Die Euler-Gleichung besagt, dass mit einem grösser werdenden Radius vom Zentrum der Stromlinienkrümmung der Druck abnimmt (Siehe Abbildung 6). Das bedeutet, dass der Druck unmittelbar auf der Oberfläche des Hydrofoils tiefer ist als der Umgebungsdruck (da die Entfernung zum Zentrum der Stromlinienkrümmung kleiner ist), während der Druck auf der Unterseite des Hydrofoils höher ist als der Umgebungsdruck. Somit entsteht durch den Druckunterschied zwischen den Stromlinien auf dem Hydrofoil und darunter ein Gesamtdruck, welcher den Auftrieb des Hydrofoils generieren lässt.

[Rosado \(1999\)](#)

4.3 Verschiedene Arten gefoilter Segelboote

Hydrofoils existieren zwar bereits seit einiger Zeit (siehe dazu Kapitel 4.1), jedoch entwickelten sich erst in den letzten zwei Jahrzehnten die ausschlaggebenden Faktoren, welche gefoilte Segelboote, darunter kleine Einhand-Segelboote bis hin zu grossen Yachten, massentauglich machten.

4.3.1 America's Cup

Der *America's Cup* ist die älteste Segelregatta (Segelwettkampf) und auch weltweit der älteste Sportwettbewerb der noch bis heute ausgetragen wird. Er entwickelte sich aus einer Herausforderung, welche ein britischer Segelclub 1851 einem amerikanischen Segelclub stellte. Ziel war es, auf der Isle of Wight ein Wettrennen durchzuführen. Der Gewinner erhielt einen Pokal, den sogenannten America's Cup.

Die Sportveranstaltung, später aufgrund des ersten Siegers auf America's Cup umgetauft, folgt bis heute gewissen Regeln. Die Gewinner des letzten Wettkampfes entscheiden wann, wo und mit welchen Booten die nächste Regatta ausgefochten wird. Andere Segelclubs können sich als *challenger* aufstellen, während der Siegerclub des letzten Rennens als "defender" bezeichnet wird. Der America's Cup wurde seither an vielen verschiedenen Orten ausgetragen und die Boote ändern sich mit jeder Regatta. Über die Jahre entstand, vor allem auf Grund der Wettkampfsituation mit challenger und defender sowie der ständigen Weiterentwicklung der Boote, eine starke Wettkampfdynamik. Der America's Cup entwickelte sich zu einer Regatta, welche dafür bekannt war, die modernsten Boote zu entwickeln und mit den neuesten Materialien an die Grenzen des technisch Möglichen zu gehen. Die Teams besitzen heutzutage Budgets von weit über 100 Millionen Dollar. Translate (2024)



Abbildung 7: Oracle Team USA in San Francisco. John Navas. (2013). Aufgerufen am 05.07.2024 von <https://www.sail-world.com/USA/Americas-Cup-AC72-sailing-explained-all-you-ever-need-to-know/-111961?source=google>

Selbstverständlich ist auch der America's Cup von der Innovation der Hydrofoils nicht verschont geblieben. Seit 2013 wird das Event nur foilend durchgeführt. Dabei begann dies mit Katamaranen, sogenannten AC72. Die Boote können mit einer Länge von 26 Metern etwa 44 Knoten (81 Km/h) Spitzengeschwindigkeiten erreichen.



Abbildung 8: Der AC75 des Challenger Alinghi Redbull racing für den Americas Cup 2024. Alinghi Redbull racing. (2024). Aufgerufen am 05.07.2024 von https://alinghiredbullracing.americascup.com/photos/272_BOAT-ONE-Sailing

Für den Wettbewerb im Jahr 2024 wurde wieder auf Einrumpfboote gewechselt, die über eine neue, innovative Foiltechnik verfügen. Die Boote heissen AC75 und besitzen drei Foils, wobei sich nur zwei davon während dem Segeln im Wasser befinden. Das dritte befindet sich jeweils in der Luft und auf der Luvseite (Die jeweils dem Wind zugewandte Seite des Bootes), wobei die beiden Foils vorne bei Wende (Manöver, bei dem der Bug des Bootes durch den Wind geht) und Halse (Manöver, bei dem das Heck des Bootes durch den Wind geht) die Position ändern. Das hintere Foil, das sogenannte Ruder, wird zur Steuerung des Bootes benutzt. Mit einer Länge von 20.7 Metern und einer Masthöhe von 26.5 Metern erreichen die Boote eine Spitzengeschwindigkeit von über 50 Knoten (über 90 Km/h). Fortgeschrittene Materialien wie Karbonfasern, aus welchen Rumpf, Foils, Mast und Segel bestehen, bringen das Gewicht des Bootes lediglich auf 6.5 Tonnen. Diese enorme Gewichtsreduktion ist hinsichtlich des Fliegens wichtig, da leichte Boote mit grossen Foils schneller Auftrieb generieren. *THE BOATS: AC75, AC40 & LEQ12 - 37th America's Cup* (o. J.)

4.3.2 Imoca class



Abbildung 9: Die Imoca class von Team Malizia. Hélène Katz. (2023). Aufgerufen am 05.07.2024 von <https://www.team-malizia.com/news/intense-racing-until-the-finish-line-boris-herrmann-and-will-harris-seventh-in-the-transat-jacques-vabre-2023>

Neben inshore Segelbooten, also Boote, welche lediglich auf Binnengewässer oder in Küstennähe segeln, gibt es auch Anwendungen von Hydrofoils bei offshore Segelbooten, also Segelboote. Dies sind Boote, welche die Küste verlassen und über die Hohe See segeln. Die sogenannte IMOCA-class oder auch Open-60 genannt, gehört heute zu der schnellsten Monohull-Bootsklasse weltweit. Die Boote verfügen über L-Foils, welche dafür sorgen, dass der Bug des Bootes sich aus dem Wasser hebt. Bei den Open-60 wird jedoch nie das gesamte Boot aus dem Wasser gehoben. In Abbildung 10 ist zu sehen, dass die Foils vor allem dem aufrichtenden Moment dienen, das bedeutet, dass sie als eine Art Stütze das Boot aufrichten, so dass das Boot sich nicht zu weit auf die Leeseite (die jeweils dem Wind abgewandte Seite des Bootes) neigt. Dadurch bleibt das Boot so aufrecht wie möglich im Wasser und die Segelfläche kann so gut wie möglich genutzt werden. Ausserdem tragen die Foils, wie auch bei anderen gefoilten Booten dazu bei, Teile des Rumpfes aus dem Wasser zu heben, um somit den Wasserwiderstand des Bootes zu verringern. Je höher sich das Boot aus dem Wasser hebt, desto kleiner wird die Fläche des sich im Wasser befindlichen Teil des Foils, wodurch das Boot wieder tiefer sinkt. Somit kann sich die Höhe des Bootes nach der Geschwindigkeit einpendeln. Neben den Foils trägt ein sogenannter Schwenk-Kiel, also ein Kiel welcher sich auf beide Seiten des Rumpfes bewegen lässt, ebenfalls dazu bei, das Boot dem Wind entgegen aufzurichten. Diese spezielle Art von Kiel ist nämlich dazu in der Lage, sich mithilfe eines hydraulischen Systems zwischen den beiden Seiten des Bootes hin- und her zu schwenken. Sobald das Boot nach einem Manöver die Rumpfseite wechselt, schwenkt der Kiel auf die Luvseite des Bootes (der Windzugewandten Seite des Bootes). Dies sorgt dafür, dass das Gewicht des Kiels den Schwerpunkt des Bootes im Wasser verschiebt, um somit den Kenter-Punkt so weit wie möglich zu verschieben. Somit können die Boote eine Neigung von bis zu 110 Grad erfahren, ohne zu kentern. Falls das Boot jedoch trotzdem kentern sollte, kann das Gewicht des Schwenk-Kiels ebenfalls dazu genutzt werden, das Boot

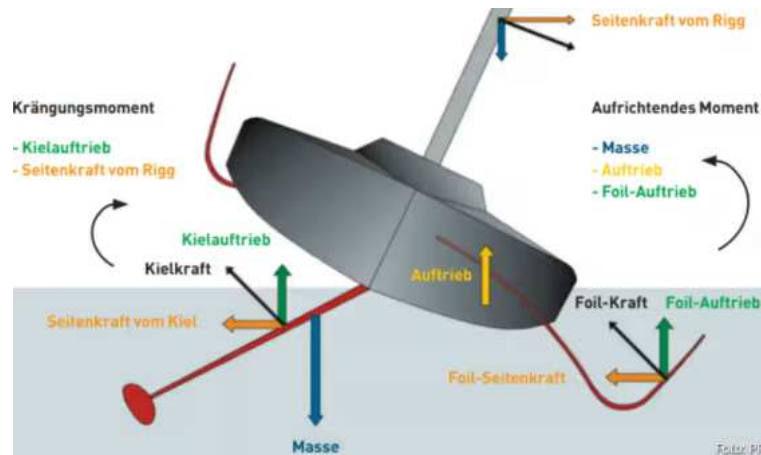


Abbildung 10: Wirkende Kräfte auf Open-60 Boot. Stephan Gölnitz. (2024). Aufgerufen am 05.07.2024 von <https://www.surf-magazin.de/windsurfen/zubehoer/foils/windsurfer-motte-imoca-so-funktionieren-verschiedene-foil-typen/>

4.3.3 69F



Abbildung 11: Ein 69F Boot. Persico 69F. (2020). Aufgerufen am 08.05.2024 von <https://www.yachtsandyachting.com/news/231729/Persico-69F-Grand-Prix-21-in-Malcesine-overall>

Der 69F ist das einzige gefüllte One-design Boot (Bootsklasse, welche nach Reglement in der Bauweise und verwendeten Materialien nicht abweichen darf), welches von einer Crew bestehend aus drei Personen gesegelt werden kann. Mit einer Länge von 6.9 Metern gehört der 69F zu den Jollen (kleines, offenes Segelboot). Das Boot besteht fast vollständig aus Karbonfasern, was ermöglicht, das Gewicht des Bootes auf insgesamt 380 Kilogramm zu reduzieren. Die Bootsklasse ist auch dafür bekannt, schon mit wenig erfahrenen Seglern bereits eine hohe Geschwindigkeit erreichen zu können. Auch ist beim Segeln des 69F nicht viel Kraft notwendig, daher erreichen weibliche Teams meist sogar bessere Ergebnisse beim Segeln als männliche Teams, da weibliche Teams taktisch besser planen können. Die Höchstgeschwindigkeit liegt bei etwa 35 Knoten (65 Km/h).

Die 69F class nutzt V-geformte self-leveling-foils, also Foils welche sich automatisch der Flughöhe des Bootes anpassen. Die V-förmigen Foils treten in modernen gefoilten Jollen eher selten auf, aber sind aufgrund des Gewichts der Crew und des Bootes eine gute Wahl. Es existieren zwar grössere gefoilte Boote mit T-Förmigen Foils wie der AC75, jedoch sind deren Systeme weitaus komplizierter.

Die V-Förmigen Foils erlauben es, das Boot in einer stabilen Position und aufrecht zu segeln. Aufgrund des Drucks der Segel neigt sich ein Segelboot tendenziell auf seine Leeseite. Die optimale Position ist bei 69F eine um etwa zehn Grad auf die Leeseite geneigte Stellung, dies hat vor allem den Grund, dass mit der Neigung eine horizontale Kraftkomponente in das Ruderblatt auf der Leeseite eingeführt wird. Wie auf Abbildung 12 veranschaulicht, ist bei einer Neigung um zehn Grad die Spitze des Foils mehr im Wasser. Da die vom Wasser umgebene Fläche des Foils proportional zu dessen Auftrieb grösser wird, entsteht ein grösserer Auftrieb der Spitze in richtung Luv (grüner Vektor), was dazu führt, dass das aufrichtende Moment grösser wird und das Boot dadurch weniger Neigung in richtung der Leeseite erfährt. Auf der Abbildung 12 sind ebenfalls rote Vektoren zu erkennen: Diese stellen die vertikale Kraft dar und zeigen die Vektorsumme und somit den gesamten Auftrieb der Foils an. Der Auftrieb der Spitze des Foils vergrössert sich bei einer Neigung zur Leeseite und die Seitenkraft (blauer Vektor) wird kleiner, es wird also weniger Kraft seitlich auf das Foils ausgeübt. Der graue Vektor stellt die Gewichtskraft der Foils bzw. des Bootes dar.

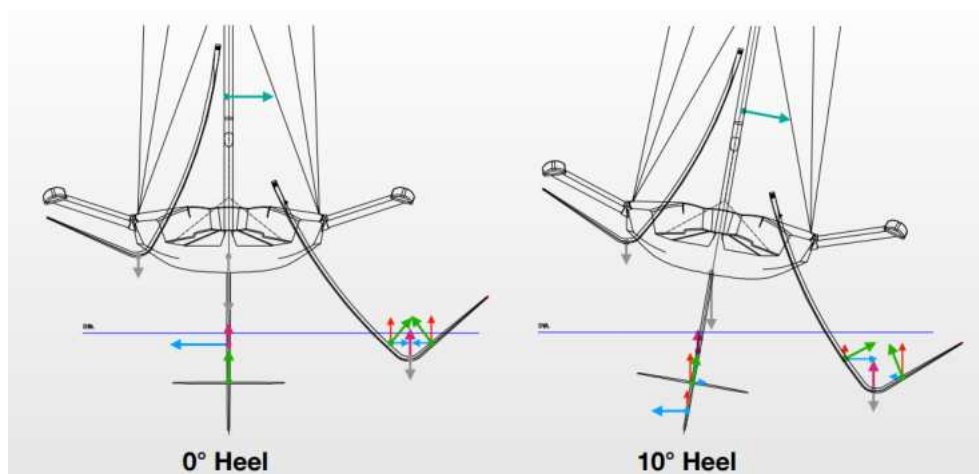


Abbildung 12: Die verschiedenen Kräfte die auf das 69F class Boot wirken bei null und zehn Grad Neigung (Heel). 69F Sailing. (2024). Aufgerufen am 09.06.2024 von https://69fsailing.com/wp-content/uploads/69F_Academy_-_Foiling_Basics.pdf

Während dem Segeln befindet sich das Boot lediglich auf dem Ruder Foil und auf einem der beiden V-Foils. Da das zweite Foil mehr Auftrieb generiert als benötigt wird, wird das Foil auf der Luvseite aus dem Wasser gezogen um den Wasserwiderstand des Bootes zu reduzieren. In einigen Fällen kann es notwendig sein, beide Foils zu benutzen. Um bei wenig Geschwindigkeit effektiver abheben zu können, werden oft beide Foils benutzt um zusätzlichen Auftrieb zu generieren. Durch den zusätzlichen Auftrieb muss das Ruder Foil ebenfalls mehr Auftrieb generieren um den Pitch des Bootes (Der Winkel zwischen

Wasseroberfläche und Längsachse des Bootes) weiterhin stabil zu halten, ansonsten wird der Bug des Bootes nach oben geneigt. [“69F Academy - Foiling Basics”](#) (o. J.)

4.4 International Class Moth

Auf die International Class Moth wird im Theorieteil detailliert eingegangen. In den folgenden Unterkapiteln wird der Bootstyp behandelt, da die praktische Arbeit mit dieser Art von Segelboot durchgeführt wird. Ein gutes Verständnis für die Technik des Bootes sowie wichtige Faktoren für das effiziente Segeln der Moth sind daher notwendig. Ebenfalls werden auf die Elemente der schnellsten und neuesten Varianten der Moth eingegangen, um eine Erklärung zu deren hohen Geschwindigkeiten finden zu können. Anschliessend kann aufgrund dieser Vorarbeit die praktische Arbeit so effizient wie möglich durchgeführt werden.

4.4.1 Aufbau und Funktion

Foils

Die International Class Moth besitzt zwei Hydrofoils, welche während dem Segeln immer aktiv sind. Das Ziel beim Segeln der Moth ist, genügend Geschwindigkeit zu erreichen, wodurch der Rumpf des Bootes sich durch den Auftrieb der Foils (ähnlich den Flügeln eines Flugzeugs) aus dem Wasser hebt und das Boot über der Wasseroberfläche fliegt. Dadurch wird der Widerstand des Wassers am Rumpf minimiert, wodurch das Boot aussergewöhnlich hohe Geschwindigkeiten erreichen kann. Je höher sich das Boot über der Wasseroberfläche befindet, desto höhere Geschwindigkeiten kann es erreichen, da die Foils sich kaum im Wasser befinden. Jedoch sorgt eine zu hohe Flughöhe auch für Instabilität, da sich die Foils aus dem Wasser heben könnten und dadurch einen Strömungsabriss verursachen, also das Boot herabstürzen kann. Es ist also wichtig, dass das Boot eine Balance findet zwischen Stabilität und Flughöhe. Dies erfolgt bei der International class Moth mithilfe eines teilweise automatischen Systems. In der Mitte des Bootes befindet sich das sogenannte Mainfoil, dieses trägt zur Stabilität bei. Das Mainfoil (oder Hauptfoil) lässt sich nicht bewegen und ist daher nicht für das Lenken des Bootes verantwortlich. Das zweite Hydrofoil, welches sich am Heck des Bootes befindet, nennt sich Rudderfoil. Dieses lässt sich der Längsachse nach bewegen und ist vergleichbar mit einem Ruder eines herkömmlichen Segelbootes. Das Rudderfoil ist etwas kleiner als das Mainfoil, es trägt zwar ebenfalls zur Stabilität bei, ist jedoch vor allem für das Steuern des Bootes verantwortlich. Gesteuert wird das Rudderfoil mit einer Pinne, einem länglichen Rohr welches der Segler in seiner Hand hält um jederzeit den Kurs des Bootes bestimmen zu können. Beide Foils, Main- und Rudderfoil, verfügen über die Fähigkeit, den Auftrieb zu regulieren. Wie bereits im Kapitel [4.2](#) besprochen, verhalten sich Foils im Wasser ähnlich wie Flugzeugflügel in der Luft. Beide Foils erreichen dies mit zwei verschiedenen Mechanismen.

Der Auftrieb des Mainfoils wird automatisch mit der Flughöhe zusammenhängend angepasst. Diese Technik nennt sich self-leveling-foils und wird bei vielen modernen Bootsklassen mit Hydrofoils eingesetzt. Ein länglicher Stab, der sogenannte "Wand" (englisch für Zauberstab), welcher an der Spitze des Bootes angebracht ist, schlägt während dem Segeln auf die Oberfläche des Wassers. Der Wand ist elastisch und drückt immer in Richtung des Bugs nach unten. Sobald die Moth an Geschwindigkeit gewinnt, wird der Wand zwangsmässig aufgrund des Wasserdrucks nach hinten gedrückt. Dadurch kann die Höhe des Bootes während dem Segeln jederzeit ermittelt werden. Der Wand leitet seine Bewegung über einen Draht an das Mainfoil weiter. Diese Bewegung des Wand hat zur Folge, dass die Klappe, oder Flap, (hintere Teil des Mainfoils welcher beweglich ist, ähnlich wie bei einem Flugzeugflügel welcher durch die Klappen für das Abheben des Flugzeugs sorgt) sich nach oben oder nach unten bewegt. Dieser Mechanismus ist für die Stabilität der Moth sehr entscheidend und einer der wichtigsten Eigenschaften der Bootsklasse. Die anschliessenden Grafiken sollen dies näher veranschaulichen.

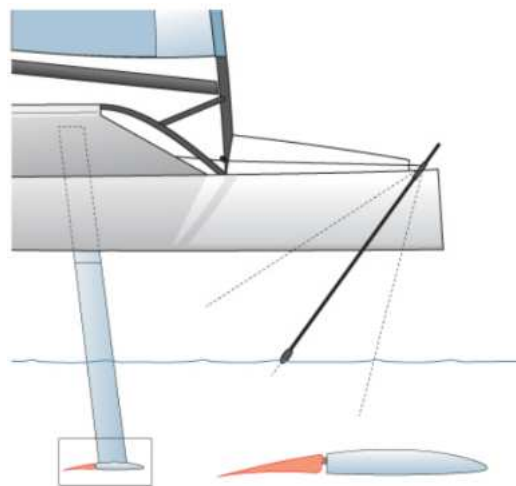


Abbildung 13: *Das Mainfoil generiert weder Ab- noch Auftrieb.* Alan Hillman. (2018). *The Foiling Dinghy Book - Dinghy Foiling from Start to finish.* S. 23

In Abbildung 13 befindet sich der Wand in einem 45 Grad Winkel. Dadurch ist der hintere Teil des Mainfoil gerade ausgerichtet und sorgt weder für Auf- noch Abtrieb. Die Moth hat in diesem Zustand die optimale Flughöhe und das Mainfoil muss nicht angepasst werden.

In Abbildung 14 befindet sich das Foil in einem Winkel, welcher grösser als 45 Grad zum Boot ist. Das bedeutet, dass sich das Boot oberhalb der optimalen Flughöhe befindet und dadurch Abtrieb generiert werden muss, damit sich das Boot wieder in der optimalen Höhe befindet und der Wand somit in seiner Ausgangsposition von 45 Grad. Dies wird durch die Klappe des Mainfoils erreicht, welche in diesem Fall für Abtrieb sorgt und somit das Boot näher an die Wasseroberfläche sinkt.

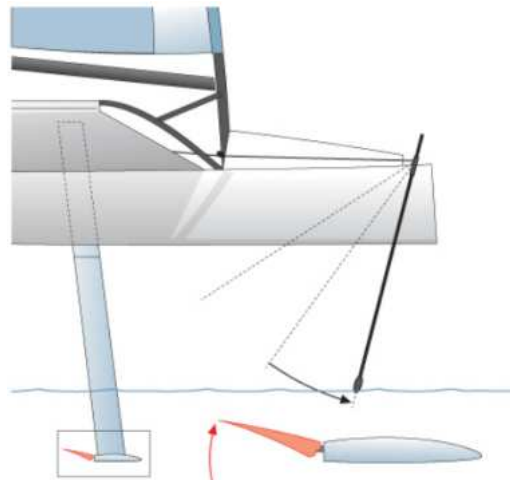


Abbildung 14: Das Mainfoil generiert aufgrund des Grossen Winkels zwischen Wand und Boot Abtrieb. Alan Hillman. (2018). *The Foiling Dinghy Book - Dinghy Foiling from Start to finish*. S. 23

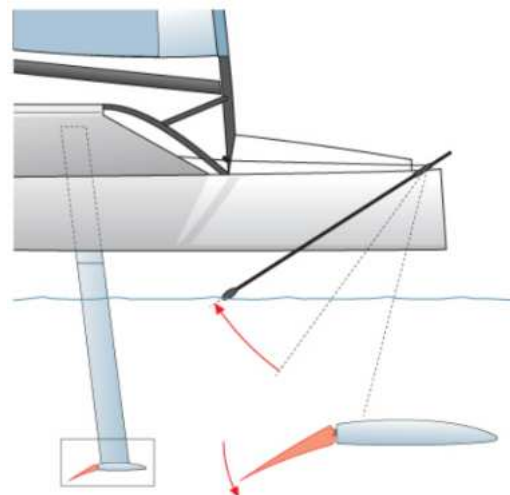


Abbildung 15: Durch den Winkel des Wand generiert die Klappe des Mainfoil Auftrieb. Alan Hillman. (2018). *The Foiling Dinghy Book - Dinghy Foiling from Start to finish*. S. 23

In Abbildung 15 befindet sich der Wand in einem Winkel, welcher kleiner als 45 Grad zum Boot ist, was bedeutet, dass das Boot sich zu nah an der Wasseroberfläche befindet. Dies ist auch die Startposition des Bootes. In dieser Position ist die Klappe des Mainfoil für maximalen Auftrieb ausgerichtet. Dadurch kann die Moth mit genügend Geschwindigkeit genug Auftrieb generieren um sie schlussendlich aus dem Wasser zu heben. Nachdem die Moth sich über der Wasseroberfläche befindet, sorgt der Wand wiederum, wie bei den letzten Abbildungen bereits erklärt, für eine optimale Flughöhe über der Wasseroberfläche.

Das Rudderfoil, also das hintere der beiden Foils, verfügt über keine automatische Anpassung des Auftriebs. Dieses Foil hat keine variierbare Klappe, sondern bleibt immer im gleichen Zustand. Jedoch kann auch dieses bei Bedarf manuell eingestellt werden. Der Segler muss nach eigenem Ermessen über die Position des Foils entscheiden.

Wie auch das Mainfoil kann das Rudderfoil entweder für Auftrieb, Abtrieb oder weder noch sorgen. Der Auftrieb entsteht durch das Kippen des gesamten Foils nach hinten, wodurch das Flügelprofil nach oben

gerichtet wird. Dies wird durch das Drehen der Pinne ausgeführt. Die Pinne kann längs ihrer Achse gedreht werden, wodurch sich das Rudderfoil nach hinten oder nach vorne kippen lässt. Jedoch hat das Rudderfoil durch das Generieren von Auf- oder Abtrieb die Eigenschaft, das gesamte Boot der Längsachse entlang zu neigen, also den Pitch des Bootes zu verändern. In den nächsten Grafiken soll dies veranschaulicht werden.

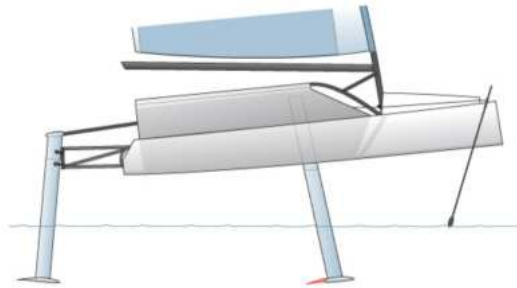


Abbildung 16: Das Rudderfoil generiert Abtrieb, wodurch sich der Bug des Bootes hebt. Alan Hillman. (2018). *The Foiling Dinghy Book - Dinghy Foiling from Start to finish*. S. 24

In Abbildung 16 wurde das Rudderfoil nach vorne geneigt. Diese Position lässt das Rudderfoil Abtrieb generieren. Durch den Abtrieb des Hecks wird jedoch der Bug des Bootes nach oben geneigt, also der Pitch des Bootes positiv verändert, wodurch das Mainfoil wiederum Auftrieb generiert und somit insgesamt das Boot mehr Auftrieb hat und abhebt. Diese Position sollte vor allem dann eingestellt werden, wenn sich die Moth im Wasser befindet und abheben soll.

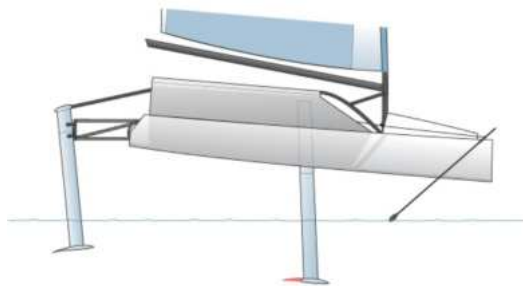


Abbildung 17: Das Mainfoil generiert weder Ab- noch Auftrieb. Alan Hillman. (2018). *The Foiling Dinghy Book - Dinghy Foiling from Start to finish*. S. 24

In Abbildung 17 wurde das Rudderfoil nach Hinten geneigt, was bedeutet, dass es Auftrieb generiert. Dadurch wird der Bug des Bootes nach Unten geneigt, der Pitch also negativ verändert, wodurch das Mainfoil dazu gezwungen wird, Abtrieb zu generieren. Die Moth wird daher nach unten sinken. Wird die Neigung des Rudderfoils nicht verändert, bleibt das Heck der Moth unverändert und die Spitze des Bootes wird im Idealfall weder nach oben noch nach unten bewegt (Abbildung 18). (Hillman, 2018, S. 24)

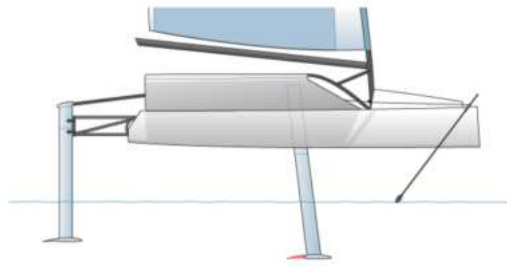


Abbildung 18: Das Mainfoil generiert weder Ab- noch Auftrieb. Alan Hillman. (2018). *The Foiling Dinghy Book - Dinghy Foiling from Start to finish*. S. 24

Rumpf und Flügel



Abbildung 19: Verschiedene Kräfte, die auf die Moth wirken. Bill Beaver. (2009). *Full scale measurements on a hydrofoil international Moth*. S. 11

Die Länge des Rumpfes der International Class Moth ist vorgeschrieben und beträgt 3.355 Meter. Das Gewicht ist nicht vorgeschrieben, beträgt jedoch im Normalfall zwischen 10 und 20 Kilogramm [IMCA \(2024\)](#). Die Ausleger oder Flügel einer Moth ermöglichen es dem Segler, auf beide Seiten des Bootes sitzen zu können und mithilfe des Körpergewichts und durch hinaus- bzw. hineinlehnen die Krängung (seitliche Neigung) des Bootes zu bestimmen. Die Moth lässt sich am Besten auf die Luvseite gekrängt segeln. Die Luvkrängung macht das Segeln stabiler und lässt die Foils mehr Auftrieb generieren. In Abbildung 19 ist ein Bild einer Moth zu sehen, bei welcher die verschiedenen wirkende Kräfte auf die Moth eingezeichnet sind. Das Segeln mit Luvkrängung, optimalerweise bei 30 Grad ist zwar sehr ungewöhnlich für eine Segelboot, hat jedoch laut Bill Beaver verschiedene Vorteile: Einerseits vergrößert die Luvkrängung den aufrichtenden Arm (righting arm), also die horizontale Linie zwischen der Gewichts-

kraft des Seglers bzw. der Gewichtskraft des Bootes (Helm weight und Boat weight) und dem Auftrieb des Bootes. Bei einem maximalen aufrichtendem Arm müsste normalerweise der Rand des Bootes die Wasseroberfläche berühren. Ein grösserer aufrichtender Arm sorgt für eine stabilere Lage während dem Segeln. Ausserdem wird dadurch auch righting moment (aufrichtendes Moment) generiert, welches dafür sorgt, dass sich das Boot von alleine in eine aufrechte Position bringt. [Wikipedia \(2024b\)](#) Das Segeln mit Luvkrängung generiert ausserdem eine Seitenkraft auf die bei Krängung geneigte horizontale Komponente der Foils (Foil side force), welche die Seitenkraft der vertikalen Komponente der Foils erweitert, um den Spielraum zu verkleinern. Dies ist von grosser Bedeutung, da mehr Seitenkraft benötigt wird, wenn sich aufgrund der hohen Flughöhe weniger Fläche der vertikalen Komponente im Wasser befindet. Dadurch kann die horizontale Komponente diese fehlende Seitenkraft ausgleichen. Ebenfalls wird durch Luvkrängung die Segel Seitenkraft vergrössert (Sail side force), welche eine Auftriebskomponente (Sail lift) generiert. Dadurch wird die Belastung auf das Hydrofoil reduziert. Zuletzt wird auch der Segler näher an die Wasseroberfläche gebracht, wodurch der Windschatten seines Körpers auf das Segel reduziert wird. Dies ist von grosser Bedeutung, da der Segler laut Bill Beaver etwa 42 Prozent des aerodynamischen Widerstandes ausmacht ([Beaver, 2009](#), S. 12). Sobald das Boot an Leekrängung gewinnt, generieren die Hydrofoils keinen Auftrieb mehr und das Boot fällt zurück auf die Oberfläche. Es ist zwar auch möglich das Boot aufrecht ohne Neigung zu segeln, jedoch ist diese Position sehr instabil und das Risiko ist hoch, dass das Boot beginnt, sich in das Lee zu neigen. ([Hillman, 2018](#), S. 25)

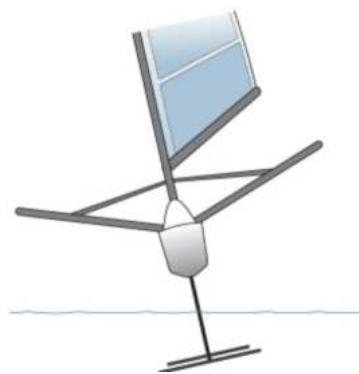


Abbildung 20: Die Moth mit Luvkrängung, also zur Windrichtung geneigt. Alan Hillman. (2018). *The Foiling Dinghy Book - Dinghy Foiling from Start to finish*. S. 25

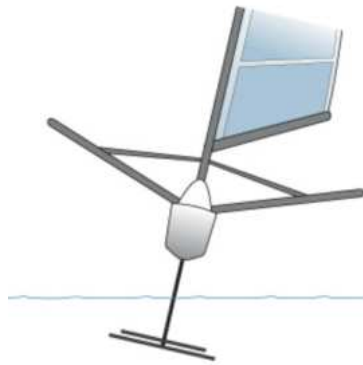


Abbildung 21: Die Moth mit Leekrängung, also vom Wind weg geneigt. Alan Hillman. (2018). *The Foiling Dinghy Book - Dinghy Foiling from Start to finish*. S. 25

Segel und Mast

Ein durchschnittliches Segel der Moth hat eine Grösse von etwa 8.25 Quadratmeter, jedoch gibt es verschiedene Grössen je nach Ausführung. Die Länge des Mastes darf nach Vorschrift nicht 6.25 Meter überschreiten [IMCA \(2024\)](#).

4.4.2 Moth Generationen

Die Tatsache, dass es sich bei der international Class Moth nicht um eine Einheitsklasse handelt, lässt sehr viel Spielraum im Bereich neuer Entwicklungen und experimentellen Designs zu, während Einheitsklassen oft über viele Jahre kaum Veränderungen mit sich bringen, da diese strikte Regelungen für Form und Material besitzen. Die International Class Moth hingegen ist eine sogenannte *development class* (oder auch Entwicklungsklasse), was bedeutet, dass die Bootsklasse bis auf einige Vorschriften der Definition des Bootes (beispielsweise nur eine Person erlaubt, benötigt zwei Foils, darf nur ein Segel besitzen) für alle Hersteller frei gegeben ist [Wikipedia \(2023\)](#). Dies führte dazu, dass sich die International Moth Klasse durch einen Konkurrenzkampf um das schnellste Boot in ständigem Wandel befindet. Mit jeder neuen Generation werden neue Massstäbe gesetzt und Rekorde gebrochen. Der Rahmen des Möglichen wird stets erweitert. Bei einer wichtigen jährlichen Segelmeisterschaft in der Moth-Szene, den Moth Worlds (Weltmeisterschaften, Mitstreiter aus aller Welt treten an dieser Regatta an) am Gardasee in Italien, können die neuesten Trends und die modernsten Boote anhand der Gewinner und deren Boote abgelesen werden. Häufig entsteht ein regelrechter Hype, wenn eine neue Ausführung einer Moth auf den Markt erscheint, welche anschliessend zur ersten Wahl der Weltmeister und den besten Seglern in der Klasse wird. Aktuell liegt das Interesse bei der Bieker Moth vom Neuseeländischen Hersteller *Mackayboats*, diese wird in diesem Kapitel unter anderem genauer besprochen.

Bladerider X8



Abbildung 22: Eine Bladerider Moth mit charakteristischem roten Rumpf. Virginia Veal. (2008). Aufgerufen am 08.06.2024 von <https://www.bladerider.com.au>

Die Bladerider ist eine International class Moth, welche vor allem in den frühen Jahren der Moth Entwicklung entstanden ist. Der Aufbau einer Bladerider unterscheidet sich nicht stark von heute gängigen Moth Versionen, jedoch ist die Zuverlässigkeit aufgrund der damals sehr neuen und bislang unbekannten Technologien nicht mit heutigen Versionen zu vergleichen. Einige Komponenten der damaligen Modelle sind heute weiterentwickelt und völlig neu gestaltet um mehr Leistung, höhere Geschwindigkeiten als auch bessere Manövrierbarkeit zu erzielen. Jedoch gilt die Bladerider Moth als eine der Pioniere im Hydrofoiling der Moth Bootsklasse und wird bis heute von vielen Seglern auf der ganzen Welt gesegelt. Im Jahre 2008 gewann John Harris mithilfe einer Bladerider Moth die Moth World Championship. Die Bladerider dient ebenfalls oft als Einstieg in die Bootsklasse um ein Gefühl für das Segeln mit Hydrofoils zu bekommen, da sie aufgrund des Alters vergleichsweise sehr günstig ist. Die Dimensionen sind sehr ähnlich gegenüber heutigen Modellen, die Länge des Rumpfes beträgt etwa 3.3 Meter und das Gesamtgewicht liegt unter 40 Kg. Schon mit den damaligen Booten konnten Geschwindigkeiten von bis zu 27 Knoten (ca. 50 Km/h) erreicht werden. [Bladerider.com](https://www.bladerider.com) (2010)

Bieker Moth



Abbildung 23: Eine Bieker Moth von Mackayboats in Aktion. Eric Pernet, 2024: Bieker Moth in action. Unveröffentlicht.

Die Bieker Moth ist eine international class Moth des neuseeländischen Herstellers Mackayboats und eine der aktuell besten Booten seiner Bootsklasse, welche in Serienproduktion erhältlich ist. Sie macht sich die neusten Erkenntnisse der Entwicklung zunutze und beinhaltet praktisch alle physischen Faktoren um das Segeln so effizient wie möglich zu gestalten.

Die Bieker Moth V2 war bereits 2021 an den Moth Weltmeisterschaften am Gardasee in Italien die Wahl der sechs besten Segler in der Meisterschaft, darunter fünf Mitstreiter, welche bereits an einem America's Cup (siehe Kapitel 4.3.1) teilnahmen. Daher ist es keine Übertreibung zu behaupten, dass die Bieker Moth aktuell zu den Besten weltweit zählt und das aus gutem Grund: Laut Dave MacDiarmid, einem Direktor von Mackayboats, existiert kein Millimeter an dem Boot, welches nicht auf optimale aerodynamische, hydrodynamische und technische Leistung analysiert wurde. [MackayBoats \(2024\)](#)

Die neueste Ausführung der Bieker Moth, die Bieker V3, soll eine optimale aerodynamische Leistung versprechen. Dies funktioniert mithilfe von verschiedenen Komponenten, welche allesamt vor allem für ein Ziel entwickelt wurden: Die Angriffsfläche für das Wasser als auch für die Luft zu minimieren und dabei so leicht wie möglich zu sein. Dabei spielt vor allem der Rumpf eine grosse Rolle. Dieser wiegt lediglich 15 Kilogramm und ist tropfenförmig gebaut. Von der Spitze bis zum Heck ergibt sich hier ein geschlossener Körper, welcher kaum herausstehende Ecken aufweist. Selbst die Ruderanlage, welche bei anderen Moth Klassen oft lediglich aus Stangen besteht, ist ein geschlossener Körper (Abbildung 24). In Abbildung 25 wurden die Angriffsflächen des Rumpfes per Computergenerierung in einem Spektrum von rot (sehr grosse Angriffsfläche für vorbeiziehende Luft) bis blau (wenig Angriffsfläche) hervorgehoben. Im Gegensatz zu herkömmlichen Moths wie der Bladerider Moth bestehen die Flügel nicht aus Stoff, sondern aus einer Hartschale (Abbildung 26). Zwar ist diese schwerer als Stoff, jedoch können sich die Stoff-Flügel durch das Gewicht des Seglers verformen und dadurch aerodynamische Nachteile hervorrufen. Hartschalen-

Flügel im Gegenteil bleiben in der gleichen Form können bei Manövern vom Segler dessen Kinetische Energie aufnehmen und somit für besser ausgeführte Manöver durch gezielte Gewichtsverteilung sorgen. Ausserdem sind die Hartschalen-Flügel in einem steileren Winkel zum Boot angeordnet, damit eine stärkere Neigung auf die Luvseite möglich ist.



Abbildung 24: Die Ruderanlage der Bieker Moth ist ein geschlossener, aerodynamischer Körper. Eric Pernet, 2024: Ruderanlage Bieker V2. Unveröffentlicht

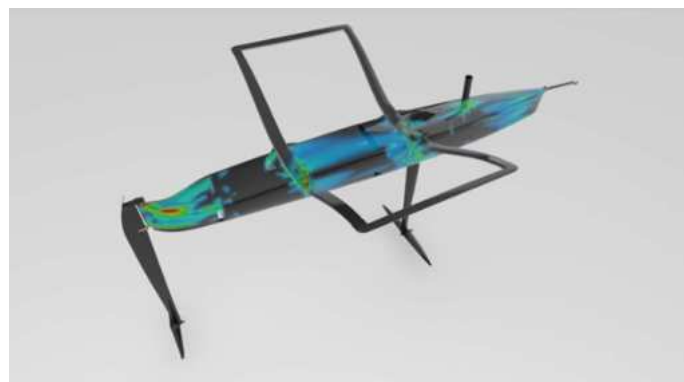


Abbildung 25: Eine Computergrafik zeigt die grössten Angriffsflächen der Bieker V3 auf. MackayBoats. (2023). Aufgerufen am 01.06.2024 von <https://mackayboats.com/index.cfm/news/introducing-the-bm-v3/>

Eine weitere wichtige Komponente sind die Foils der Bieker Moth. Diese fallen sehr klein aus, um die Angriffsfläche zu minimieren und somit den Widerstand des Wassers möglichst klein zu halten. Nicht nur die horizontale Komponente der Foils, sondern auch die vertikale Komponente, welche am Rumpf festgemacht ist, besitzt eine vergleichsweise sehr kleine Fläche. Dies trägt dazu bei, dass die Bieker Moth auch bei leichteren Windstärken schnell und kontrolliert abheben kann. [Faire \(2021\)](#)

Zuletzt sind auch diverse Seile und Einzelteile eine Komponente, die es zu beachten gilt. Auf einer International Class Moth befinden sich diverse Seile zum trimmen des Segels. Lose Seile und Seile, welche nicht richtig eingefädelt sind produzieren zusätzlichen Widerstand, welcher mithilfe einer effizienten Anordnung der Seilführungen ebenfalls minimiert werden kann. Daher wird ein grosser Teil der Seile durch den Rahmen der Flügel und durch das Boot hindurch geführt, damit diese nicht dem Fahrtwind ausgesetzt sind. Lediglich ein kleiner Teil der Seile ist auf jeder Seite zu Bedienungszwecken nach Aussen gerichtet

(Abbildung 26). Auch dort wird darauf geachtet, dass die Seile in der Fliessrichtung des Fahrtwindes geleitet sind. [MackayBoats \(2024\)](#)



Abbildung 26: Die Seile der Bieker Moth führen grösstenteils unter dem Deck durch. Die zusammenführenden Seile in der Mitte können mithilfe einer Platte abgedeckt werden, um den Luftwiderstand zu verringern. Eric Pernet, 2024: Bieker Moth Seitenansicht. Unveröffentlicht

4.5 Faktoren für das effiziente Segeln der Motte

Im Ausblick auf den Praktischen Teil werden in diesem Kapitel die wichtigsten Methoden besprochen, welche ausschlaggebend für das Erreichen von hohen Geschwindigkeiten mit der Moth sind.

4.5.1 Material

Bei der International Class Moth wurden im Laufe der Entwicklung neue Komponenten ins Leben gerufen, welche sich als effizient herausstellten und das Boot allgemein verbessern konnten. Oft sind die Verbesserungen auch mit Gewichtsreduktionen einhergegangen, da bei Segelbooten, insbesondere bei gefoilten Segelbooten, das Ziel ist, das Gewicht des kompletten Bootes (ausgenommen Gewicht des Seglers) so klein wie möglich zu halten. Dadurch werden die meisten Teile der Moth, beispielsweise Rumpf, Mast, Foils oder Ausleger vorwiegend aus Karbonfasern gebaut. Karbonfaser ist ein Stoff, welcher sich vor allem für sein geringes Gewicht bekannt ist. Er lässt sich vielfältig einsetzen und durch seine Zugfestigkeit ist der Stoff sehr robust und ideal für Teile, welche leicht sind und viel Kraft standhalten müssen. Die Fasern werden in ein Gewebe zusammengeführt und können anschliessend mit Epoxidharz getränkt werden (sog. Prepregs). Diese Prepregs können anschliessend in gewünschte Form gebracht werden und unter Druck und Hitze zu einem festen Material verarbeitet werden. Karbonfasern finden nicht nur im Bootsbau, sondern auch im Flugzeugbau vermehrt Anwendung [Wikipedia \(2024a\)](#).

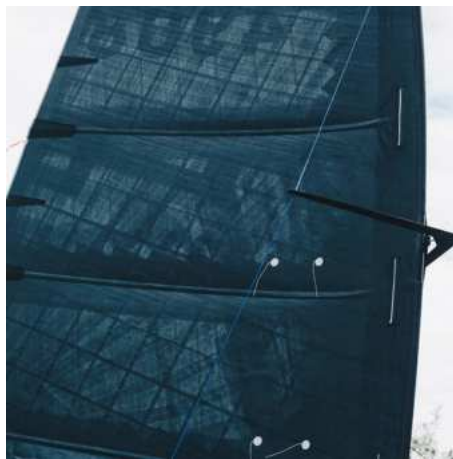


Abbildung 27: Ein 3Di-Segel einer International class Moth, erkennbar an der schwarzen Farbe und den Fasern. North sails. (2024). Aufgerufen am 05.07.2024 von <https://www.northsails.com/fr/pages/international-moth-class>

Die modernen Segel der International Class Moth bestehen, ähnlich wie bei vielen weiteren Sport-Bootsklassen, aus einem Stoff namens 3Di. 3Di Segel werden ebenfalls aus Karbonfasern und Harz hergestellt, normalerweise in einem 70% Kohlefaser zu 30% Harz Verhältnis. Die Kohlefasern werden in verschiedene Richtungen ausgelegt und zu einer Segel-Form gepresst. Diese Art von Segel behält immer eine perfekte Form, aufgrund der Flexibilität der Fasern und da das gesamte Segel aus einem einzigen

Stück und nicht aus mehreren Stoff- oder Folienteilen wie herkömmliche Segel besteht. Durch diese perfekte Form wird beim Segeln weniger Widerstand durch das Segel generiert. Ausserdem sind 3Di Segel im Gegensatz zu herkömmlichen Segel 20% leichter für die gleiche Stärke und tragen daher auch der Gewichtsreduktion bei. Die Segel sind robuster gegen UV-Strahlung, Delamination und Ausdehnung. Sie sind an ihrer charakteristischen schwarzen Farbe erkennbar (siehe Abbildung 27). Northsails (2024) (A. Kerr, persönliche Meinung, 11. April 2024, Anhang 1)

Eine weitere Komponente der modernen Moth Klassen ist der sogenannte Decksweeper. Dieser ist ein Teil des Segels, welcher von der unteren Kante bis auf das Deck des Bootes hinabgeht, also das Segel nach unten verlängert (siehe Abbildung 28). Diese Verlängerung dient vor allem aerodynamischen Zwecken, sie verschiebt die Schnittstelle zwischen dem Rumpf und dem Segel und verkleinert somit den Widerstand und verringert Turbulenzen. Ausserdem wird somit der Schwerpunkt näher auf das Boot gebracht, was zur Stabilität und zur Verringerung des Trägheitsmoments beiträgt. (A. Kerr, persönliche Meinung, 11. April 2024, Anhang 1)



Abbildung 28: Der Decksweeper verlängert das Segel am vorderen Teil und zieht sich bis auf das Boot hinunter. QuantumSails. (2024). Aufgerufen am 05.07.2024 von <https://www.quantumsails.com/en/sails/one-design/inshore/moth>

4.5.2 Aerodynamik und Hydrodynamik

Einer der wichtigsten Vorteile der Hydrofoils der International Class Moth ist die Reduktion des Wasserwiderstandes auf den Rumpf des Bootes. Je weniger Fläche des Bootes sich im Wasser befindet, desto weniger Widerstand bietet das Boot, was wiederum automatisch zu einer Geschwindigkeitserhöhung führt. Aufgrund des fehlenden Wasserwiderstandes auf den Rumpf des Bootes kann diese zwar für das Segeln auf Foils ausser Acht gelassen werden, jedoch hat auch der Rumpf aerodynamisch einen sehr grossen Einfluss. Laut Beaver ist der aerodynamische Widerstand beim Segeln im Amwindkurs (Kurs, bei dem das Boot mit einem sehr kleinen Winkel zum Wind segelt) mit dem hydrodynamischen Widerstand fast gleichzusetzen (Beaver, 2009, S. 15). Somit ist es sinnvoll, den Rumpf aerodynamisch so effizient wie

möglich zu gestalten, indem der Rumpf so klein wie möglich gehalten wird, während diverse Rohre des Bootes verkleidet werden, ähnlich der Ruderanlage der Bieker Moth (siehe Kapitel 4.4.2).

Neben der Optimierung der Hülle kann darauf geachtet werden, die Foils so klein wie nur möglich zu halten. Auch die Fläche der Foils, horizontale- als auch vertikale Komponente sorgen für hydrodynamischen Widerstand. Daher ist es auch bei der vertikalen Komponente des Foils wichtig, so wenig Fläche wie möglich dem Wasserwiderstand auszusetzen. Je höher das Boot fliegt, desto weniger Widerstand entsteht durch die Foils (Beaver, 2009, S. 15). Jedoch sollte das Boot nicht zu hoch geflogen werden, da die Foils bei Kontakt mit der Wasseroberfläche instabil werden und es zu einem Strömungsabriss kommen kann.

4.5.3 Praxis

Um mehr Geschwindigkeit zu erreichen, können nicht nur die technischen Komponenten des Bootes optimiert werden. Auch die praktischen Fähigkeiten der segelnden Person tragen zu einem effizienteren Segeln bei. Primär sollte zwar die Kontrolle des Bootes im Vordergrund stehen, sobald dies jedoch gemeistert ist, kann mithilfe von detaillierten Manövern und Gewohnheiten dafür gesorgt werden, dass der Wind und die Möglichkeiten des Bootes vollständig ausgenutzt werden. Bei Manövern wie der Wende und der Halse können sich Segler Schrittabfolgen antrainieren, welche das Boot nur auf das Nötigste abbremsen und so schnell wie möglich wieder auf die Höchstgeschwindigkeit bringen können. Es sei hier angemerkt, dass einige dieser Techniken sehr kompliziert sind und sehr viel Erfahrung erfordern. Ebenfalls ist es wichtig zu wissen, dass aufgrund der ständigen Weiterentwicklung der Moth bei weitem noch nicht die besten Techniken gefunden sind. Es könnten noch andere Techniken entdeckt werden, welche weitaus effizienter sind. Wie bereits in Kapitel 4.4.1 aufgeführt, ist die Moth darauf ausgelegt, dass sie, um fliegen zu können, mit Luvkrängung gesegelt werden muss. Zu Beginn kann sich das Segeln mit Luvkrängung ungewohnt anfühlen, da konventionelle Segelboote oft eher die Tendenz haben, Leekrängung zu erzeugen. Dieser Punkt ist sehr wichtig um einerseits abheben zu können, als auch eine stabile Position halten zu können. (Hillman, 2018, S. 25) Aufgrund der hohen Geschwindigkeiten während dem Foilen kann die Windrichtung manchmal etwas irritierend werden. Zwar existiert immer der Wind, welcher das Boot vorantreibt, der sogenannte true wind. Jedoch entsteht durch die Geschwindigkeit noch ein Fahrtwind ähnlich wie beim Autofahren, welcher apparent wind, also scheinbarer Wind, genannt wird. Dieser apparent wind weht immer von vorne und hat Auswirkungen auf den true wind. Die Folge davon ist, dass auch wenn der Wind vom Heck kommt, der Fahrtwind, welcher durch die Geschwindigkeit generiert wird, die spürbare Windrichtung auf dem Boot in Richtung Bug verschiebt. Das bedeutet, je höher die Geschwindigkeit ist, desto mehr weht der Wind von vorne. Dadurch kann bei hohen Geschwindigkeiten das Segel relativ stark angezogen werden, sowie bei Wind vom Heck kommend, bei dem normalerweise das Segel gelöst wird um den Wind von Hinten mit dem Segel aufzufangen. (Hillman, 2018, S. 25 & 26)

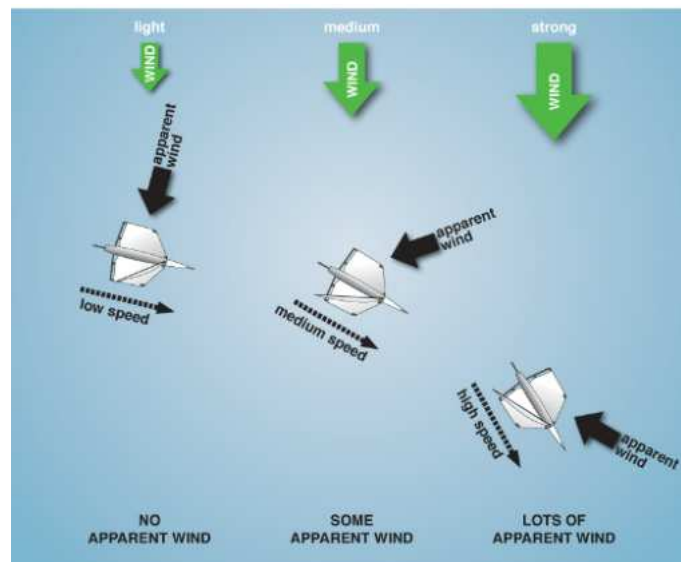


Abbildung 29: *Der Apparent Wind verschiebt die Richtung des spürbaren Windes in richtung Bug.* Alan Hillman. (2018). *The Foiling Dinghy Book - Dinghy Foiling from Start to finish.* S. 26

Um die Seite zu wechseln und eine andere Richtung mit dem Boot einzuschlagen, muss eine Wende, bzw. eine Halse erfolgen. Das bedeutet, dass das Boot, da nicht im Wind gesegelt werden kann, mit dem Bug, bzw. mit dem Heck durch den Wind gehen muss. Bei diesem Vorgang verliert das Boot stark an Geschwindigkeit, da es abgebremst wird. Jedoch gibt es Techniken, um so schnell wie möglich wieder auf hoher Geschwindigkeit zu segeln und somit so wenig Geschwindigkeit wie möglich in der Halse, bzw. der Wende zu verlieren. Bei einer Halse bzw. Wende kann entweder der Flug auf den Hydrofoils beibehalten, oder das Boot kann zuerst verlangsamt, auf die Wasseroberfläche gebracht, und anschliessend durch den Wind gesteuert werden. Die zweite Variante ist sehr sicher und für Beginner einfacher, jedoch wird sehr viel Geschwindigkeit verloren. Die erste Variante wiederum ist sehr schwer und kann nur mit viel Übung gemeistert werden. Sobald sie jedoch durchgeführt werden kann, kann sehr viel Geschwindigkeit beibehalten werden.

4.5.4 Wetter- und Wasserbedingungen

Die Wetterbedingungen haben neben der Windgeschwindigkeit ebenfalls einen grossen Einfluss auf das Segelboot, in diesem Fall auf die International Class Moth. Unter anderem sind vor allem die Wassertemperatur, Wellengang und der Wind ausschlaggebend.

Wassertemperatur

Die Effekte der Wassertemperatur auf die Hydrofoils sind laut dem Alinghi Ingenieur Aurore Kerr sehr komplex und hängen von vielen verschiedenen Faktoren ab. Es gibt jedoch gewisse Tendenzen, welche in Betracht gezogen werden können.

Während die Wassertemperatur steigt, wird dessen Dichte verringert, wodurch Hydrofoils weniger Auftrieb generieren können als in dichterem Wasser. Auch ist die Viskosität bei höherer Wassertemperatur kleiner, was bedeutet, dass die Hydrofoils potentiell weniger Widerstand erfahren als in kälterem Wasser. Dadurch könnten theoretisch bei wärmeren Wassertemperaturen höhere Geschwindigkeiten erreicht werden als bei tiefen. Im Endeffekt seien die Einflüsse sehr komplex und verglichen mit anderen Faktoren wie dem Material sehr gering (A. Kerr, persönliche Meinung, 11. April 2024, Anhang 1).

Salzgehalt

Bei dem Salzgehalt des Wassers meint Kerr, dass Salzwasser im Vergleich zu Süßwasser dichter sei. Dadurch könnte das Hydrofoil ähnlich wie bei tiefen Wassertemperaturen mehr Auftrieb generieren als in Süßwasser. Salzwasser kann aber wiederum dazu führen, dass das Hydrofoil mehr Widerstand erfährt als in Süßwasser, ausserdem können die Korrosionseffekte des Salzwassers dazu führen, dass das Boot als auch die Hydrofoils nach einiger Zeit und viel Nutzung abgenutzt werden und somit die Leistung einschränken. Hier gilt ebenfalls, dass die Einflüsse sehr komplex und verglichen mit anderen Faktoren sehr gering seien und dadurch oft nicht stark in Betracht gezogen werden (A. Kerr, persönliche Meinung, 11. April 2024, Anhang 1).

Wellengang und Wind

Laut Kerr ist der Wellengang, beziehungsweise die Wasseroberfläche von Bootsklasse zu Bootsklasse, sehr verschieden und jede Bootsklasse ist für bestimmte optimale Wasserverhältnisse ausgelegt. Während Boote wie beispielsweise die Imoca class (siehe Kapitel [4.3.2](#)) für sehr starken Wind und daraus resultierendem Wellengang auf hoher See ausgelegt sind, sind gefoilte inshore-Boote im besten Fall für flaches Wasser ohne Wellen bei etwa 15 Knoten Windgeschwindigkeit ausgelegt. Das Design der Hydrofoils kann zwar den Verhältnissen entsprechend angepasst werden, jedoch wird generell flaches Wasser bevorzugt. (A. Kerr, persönliche Meinung, 11. April 2024, Anhang 1).

Bei starkem Wellengang und vor allem wenn das Boot schneller ist als die Welle selbst, kann es passieren, dass sich das Foil bei Erreichen eines Wellentals ausserhalb des Wassers befindet und dadurch abrupt an Auftrieb verliert und zudem einen negativen Angriffswinkel besitzt. Dies kann beim nächsten Wellenberg zu einem Absturz auf das Wasser führen. Ingenieure berücksichtigen dieses Problem indem sie Foils designen, welche die Unfallgefahr des Abstürzens bei Wellen minimieren können. [Rosado \(1999\)](#)

Während zu wenig Wind das Boot nicht genug in Fahrt bringen kann um abzuheben, ist zu viel Wind ebenfalls nicht optimal. Durch zu viel Wind ist das Risiko sehr gross, Materialschäden zu verursachen und die Gefahr für den Segler steigt drastisch. Ausserdem kann das Boot bei zu viel Wind instabil werden und das Segel kann dem zu grossen Druck nicht mehr standhalten.

5 Material und Methoden

Um die Effektivität von Hydrofoils aufzuzeigen und auf deren Einfluss beim Segeln mit hohen Geschwindigkeiten hinzuweisen, wurden Geschwindigkeitsmessungen mit einer gefoilten sowie einer nicht gefoilten Jolle durchgeführt. Die Ergebnisse wurden anschliessend in Diagrammen, darunter grösstenteils Polardiagrammen, veranschaulicht und verglichen.

5.1 Erstes Experiment

Im ersten Experiment wurde mithilfe einer International class Moth (siehe Kapitel 4.4), ein Polardiagramm erstellt und mit Polardiagrammen anderer Bootsklassen verglichen. Damit soll erforscht werden, wie sich Boote mit Hydrofoils im Vergleich zu gewöhnlichen Segelbooten verhalten und ob die Geschwindigkeit gefoilter Boote im Vergleich zu gewöhnlichen Segelbooten in allen Bereichen überlegen ist. Bei der Auswertung des Experiments soll die Frage geklärt werden, ob ein mit Hydrofoil ausgestattetes Segelboot, in diesem Fall eine Motte, einem herkömmlichen Segelboot wie dem 29er (Für genauere Erklärung des Bootes siehe 32, 29er) überlegen ist und in welchen Bereichen sich die beiden Bootstypen voneinander unterscheiden. Aufgrund der im Theorieteil aufgeführten Techniken der International Class Moth und des Hydrofoiling liegt die Hypothese nah, dass das gefoilte Boot wahrscheinlich in allen Kursen schneller sein wird als der 29er Skiff. Jedoch ist es gut möglich, dass der 29er Skiff dank des Gennaker Segels in den Raumwindkursen vor allem bei kleineren Windgeschwindigkeiten von 5 und 10 Knoten schneller ist als die International Class Moth. Die Moth könnte jedoch im Raumwindkurs ebenfalls schneller sein als im Amwindkurs, da normalerweise bei Wind vom Heck die meisten Segelboote höhere Geschwindigkeiten erreichen können als im Amwindkurs. Der 29er könnte auch bei der Windgeschwindigkeit von 5 Knoten schneller sein, da die Moth bei sehr wenig Wind nicht genug schnell sein könnte, um von den Hydrofoils einen Nutzen ziehen zu können. Vergleicht man die Höchstgeschwindigkeiten, so wird die Moth hypothetisch in allen Kursen eine höhere Höchstgeschwindigkeit aufweisen als der 29er Skiff.

Um die Polardiagramme für das erste Experiment zu erstellen und genaue Resultate zu erzielen, wurden für die Grundlage des Experiments die Daten für Windgeschwindigkeit, Bootsgeschwindigkeit sowie der Winkel des Windes, welcher auf das Boot trifft, erfasst. Die Daten basieren auf dem Segeln in verschiedenen Windbedingungen und mit jeweils zwei verschiedenen Bootsklassen, einer Bladerider X8 Moth (Abbildung 30) und einem 29er Skiff, erreicht. Das Erfassen der Bootsgeschwindigkeit, der sogenannten SOG (speed over ground), ermöglicht ein eigens für den Einsatz im Segelsport vorgesehenes GPS-Gerät. Es handelt sich dabei um einen Sailmon MAX mini (Abbildung 31). Die Robustheit und kompakte Grösse des Geräts ermöglicht einen Einsatz selbst auf den kleinsten Booten, wie in diesem Fall der Moth. Das Messgerät wird mit einem Akku betrieben und verfügt über GPS- sowie Bewegungssensoren, welche die Geschwindigkeit des Bootes sowie den Neigungswinkel aufzeichnen und mit einer Applikation auf einem



Abbildung 30: Die Bladerider X8 International class Moth, welche zur Durchführung des ersten Experimentes benutzt wurde. Eric Pernet, 2024: Bladerider X8 Moth. Unveröffentlicht.

Smartphone in Form von csv-Dateien wiedergeben können. Diese Rohdaten können schliesslich als Diagramme aufbereiten werden. Für ein Polardiagramm wird nicht nur die Bootsgeschwindigkeit benötigt. Zusammen mit der Bootsgeschwindigkeit muss auch die dazugehörige Windgeschwindigkeit gemessen werden, die mit dem Segelboot erreicht wurde. Für das Messen der Windgeschwindigkeit wurde ein handliches Anemometer (Windgeschwindigkeitsmessgerät) benutzt, welches mithilfe eines kleinen Rotors die aktuelle Windgeschwindigkeit in Knoten misst und sie auf einer Digitalanzeige wiedergibt. Ebenso wird der Kurs des Segelbootes, oder auch der Winkel in welchem das Boot zum Wind steht, benötigt. Um sicherzustellen, dass stets der richtige Kurs gesegelt wird, wurde ein Stander (Windrichtungsmesser, kleiner Pfeil, welcher die Windrichtung angibt) eingesetzt. Dieser ist etwa 10 Zentimeter lang und kann am Mast

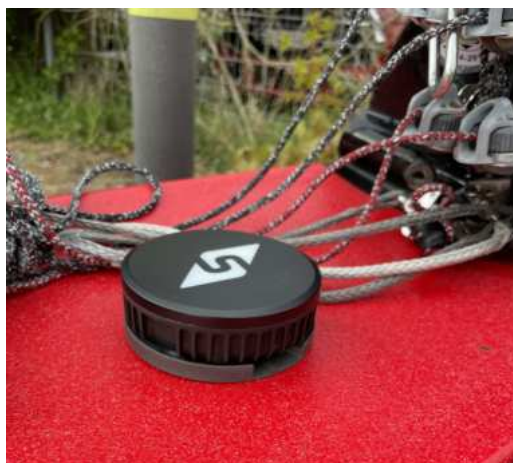


Abbildung 31: Der Sailmon MAX mini wurde mithilfe eines speziellen Adapters auf den Rumpf der Bladerider X8 montiert. Eric Pernet, 2024: Sailmon montiert auf Bladerider Moth. Unveröffentlicht.

des Bootes angebracht werden, um während dem Segeln den Überblick über die Windrichtung behalten zu können.

Bei der International class Moth, welche im Experiment als das primär genutzte Segelboot diente, handelt es sich um ein Boot der Klasse Bladerider (siehe Kapitel 4.4.2). Auch wenn diese Bootsklasse nicht mehr auf dem modernsten Stand der Technik ist und der Spitzengeschwindigkeiten anderer Boote nicht mithalten kann, kann sie dennoch als ein durchschnittliches Boot für die Bootsklasse eingestuft werden. Auf die Effizienz des Bootes im Vergleich zu einer moderneren Moth wird im zweiten Experiment erneut eingegangen.

29er



Abbildung 32: Der 29er Skiff mit hinaufgezogenem Gennaker Segel. Ovingtonboats. (2024). Aufgerufen am 22.08.2024 von <https://ovingtonboats.com/29er/>

Der 29er ist ein für Jugendliche und Erwachsene designtes One Design-Boot. Das Segelboot ist ein sogenannter Skiff: eine kleinere Segeljolle, welche aufgrund der Bauweise mit einem flachen Bootsrumpf besonders schnell ins Gleiten kommt. Ein Skiff nutzt in den meisten Fällen für Raumwindkurse (Segelkurs, in dem der Wind von Hinten auf das Boot auftrifft) den Gennaker, ein asymmetrisches Segel, welches bei Amwind- und Halbwindkursen eingezogen und im Segelboot verstaut werden kann. Die Segelfläche beträgt 12.5 Quadratmeter, der Gennaker trägt zu weiteren 17 Quadratmetern bei. Der 29er wird mit einer Crew bestehend aus zwei Personen gesegelt, einem Steuermann und einem Vorschoter. Der Steuermann sitzt auf dem Rand des Bootes, während der Vorschoter im Trapez hängt, um mit dem Gewicht das Boot aufrecht zu halten. *Skiff (Segeln)* (2024) Die Bootsklasse zeichnet sich vor allem durch ihre Wendigkeit und ihrer hohen Geschwindigkeit im Vergleich mit ähnlichen Bootsklassen wie der 420er Jolle. Bei sehr guten Bedingungen kann der 29er im Raumwindkurs zwischen 15 und 20 Knoten Höchstgeschwindigkeit erreichen.

Der 29er Skiff ist vor allem für den Einstieg in die Skiff-Klasse konzipiert. Er kann auch von Jugendlichen gesegelt werden und benötigt lediglich ein Crew-Gewicht von mindestens 100 Kilogramm. Die grössere

Stufe des 29ers ist die 49er Klasse, ebenfalls eine Skiff-Klasse, jedoch mit grösserer Segelfläche und grösserem Rumpf. Der 49er ist eine olympische Bootsklasse. [29er Jolle \(2023\)](#)

Durchführung

Um genügend Daten zur Geschwindigkeit zu sammeln und vielfältige Ergebnisse zu erlangen, wurden die Geschwindigkeitsmessungen mit der Moth als auch mit dem 29er bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten durchgeführt. Es wurde darauf geachtet, dass vor allem genug Messungen bei grösseren Windgeschwindigkeiten von 10 bis 15 Knoten gesammelt werden, da diese am vielfältigsten ausfallen können. Bei wenig Wind ist normalerweise nach einigen Messungen die Höchstgeschwindigkeit des Bootes bei verschiedenen Kursen schnell gefunden.

Die Messungen sind, abhängig von der Wetterlage und dem Wind, an verschiedenen Tagen in strömungsfreien Gewässer aufgenommen worden. Sobald der Wind wie erwünscht ist und das Wetter sich nach denen im Kapitel 3.6.5 beschriebenen Faktoren verhält, kann gesegelt werden. Es wird grösstenteils auf dem Untersee auf der Höhe von Steckborn TG gesegelt, zusätzlich erfolgten manche Messungen auch auf dem Comersee in Italien. Messungen aus verschiedenen Regionen können die Geschwindigkeit des Bootes nicht beeinflussen, da für dieses Experiment lediglich der Wind, unabhängig vom Gewässer, vorausgesetzt es existiert keine Strömung, eine Rolle spielen sollte.

Während dem Segeln wurde darauf geachtet möglichst oft in verschiedenen Kursen zu Segeln, um für jeden Kurs ähnlich viele Messungen zu erhalten. Um immer im gleichen Winkel zum Wind zu segeln und somit möglichst genau den Kurs einhalten zu können, wurde mithilfe des Standers, welcher oben erklärt wird, vereinfacht. Ebenfalls wurde darauf geachtet, dass der Kurs für mindestens 2 Minuten oder länger gehalten wird, damit ein Mittelwert der Geschwindigkeit in den vergangenen 2 Minuten als Durchschnittsgeschwindigkeit genommen werden kann. Dieser Wert ist im Endeffekt viel aussagend als eine Geschwindigkeit, welche für wenige Sekunden gemessen wurde und eventuell eine Windböe für eine überdurchschnittliche Geschwindigkeit verantwortlich ist.

5.2 Polardiagramm

Die verwendeten Polardiagramme bestehen aus drei verschiedenen Messdaten, welche auf einem einzigen Diagramm zusammengefasst werden können. Die Geschwindigkeit beim Segeln wird normalerweise in der Masseinheit Knoten angegeben. Ein Knoten entspricht einer nautischen Meile, also 1.852 Kilometer pro Stunde. Dafür wird erstens der TWS (True Wind Speed) benötigt, also die wahre Windgeschwindigkeit. Es handelt sich hierbei um die Windgeschwindigkeit, welche während der Messung über die Wasseroberfläche weht und das Segelboot antreibt. [Sailing \(2024\)](#) Den nächsten benötigten Faktor bildet der SOG (Speed Over Ground), also die Geschwindigkeit über dem Boden. Der SOG ist die Geschwindigkeit des Segelbootes, welche zu einem bestimmten TWS aufgenommen wurde. Diese Variable ist im Endeffekt die Wichtigste, da sie zeigen soll, wie schnell sich das Boot durch das Wasser bewegen kann. Zuletzt wird der TWA (True Wind Angle), also der wahre Windeinfallswinkel benötigt. Segelboote können in verschiedenen Winkeln zum Wind segeln. Von etwa 30 bis 40 Grad Windeinfallswinkel in das Segel bis hin zu 180 Grad. Die möglichen Winkel sind je nach Bootstyp sehr verschieden: Manche Boote können sehr nah am Wind segeln während andere bessere Eigenschaften für das Segeln mit Vorwind haben. Der SOG hängt daher sehr stark vom Windeinfallswinkel ab.

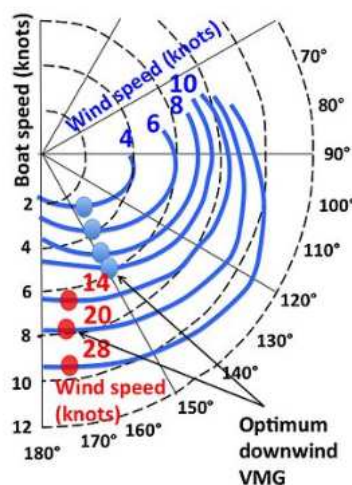


Abbildung 33: Ein Beispiel für ein fertiges Polardiagramm. Wikipedia. (2022). Polar diagram (sailing).

In der oben gezeigten Abbildung handelt es sich um ein typisches Polardiagramm, welches hier lediglich zu Erklärungszwecken dient. Auf dem äussersten Kreis sind die einzelnen TWA (True Wind Angle), also Winkel zum Wind abgebildet. Diese beginnen in diesem Beispiel bei 70 Grad, da näher am Wind mit dem in diesem Beispiel verwendeten Segelboot keine Geschwindigkeiten aufgestellt werden können. Die TWA enden bei 180 Grad, also wenn der Wind genau von hinten auf das Boot weht. Die linke Seite des Polardiagramms bleibt leer, da ein Segelboot symmetrisch ist und die Graphen lediglich auf gespiegelt wären.

Die Ringe, welche sich von innen bis hin zur Aussenlinie reihen, repräsentieren die Geschwindigkeit des Bootes in Knoten. Sie beginnen bei 2 und enden bei 12 Knoten, also gibt es hier einen Spielraum von etwa 4 Km/h bis 22 Km/h. Nun können die blauen Graphen eingezeichnet werden. Jeder Graph steht für eine Windgeschwindigkeit, bei der gemessen wurde. In diesem Beispiel wurde bei Windgeschwindigkeiten von 4, 6, 8, 10, 14, 20 und 28 Knoten gemessen. Wenn nun beispielsweise die Geschwindigkeit des Segelbootes bei 10 Knoten TWS und eines TWA von 150 Grad aus dem Diagramm abgelesen werden soll, kann nun am mittleren Graph abgelesen werden, dass die Geschwindigkeit des Bootes bei diesen Bedingungen etwa 6 Knoten beträgt.

Ein Polardiagramm kann sehr hilfreich sein um die Geschwindigkeiten des Bootes in verschiedenen Windstärken ablesen zu können. Der Aufbau eines Polardiagramms ist für jedes beliebige Boot gleich, weshalb sich dieser Diagrammtyp zur Veranschaulichung der Leistung eines Segelbootes sehr gut eignet. Ebenso eignen sich Polardiagramme auch zum Vergleich verschiedener Segelboote, sei es die gleiche Bootsklasse oder eine komplett verschiedene; es kann gut veranschaulicht werden, welche Vorteile ein Segelboot gegenüber dem anderen bieten kann.

Erstellen eines Polardiagramms

Um eigene Polardiagramme herzustellen und diese mit den selbst erfassten Daten zu füllen wurde die Programmiersprache Python benutzt. In dieser können mithilfe der Library *matplotlib* Diagramme erstellt werden, darunter auch Polardiagramme. Mithilfe des Machine learning Programms ChatGPT (vgl. Anhang 2) wurde anschliessend am 6. Februar 2024 ein Programm generiert, welches sich für die Abbildung von Segelgeschwindigkeiten in verschiedenen Windstärken und TWA eignet (ChatGPT, maschinelle Kommunikation, 6. Februar 2024, Anhang 2). Das generierte Programm wurde anschliessend noch etwas modifiziert, beispielsweise wurden weitere Graphen für verschiedene Windstärken hinzugefügt. Der veränderte Code ist im Anhang 3 abgebildet. In der Abbildung 34 ist ein beispielhaftes Diagramm abgebildet, welches mithilfe des modifizierten Codes generiert wurde. Dieses Diagramm ist nicht repräsentativ und dient lediglich zur Veranschaulichung des genutzten Diagrammtyps.

Mithilfe des Programmes von Sailmon können anschliessend die Daten von Geschwindigkeit, Kompasskurs und zusammenhängender Zeit ausgewertet werden. Sailmon stellt zwar eine Veranschaulichung der Daten mit Graphen und einer Karte zur Verfügung, jedoch kann ebenfalls eine csv-Datei heruntergeladen werden, um diese anschliessend in Excel bearbeiten zu können. Die csv-Dateien beinhalten alle gemessenen Werte in den Spalten, während jede Zeile eine Uhrzeit der Messung auf die Sekunde genau darstellt. Die Messintervalle betragen ungefähr 2 Sekunden.

Um das csv-Dokument (Alle csv-Dokumente können unter dem Link in Anhang 4 eingesehen werden) für das Polardiagramm aufzubereiten, mussten die Daten zuerst nach dem COG (Course Over Ground, Kompasskurs) aufsteigend sortiert werden, damit anschliessend alle Messungen für einen jeweiligen Kurs

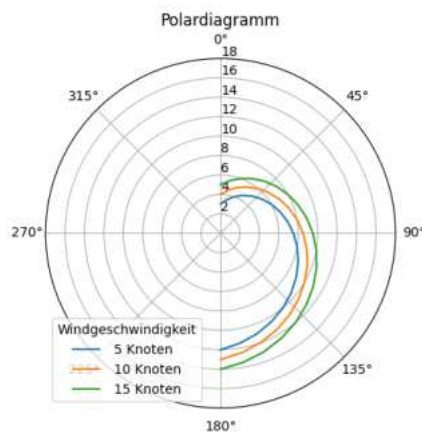


Abbildung 34: Ein Beispiel für ein durch Python generiertes Polardiagramm. Eric Pernet, 2024: Polardiagramm Python Beispiel. Unveröffentlicht.

bestimmt werden können. Anschliessend wurde der Kompasskurs des Windes bestimmt, damit der Einfallswinkel des Windes auf das Boot mithilfe des Kompasskurses des Bootes unabhängig von der Geschwindigkeit des Bootes bezeichnet werden kann. Dies ist ausschlaggebend, da bei höheren Geschwindigkeiten der Fahrtwind den Einfallswinkel des Windes auf dem Boot verfälscht, und die Windrichtung während dem Segeln nur verfälscht abgelesen werden kann. Für jede csv-Datei wurden somit die Kompasskurse des Bootes berechnet, bei welchen das Boot den gewünschten TWA besitzt. Somit sind für jeden TWA zwei verschiedene Kompasskurse bestimmt worden, da das Boot jeweils auf beiden Seiten einmal den gleichen TWA haben kann, mit zwei Ausnahmen: Beim Wind genau von Vorne (TWA ist 0 Grad) und beim Wind genau von Hinten (TWA ist 180 Grad). Diese TWA's müssen für jede csv-Datei neu berechnet werden, da der Wind nicht immer aus der gleichen Himmelsrichtung kommt und die Messungen nicht alle am gleichen Tag stattfanden.

Die Polardiagramme werden in einem Intervall von 10 Grad dargestellt, das bedeutet dass bei dem TWA von 0 bis 180 Grad jeweils alle 10 Grad eine Geschwindigkeit dargestellt wird. Aufgrund der Messgenauigkeit ist 10 Grad die beste Option, denn bei kleineren Intervallen werden die Daten ungenau und überschneiden sich.

Hin- und wieder betragen die gemessenen Geschwindigkeiten unter 1 Knoten (beispielsweise 0.03 Knoten), obwohl die Windgeschwindigkeit hoch war. Bei solchen Messungen handelt es sich beispielsweise um Wenden, als auch das Einwassern (das Boot vom Land ins Wasser befördern) des Bootes und Kenterungen, bei denen das Boot für eine kurze Zeit eine grosse Breite an Kompasskursen ansteuert. In solchen Fällen ist die Geschwindigkeit des Bootes tiefer als beim gesegelten Kurs. Solche Messungen sind nicht repräsentativ und wurden aus der Berechnung rausgenommen. Daher werden lediglich alle Geschwindigkeiten über einem Knoten berücksichtigt.

Bei einem TWA wurden Messungen von plus beziehungsweise minus 5 Grad miteinander berechnet. Das bedeutet, wenn beispielsweise der Mittelwert aller Messungen bei einem TWA von 30 Grad berechnet wird,

fließen alle Geschwindigkeitswerte zwischen 25 und 35 Grad mit in die Berechnung ein. Diese Abweichung wurde bestimmt, da es mit einem Segelboot nahezu unmöglich ist, den Kompasskurs auf genau einem Grad ohne Abweichung zu halten und sonst eine grosse Anzahl an Messwerten verloren gehen würde.

Neben den Diagrammen in denen der Mittelwert aller Geschwindigkeiten über einem Knoten eine Rolle spielen, wurden die Höchstgeschwindigkeiten der Boote auch anders dargestellt. Das bedeutet, dass diese Graphen die höchste erreichte Bootsgeschwindigkeit jede 10 Grad TWA bei der jeweiligen Windgeschwindigkeit darstellen.

Alle Geschwindigkeiten, welche für die Polardiagramme benötigt wurden, sind im Anhang 5 aufgelistet.

5.3 Zweites Experiment

Im zweiten Experiment soll, wie bereits in Kapitel 5.1 erwähnt, der Unterschied der Geschwindigkeiten zwischen einer älteren Moth wie der Bladerider und einer aktuell sehr modernen und wettkampffähigen Moth aufgezeigt werden. Hierfür wird eine sog. Bieker-Moth des neuseeländischen Bootshersteller Mackayboats verwendet. Diese verfügt über alle modernen Eigenschaften und Module, welche zur Verbesserung der Geschwindigkeit des Bootes beitragen. Wie bereits in Kapitel 4.5.1 aufgeführt, gibt es verschiedene technische Verbesserungen, welche zu höheren Geschwindigkeiten beitragen können. Das Experiment und das anschliessende Vergleichen soll die Frage beantworten, welchen Unterschied ein Jahrzehnt an Entwicklung und Verbesserung der Moth zur Folge trägt. Da die Moth eine Konstruktionsklasse ist, wurde diese über viele Jahre durch eine immer besser werdende Erfahrung der Entwickler verbessert. Es soll vor allem auf die Unterschiede der Geschwindigkeiten eingegangen werden, aber auch auf die Fähigkeit beider Boote Manöver auszuführen und hohe Geschwindigkeiten halten zu können. Hypothetisch sollte die Bieker Moth in allen Kursen schneller sein als die Bladerider X8 Moth. Es bleibt nur offen, um wie viel sie schneller ist als die ältere Bladerider Moth. Den Erwartungen nach könnte die Bieker Moth vor allem im Raumwindkurs um ein Vielfaches schneller sein, im Amwind- bzw. Halbwindkurs könnte sie zwischen 5 und 7 Knoten schneller sein.

Durchführung

Um die beiden Boote zu vergleichen, wurden wie im ersten Experiment selbst aufgestellte Polardiagramme der beiden Boote genutzt. Das Polardiagramm der älteren Moth (Bladerider X8) wurde aus dem ersten Experiment übernommen, während die Geschwindigkeiten der Bieker Moth der Besitzer, Roman Berti aufstellte. Anschliessend sind auch diese Ergebnisse als Polardiagramm zusammengetragen worden. Jedoch ist der Vergleich lediglich eines Graphen beider Polardiagramme für den Zweck dieses Experiments völlig ausreichend, weshalb für das Polardiagramm der Bieker Moth lediglich Daten bei 10 Knoten Windgeschwindigkeit aufgenommen wurden.

6 Ergebnisse

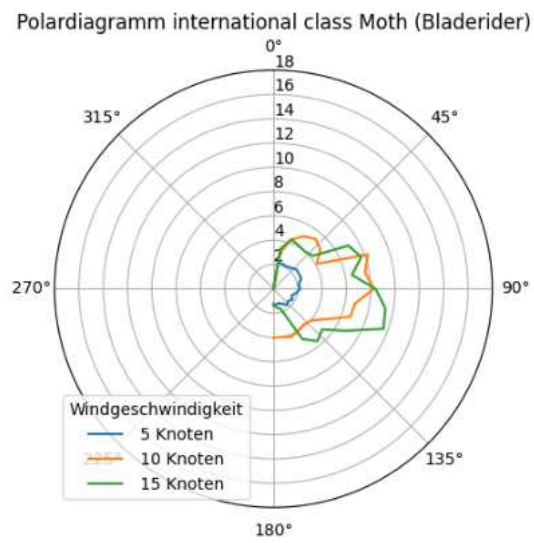


Abbildung 35: Polardiagramm einer international class Moth (Bladerider X8), gemessen bei Windgeschwindigkeiten von 5, 10 und 15 Knoten. Bootsgeschwindigkeiten (SOG) sind die Mittelwerte aller Werte über 1 Knoten. Eric Pernet, 2024: Polardiagramm international class Moth (Bladerider), Mittelwerte. Unveröffentlicht

Polardiagramm International class Moth (Bladerider), nur Höchstwerte

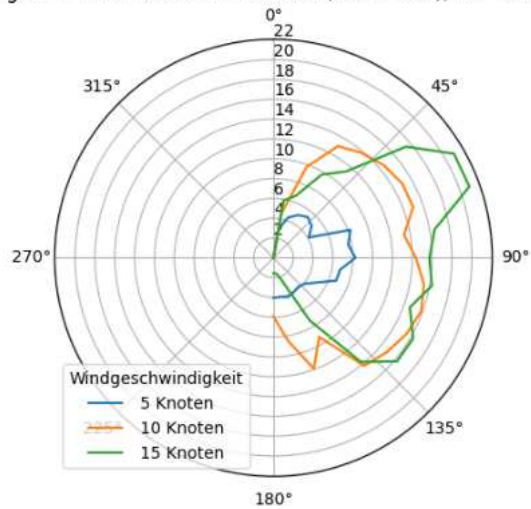


Abbildung 36: Polardiagramm einer international class Moth (Bladerider X8), gemessen bei Windgeschwindigkeiten von 5, 10 und 15 Knoten, Bootsgeschwindigkeiten (SOG) sind die Höchstwerte aller Werte. Eric Pernet, 2024: Polardiagramm international class Moth (Bladerider), Höchstwerte. Unveröffentlicht.

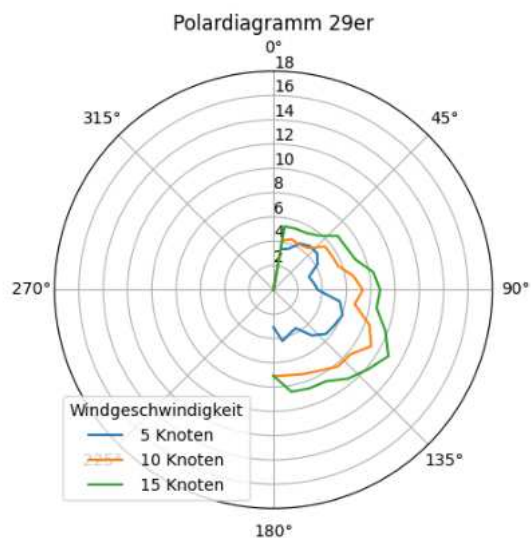


Abbildung 37: Polardiagramm eines 29er Skiff, gemessen bei 5, 10 und 15 Knoten Windgeschwindigkeit, Bootsgeschwindigkeiten (SOG) sind die Mittelwerte aller Werte über 1 Knoten. Eric Pernet, 2024: Polardiagramm 29er Skiff, Mittelwerte. Unveröffentlicht.

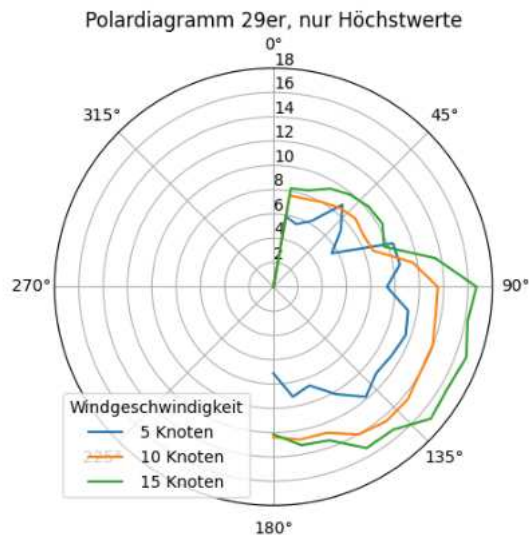


Abbildung 38: Polardiagramm eines 29er Skiff, gemessen bei 5, 10 und 15 Knoten Windgeschwindigkeit, Bootsgeschwindigkeiten (SOG) sind die Höchstwerte aller Werte. Eric Pernet, 2024: Polardiagramm 29er Skiff, Höchstwerte. Unveröffentlicht.

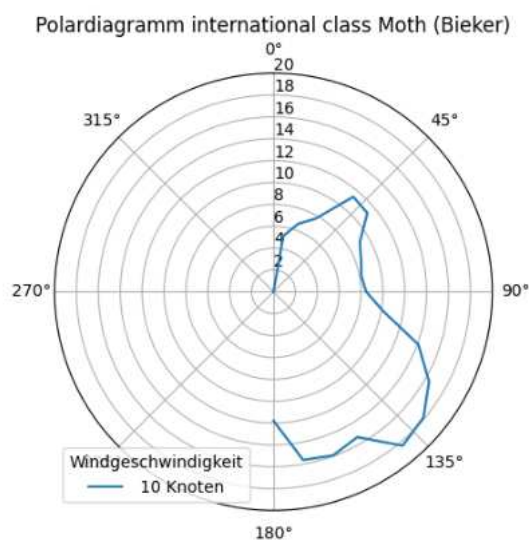


Abbildung 39: Polardiagramm einer international class Moth (Bieker V2), gemessen bei 10 Knoten Windgeschwindigkeit, Bootsgeschwindigkeiten (SOG) sind die Mittelwerte aller Werte über 1 Knoten. Eric Pernet, 2024: Polardiagramm international class Moth (Bieker), Mittelwerte. Unveröffentlicht.

Polardiagramm international class Moth (Bieker), nur Höchstwerte

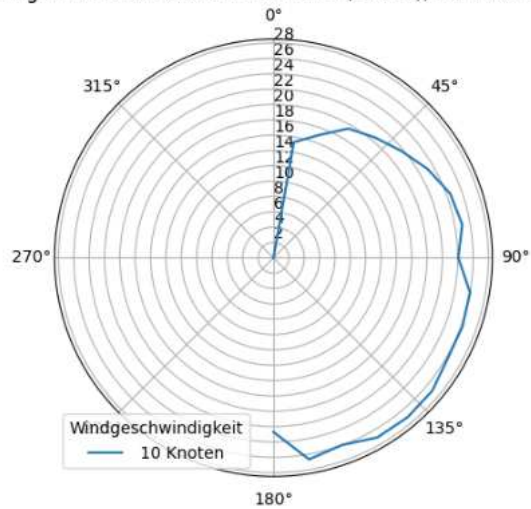


Abbildung 40: Polardiagramm einer international class Moth (Bieker V2), gemessen bei 10 Knoten Windgeschwindigkeit, Bootsgeschwindigkeiten (SOG) sind die Höchstwerte aller Werte. Eric Pernet, 2024: Polardiagramm international class Moth (Bieker), Höchstwerte. Unveröffentlicht.

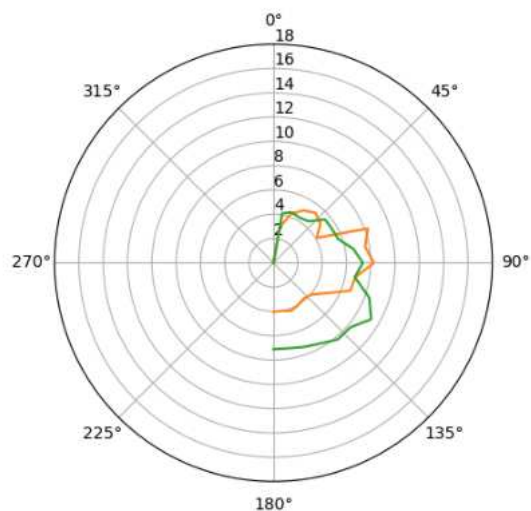


Abbildung 41: Vergleich der Geschwindigkeiten eines 29er Skiffs (grüner Graph) und einer Bladerider X8 International class Moth (oranger Graph), gemessen bei 10 Knoten Windgeschwindigkeit. Bootsgeschwindigkeiten (SOG) sind die Mittelwerte aller Werte über 1 Knoten. Eric Pernet, 2024: Vergleich 29er Skiff und Bladerider Moth, Mittelwerte. Unveröffentlicht.

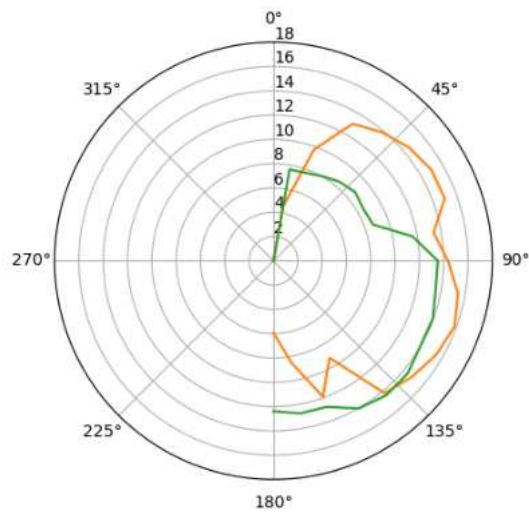


Abbildung 42: Vergleich der Geschwindigkeiten eines 29er Skiffs (grüner Graph) und einer Bladerider X8 International class Moth (oranger Graph), gemessen bei 10 Knoten Windgeschwindigkeit. Bootsgeschwindigkeiten (SOG) sind die Mittelwerte aller Werte über 1 Knoten. Eric Pernet, 2024: Vergleich 29er Skiff und Bladerider Moth, Höchstwerte. Unveröffentlicht.

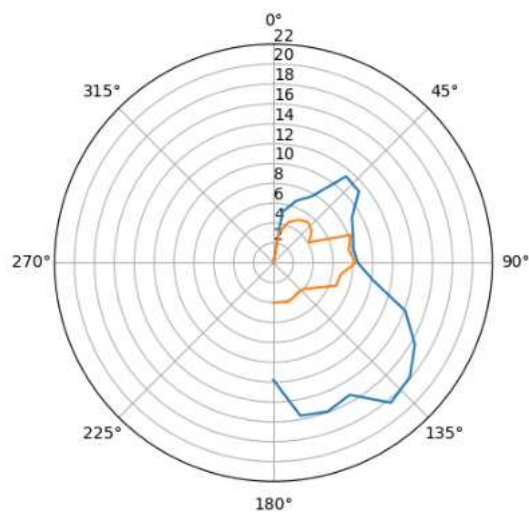


Abbildung 43: Vergleich der Geschwindigkeiten zweier international class Moth, Bladerider X8 (oranger Graph) und Bieker V2 (blauer Graph), gemessen bei 10 Knoten Windgeschwindigkeit. Bootsgeschwindigkeiten (SOG) sind die Mittelwerte aller Werte über 1 Knoten. Eric Pernet, 2024: Vergleich Bieker Moth und Bladerider Moth, Mittelwerte. Unveröffentlicht.

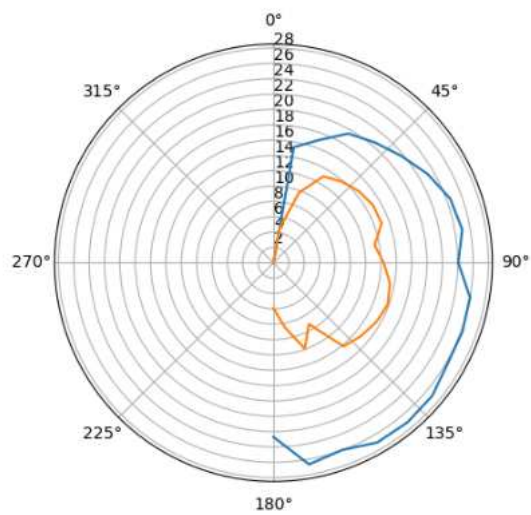


Abbildung 44: Vergleich der Höchstgeschwindigkeiten zweier international class Moth, Bladerider X8 (oranger Graph) und Bieker V2 (blauer Graph), gemessen bei 10 Knoten Windgeschwindigkeit. Bootsgeschwindigkeiten (SOG) sind die Höchstwerte aller Werte. Eric Pernet, 2024: Vergleich Bieker Moth und Bladerider Moth, Höchstwerte. Unveröffentlicht.

7 Diskussion

In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, ob mit Hydrofoils ausgestattete Boote herkömmlichen Segelbooten in allen Bereichen überlegen sind, oder ob es gewisse Punkte gibt, an denen eher ein herkömmliches Segelboot mit höheren Geschwindigkeiten punkten kann. Ausserdem sollte anhand von Geschwindigkeitsmessungen erforscht werden, wie sich Neuerungen in der sogenannten Konstruktionsklasse International class Moth auf die Geschwindigkeit und die Effizienz der Boote auswirken kann.

Die Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen sind im Kapitel 6 in Form von Polardiagrammen aufgeführt. Unter den Polardiagrammen sind einerseits die Diagramme der Boote 29er und Bladerider Moth einzeln dargestellt, zuerst die Mittelwerte der Geschwindigkeiten (Abbildung 35 und Abbildung 37), anschliessend die Höchstgeschwindigkeiten (Abbildung 36 und 38). Ausserdem sind die beiden Polardiagramme der Bieker Moth, also der modernen Moth, zuunterst aufgeführt (Abbildung 39 und 40). Neben den einzelnen Polardiagrammen finden sich noch Vergleiche einzelner Graphen zwischen Bladerider und 29er und zwischen Bladerider und Bieker Moth (Abbildung 43, 44, 41 und 42). Diese Graphen wurden aus Gründen der Lesbarkeit und um die Grössenverhältnisse mit der gleichen Skalierung darzustellen erstellt.

Beim Vergleich von Abbildung 35 und Abbildung 37 fällt vor allem auf, dass die Höhepunkte bei 135 Grad bei der Bladerider Moth um einiges kleiner sind, als beim 29er. Ausserdem ist der Abstand zwischen dem blauen Graphen und dem orangen Graphen in Abbildung 35, als auch in Abbildung 36 sehr gross, während der Abstand der gleichen Graphen in Abbildung 37 als auch in Abbildung 38 viel kleiner ist. Beim Vergleichen der Abbildungen 36 und 38 kann ebenfalls erkannt werden, dass die Werte in Abbildung 36 um einiges höher sind als in der Abbildung 38, obwohl die Graphen bei gleicher Windgeschwindigkeit erstellt wurden.

Aus den Ergebnissen des Versuches können die Eigenschaften des jeweiligen Bootes wiedererkannt werden. Jede Bootsklasse hat bestimmte Vor- und Nachteile und die Geschwindigkeiten können bei verschiedenen Kursen stark voneinander abweichen. Daher sind die Graphen meist nicht kreisrund, sondern sie besitzen verschiedene Höhe- und Tiefpunkte. Ein Höhepunkt, welcher oft wiederkehrt, ist vor allem in den Bereichen zwischen 130 und 140 Grad TWA zu erkennen. Bei diesem Kurs weht der Wind eher vom Heck des Bootes auf das Segel, was bedeutet, dass das Boot vom Wind nach vorne gedrückt wird. Ein weiterer Höhepunkt befindet sich meist ungefähr bei 45 bis 60 Grad TWA. Die Tiefpunkte des Graphen sind grösstenteils bei 90 Grad TWA zu finden. Ebenfalls flachen die Geschwindigkeiten beim Annähern an die 180-Grad Marke ab. Den Erwartungen entsprechend sind die Graphen in Abbildung 37 und Abbildung 38 ungefähr zwischen 120 Grad und 140 Grad TWA, also im Raumwindkurs, am ausgeprägtesten. Der 29er Skiff besitzt einen asymmetrischen Segel, den sogenannten Gennaker (*29er Jolle (2023)*), welcher normalerweise zwischen 120 Grad und 160 Grad TWA eingesetzt wird. Dieser Gennaker sorgt dafür, dass sich die Segelfläche im Raumwindkurs sehr stark vergrössert. Ausserdem wird das Boot dadurch

stabiler. Diese Faktoren tragen dazu bei, dass der 29er Skiff im Raumwindkurs höhere Geschwindigkeiten erreichen kann als im Amwindkurs. Dies lässt sich ebenfalls dadurch belegen, dass in Abbildung 38 bis 90 Grad TWA keine Höchstwerte erreicht wurden, welche höher als die restlichen Geschwindigkeiten sind. Das bedeutet, dass die Durchschnittsgeschwindigkeiten als auch die Höchstgeschwindigkeiten im Raumwindkurs, bei hoher als auch tiefer Windgeschwindigkeit, beim 29er höher sind als im Amwindkurs. In Abbildung 41 ist zu erkennen, dass die Graphen stark dem Charakter der 29er-Diagramme abweichen: Die Geschwindigkeiten sind im Verhältnis zu anderen TWA's sehr klein. Dieses Ergebnis widerlegt die Hypothese, dass die Geschwindigkeiten im Raumwindkurs ebenfalls bei der Moth höher sein müssten als die Geschwindigkeiten im Amwindkurs. Betrachtet man jedoch die Abbildung 36, dann ist zu erkennen, dass die Höchstgeschwindigkeiten im Raumwindkurs proportional zu den restlichen Geschwindigkeiten stark gestiegen sind. Das bedeutet, dass zwar im Raumwindkurs auch mit der Bladerider Moth sehr hohe Geschwindigkeiten erreicht werden können, der Durchschnitt jedoch sehr tief liegt. Es wurde also bei den Aufzeichnungen gefoilt, jedoch nicht durchgehend und sehr inkonstant. Diese Anomalie kann vor allem einem fehlenden Element der Bladerider Moth zugeschrieben werden: Dem Bugsprit. Dieser sorgt dafür, dass modernere Moth-Klassen im Raumwindkurs stabiler segeln, höhere und konstantere Geschwindigkeiten erreichen können und somit länger auf den Foils bleiben. Der Bugsprit ist ein Rohr, welches an der Spitze des Bootes befestigt ist und an dessen Ende sich der Wand (Zauberstab, bereits in Kapitel 4.4.1 besprochen) befindet. Dadurch kann der Wand frühzeitig Wellen erkennen und das Mainfoil kann früher auf diese reagieren, als wenn der Wand unmittelbar auf der Spitze befestigt ist. Diese Vermutung kann erneut mithilfe der Abbildung 39 bekräftigt werden, da in diesem Graphen die höchsten Durchschnittsgeschwindigkeiten im Raumwindkurs erreicht wurden und die Bieker Moth über einen solchen Bugsprit verfügt. In der Abbildung 43 ist ohne Zweifel zu erkennen, dass die Bieker Moth bei gleichen Windverhältnissen um einiges höhere Geschwindigkeiten erzielt als die Bladerider Moth. Dies ist vor allem den vielen aerodynamischen- und materiellen Verbesserungen zu verdanken, welche dazu beitragen, aktiv die Geschwindigkeit der Bieker V2 im Gegensatz zur etwa 15 Jahre älteren Bladerider X8 zu erhöhen. Dies beweist ebenfalls, dass durch die vielen technischen Verbesserungen der letzten Jahre die Konstruktionsklasse um ein vielfaches weiterentwickelt werden konnte.

Ein weiterer, grosser Unterschied zwischen 29er und International class Moth kann beim Vergleich von Abbildung 37 und Abbildung 35 erkannt werden. Der Abstand zwischen dem blauen Graphen (5 Knoten Windgeschwindigkeit) und dem orangen Graphen (10 Knoten Windgeschwindigkeit) ist in beiden Diagrammen sehr verschieden. In Abbildung 35 ist der Abstand zwischen dem blauen und dem orangen Graph viel Grösser als der zwischen dem orangen Graph und dem grünen Graph. Dies liegt daran, dass die Bladerider Moth sich bei den 5 Knoten Messungen im Gegensatz zu den 10 Knoten Messungen nicht auf den Foils befand, dadurch also keine Verringerung des Wasserwiderstandes erfuhr und somit mit dem kompletten Rumpf im Wasser um einiges langsamer segelte als im gefoilteten Zustand. Dies zeigt die Effektivität von

Hydrofoils, da diese bei einer gewissen Windgeschwindigkeit (hier liegt die Windgeschwindigkeit zwischen 5 und 10 Knoten) das Boot unproportional hoch beschleunigen. Im Gegensatz dazu ist in Abbildung 37 zu sehen, dass der Abstand aller drei Graphen ziemlich ähnlich und Proportional ist. Im Endeffekt beweist dies, dass Hydrofoils die Geschwindigkeit eines Bootes (hier International class Moth) drastisch erhöhen kann, während sich bei herkömmlichen Booten die Geschwindigkeiten stetig vergrößern.

Zusammenfassend können die Hypothesen und Erwartungen des ersten Experiments grösstenteils durch die Experimente bestätigt werden. Boote, welche über Hydrofoils verfügen (in diesem Fall die Bladerider Moth), sind in der Durchschnittsgeschwindigkeiten als auch in den Höchstgeschwindigkeiten in allen Windverhältnissen gefoilt schneller als herkömmliche Segelboote (in diesem Fall der 29er Skiff). Jedoch nur, wenn das gefoilt Boot sich auch wirklich auf den Foils befindet, das bedeutet dass bei sehr langsamen Windverhältnissen (fünf Knoten oder tiefer) herkömmliche Boote meist schneller sind, da Gefoilt Boote nicht dafür konstruiert sind, ohne Foils hohe Geschwindigkeiten erreichen zu können. Auch haben Segelboote, welche über ein asymmetrisches Segel verfügen in den Raumwindkursen oft durch mehr Segelfläche einen Vorteil und können dadurch in diesen bestimmten Kursen höhere Geschwindigkeiten erreichen als gewisse gefoilt Boote (wie die Bladerider Moth).

Die Hypothesen und Erwartungen des zweiten Experiments können ohne Zweifel bestätigt werden. Eine fortgeschrittene und sehr moderne International class Moth, welche über die neuesten Verbesserungen und Techniken verfügt, ist definitiv in allen Segelkursen, bis auf den Halbwindkurs, um ein vielfaches Schneller als ein ältere Moth Klasse. Dies zeigt, dass die Entwicklungsklasse im letzten Jahrzehnt stark fortgeschritten ist. Beim Halbwindkurs (TWA bei 90 Grad) konnten bei beiden Booten ähnliche Geschwindigkeiten erreicht werden, da dieser Kurs eher selten gesegelt wird und daher bei den Messungen vergleichsweise selten vorkam.

Mithilfe der praktischen Arbeit konnten viele der Hypothesen und Vermutungen als auch die Forschungsfragen beantwortet werden, jedoch konnten während der Durchführung aufgrund der verfügbaren Mittel und Umstände nicht alle Aspekte betrachtet werden, welche sich eventuell auf die Ergebnisse ausgewirkt hätten. Mithilfe des Sailmon MAX mini (Abbildung 31) konnten zwar per GPS die Geschwindigkeiten und auch die Positionen des Bootes auf einige Zentimeter genau bestimmt werden, jedoch musste die Windrichtung mithilfe der Positionierung des Bootes in den Wind und dem dadurch gemessenen Kompasskurs bestimmt werden. Die Windrichtung als auch die Windgeschwindigkeit hätte jedoch mithilfe eines kompakten Ultraschall-anemometers um einiges präziser gemessen werden können. Dies könnte einen Einfluss auf die Polardiagramme haben, bei denen anschliessend die Geschwindigkeitsmessungen präziser dem zutreffenden TWA hätten zugeordnet werden können. Diese Einschränkung musste jedoch aus finanziellen Gründen eingegangen werden, da ein kompaktes Ultraschall-anemometer sehr kostspielig ist.

Die Geschwindigkeitsmessungen, welche mit der Bladerider Moth aufgestellt wurden, sind zwar befrie-

digend und erfüllen ihren Zweck, jedoch sind diese Messungen längst nicht repräsentativ für heutige International class Moth Versionen, da die Bladerider Moth über 15 Jahre alt ist. Modernere Moth Versionen könnten um einiges höhere Geschwindigkeiten erzielen, wie mit der Bieker V2 Moth bewiesen wurde (Abbildung 43). Auch diese Einschränkung musste aus finanziellen Gründen eingegangen werden, als auch aufgrund der aktuell zur Verfügung stehenden Mittel der noch jungen und verhältnismässig unerfahrenen Testperson (Eric Pernet). Ausserdem ist das Ziel der Arbeit vor allem Boote mit Hydrofoils im generellen Sinne zu messen, daher dient die Bladerider Moth lediglich als Repräsentation eines gefoilten Bootes, nicht als Repräsentation einer International class Moth.

Wie bereits erwähnt ist die Erfahrung der Testperson (Eric Pernet) in Segeln mit Hydrofoils auf ungefähr eineinhalb Segel-Saisons limitiert. Dadurch konnte wahrscheinlich nicht das volle Potential, bzw. die besten Höchstgeschwindigkeiten erreicht werden, welche theoretisch mit einer Bladerider Moth möglich sind. Das bedeutet, dass eine Testperson mit mehr Erfahrung wahrscheinlich bessere Resultate erzielen könnte. Jedoch sind die Ergebnisse ausreichend, um einige Hypothesen zu bestätigen und die Erwartungen zu erfüllen, ausserdem ist die Testperson des 29er Skiffs bei allen Messungen dieselbe, wodurch die beiden Boote ein Wenig ausgeglichener und mit ähnlich viel Erfahrung gesegelt wurden. Lediglich die Messungen mit der Bieker Moth wurden von einer weitaus mehr erfahrenen Person (Roman Berti) gesegelt, was sich wahrscheinlich auch auf das ausgezeichnete Resultat der Bieker Messungen in Abbildung 39 auswirkt. Es sei jedoch hier angemerkt, dass die Leistungsunterschiede der beiden Moth Klassen nichts desto trotz sehr gross sind und auch die Testperson der Bladerider Moth (Eric Pernet) viel höhere Resultate auf der Bieker Moth erzielt hätte. Die beiden Graphen in Abbildung 43 würden wahrscheinlich etwas näher aneinanderrücken, wenn bei der Messung der beiden Boote dieselbe Testperson, unabhängig von der Erfahrung, darauf gesegelt wäre.

Um den Zusammenhang zwischen den Erfahrungen der Testperson und den resultierenden Geschwindigkeiten der Moth wäre weitere Arbeit nötig, um den Aspekt weiter zu erforschen. Zukünftige Forschungen könnten sich auch darauf konzentrieren, den TWA beispielsweise mithilfe eines Ultraschall-Anemometers, welches sich unmittelbar auf dem Boot befindet, genauer zu ermitteln, um somit genauere Ergebnisse für die einzelnen Segelkurse zu erhalten. Ausserdem könnten weitere herkömmliche Segelboote mit der International Class Moth verglichen werden, beispielsweise eine grössere Segelyacht mit mehr Segelfläche oder ein anderes Gefoiltes Boot wie die 69F-Klasse. Um zu überprüfen, ob ein konstanterer Wind mit wenigen Schwankungen und flacherem Wasser einen Einfluss auf die Moth hat, könnten auch Messungen auf anderen Gewässern wie beispielsweise dem Gardasee in Italien gemacht werden, da dieser für seine konstanten Windverhältnisse im Segelsport sehr bekannt ist.

8 Schlusswort

Nach etwa einem halben Jahr der Vorbereitung, Datenerfassung und des Schreibens kann ich nun mit Zuversicht und ein wenig Stolz auf meine Resultate der vielen verbrachten Stunden auf dem Wasser und am Schreibtisch zurückblicken. Meine Maturaarbeit war für mich eine Zeit voller neuer Entdeckungen und Erfahrungen. Aufgrund meines grossen Interesse im Segelsport, vor allem mit dem Fokus auf Hydrofoiling, fiel es mir meistens nicht schwer, die Motivation zu finden, Zeit in das Schreiben und Forschen zu investieren. Durch das Schreiben des Theorieteils konnte ich viel neues Wissen über mein eigenes Segelboot erlangen, als auch neues über faszinierende Technologien und andere Segelboote erfahren. Auch den praktischen Teil habe ich keineswegs als mühsam oder langweilig empfunden. Das Segeln auf dem See mit Wind (und vorzugsweise Sonne) durfte ich meine Arbeitsumgebung nennen, in der ich während dem Sommer viel Zeit verbringen konnte. Das viele Segeln, mit der Maturaarbeit im Hinterkopf, brachte mir Einiges an wertvoller Erfahrung bei und durch Fehler und Erfolge konnte ich meine Lernkurve stetig aufrechterhalten. Die vorliegende Arbeit ist schlussendlich das Produkt von viel Probieren und Versuchen, aber auch das von Misserfolgen und das anschliessende Optimieren. Dadurch, dass ich weder von einer Maturaarbeit in diesem Gebiet gelesen habe, noch von Lehrern über vergleichbare Arbeiten auf meinem Niveau gehört habe, kann ich mit (etwas Stolz) behaupten, vielleicht sogar etwas Einzigartiges geschaffen zu haben.

Diese positiven Gefühle und das allgemeine Gelingen meines Vorhabens habe ich jedoch nicht nur mir selbst zu verdanken. Es gehören auch viele Personen erwähnt, welche aktiv, aber auch passiv dazu beigetragen haben, mich zu unterstützen und mir die Durchführung dieser Arbeit zu ermöglichen. Vorerst möchte ich mich bei meiner Schwerpunktsfach- als auch Betreuungslehrperson Bernhard Brunner bedanken. Er stand mir bei jeglichen Fragen mit viel Interesse und manchmal auch Nerven stets zur Seite. Bei jedem Problem und jedem Hindernis konnte ich mich beruhigt an Herrn Brunner wenden und wusste immer, dass mir geholfen wird. Neben Herr Brunner hat mich Lukas Meier, ein Freund und ebenfalls Mitglied des Jugendsegeln Steckborn, ebenfalls sehr oft mit viel Hilfe und Wissen unterstützt. Er ist zusammen mit mir Besitzer der Bladerider X8 Moth, welche in der vorliegenden Arbeit im praktischen Teil genutzt wurde. Da Lukas um einiges mehr an Erfahrung besitzt als ich, hat er viele Stunden verbracht, mir mit Geduld das Aufbauen und sichere Segeln der Moth beizubringen. Ohne ihn hätte ich weder die Möglichkeit gehabt, diese Arbeit zu beginnen noch um eine International Class Moth zu segeln.

Wie bereits erwähnt ist der 29er Skiff ein Boot, welches zum Segeln zwei Personen erfordert. Bei meinen Geschwindigkeitsmessungen stand mir daher immer Quentin Lagrange, einer meiner besten Freunde und Mitschüler zur Seite. Bei viel als auch bei wenig Wind segelten wir unermüdlich mit dem 29er, um genug Daten für meine Arbeit zu sammeln, weshalb mein Dank auch an ihn gerichtet ist. Mein Dank richtet sich ebenfalls an Roman Berti und Marvin Vignola, ebenfalls zwei Mitglieder des Jugendsegeln

Steckborn und zwei junge Segler mit viel Erfahrung und Wissen, welches sie gerne mit mir teilten. Sie stellten die Geschwindigkeitsmessungen mit der Bieker V2 Moth auf, ein Boot zu welchem ich, als noch verhältnismässig unerfahrener Moth Segler, sehr hinaufschauete. Nicht zuletzt möchte ich meinen Dank auch an meine Eltern aussprechen, welche mir die Freiheit und finanzielle Unterstützung gaben, die vorliegende Arbeit durchführen zu können.

9 Verzeichnisse

Literatur

- 29er Jolle. (2023, März). Zugriff am 2024-08-22 auf https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=29er_Jolle&oldid=231793950 (Page Version ID: 231793950)
- 69F Academy - Foiling Basics. (o. J.). 2024. Zugriff auf https://69fsailing.com/wp-content/uploads/69F_Academy_-_Foiling_Basics.pdf
- Beaver, B. (2009, März). *Full scale measurement on a hydrofoil International Moth*. Zugriff am 2024-06-13 auf file:///C:/Users/eric/OneDrive/Dokumente/SLA's/Maturaarbeit%202023_2024/Literatur/CSYSPaperFeb09%20Beaver%20paper%20on%20Moth.pdf
- Bladerider.com. (2010). *Bladerider International - X8 Hydrofoiled Moth*. Zugriff am 2024-07-01 auf <https://mail.bladerider.com.au/xseries/x8.html>
- THE BOATS: AC75, AC40 & LEQ12 - 37th America's Cup. (o. J.). Zugriff am 2024-03-21 auf <https://www.americascup.com/the-boats>
- Bolle, L., Kiessler, F., Rieker, J. & Good, M. (2018, September). *Foilen: Foil-Spezial: Was Sie zum Segeln auf Flügeln wissen müssen*. Zugriff am 2024-08-23 auf <https://www.yacht.de/segelwissen/manoeuver/foilen-foil-spezial-was-sie-zum-segeln-auf-fluegeln-wissen-muessen/>
- Charlie Barr. (2023, November). Zugriff am 2024-02-12 auf https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Charlie_Barr&oldid=1187318907 (Page Version ID: 1187318907)
- Dixon, M. (2024, Februar). *Early Hydrofoils - THE INTERNATIONAL HYDROFOIL SOCIETY - ESTABLISHED 1970*. Zugriff am 2024-02-12 auf <https://foils.org/library/bibliography/early-hydrofoils/>
- Faire, J. (2021, September). *The Bieker Moth – Choice of the top six sailors at 2021 Moth Worlds*. Zugriff am 2024-06-01 auf <https://www.sail-world.com/news/241446/The-Bieker-Moth--Top-6-at-2021-Moth-Worlds>
- Flurl, B. (2024). *BERNOULLI-Gleichung | LEIFiPhysik*. Zugriff am 2024-08-19 auf <https://www.leifiphysik.de/mechanik/stroemungslehre/grundwissen/bernoulli-gleichung>
- Fritsch, A. & Rieker, J. (2023, November). *Open 60: Was die Klasse der Imocas so besonders macht*. Zugriff am 2024-08-16 auf <https://www.yacht.de/regatta/the-ocean-race/open-60-was-die-klasse-der-imocas-so-besonders-macht/>
- Gölnitz, S. (2024). *Windsurfer, Motte, Imoca: So funktionieren verschiedene Foil-Typen | SURF*. Zugriff am 2024-07-05 auf <https://www.surf-magazin.de/windsurfen/zubehoer/foils/windsurfer-motte-imoca-so-funktionieren-verschiedene-foil-typen/>
- Hillman, A. (2018). *'The Foiling Dinghy Book' von 'Alan Hillman' - eBook*. Zugriff am 2024-02-05 auf <https://www.orellfuessli.ch/shop/home/artikeldetails/A1049954033>

- IMCA. (2024). *Rules and Documents – International Moth Class Association*. Zugriff am 2024-07-05 auf <http://www.moth-sailing.org/history/rules-and-documents/>
- Leifiphysik. (2024a). *Strömungswiderstand und (c_{w}) -Wert* | LEIFiphysik. Zugriff am 2024-07-05 auf <https://www.leifiphysik.de/mechanik/stroemungslehre/grundwissen/stroemungswiderstand-und-crmw-wert>
- Leifiphysik. (2024b). *Viskose Reibung* | LEIFiphysik. Zugriff am 2024-07-05 auf <https://www.leifiphysik.de/mechanik/reibung-und-fortbewegung/grundwissen/viskose-reibung>
- MackayBoats. (2024, Juni). *The Mackay Bieker BM-V3 Revealed*. Zugriff am 2024-06-01 auf <https://mackayboats.com/index.cfm/news/the-mackay-bieker-bm-v3-revealed/mackayboats.com/index.cfm/news/the-mackay-bieker-bm-v3-revealed/>
- Northsails. (2024). *3Di Technology | Longest-Lasting, Highest-Performance Sails*. Zugriff am 2024-07-05 auf <https://www.northsails.com/de-dach/pages/3di>
- Rosado, T. (1999). *2.972 How a Hydrofoil Works*. Zugriff am 2024-07-01 auf <https://web.mit.edu/2.972/www/reports/hydrofoil/hydrofoil.html>
- Sailing, J. P. (2024, April). *The difference between true and apparent wind speed*. Zugriff am 2024-04-15 auf <https://jollyparrot.co.uk/blog/the-difference-between-true-and-apparent-wind-speed-480>
- Skiff (Segeln). (2024, Mai). Zugriff am 2024-08-22 auf [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Skiff_\(Segeln\)&oldid=244869815](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Skiff_(Segeln)&oldid=244869815) (Page Version ID: 244869815)
- Studysmarter. (2024). *Reynoldszahl: Definition & Berechnung*. Zugriff am 2024-07-05 auf <https://www.studysmarter.de/schule/physik/mechanik/reynoldszahl/>
- Translate, A. (2024, März). *America's Cup Geschichte: Alle Highlights seit 1851*. Zugriff am 2024-03-21 auf <https://www.redbull.com/ch-de/geschichte-americas-cup>
- Wikipedia. (2023, Juni). *Moth (dinghy)*. Zugriff am 2024-06-01 auf [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Moth_\(dinghy\)&oldid=1161483720](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Moth_(dinghy)&oldid=1161483720) (Page Version ID: 1161483720)
- Wikipedia. (2024a, Juni). *Kohlenstofffaser*. Zugriff am 2024-07-05 auf <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Kohlenstofffaser&oldid=246234910> (Page Version ID: 246234910)
- Wikipedia. (2024b, April). *Metacentric height*. Zugriff am 2024-07-05 auf https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Metacentric_height&oldid=1219376348#Righting_arm (Page Version ID: 1219376348)
- World, Y. (2021, September). *World's coolest yachts: Vestas Sailrocket 2 - Yachting World*. Zugriff am 2024-02-12 auf <https://www.yachtingworld.com/yachts-and-gear/worlds-coolest-yachts-vestas-sailrocket-2-133560>

Abbildungsverzeichnis

Hydroplano 1 von Enrico Forlini. Lars Bolle et al. (2018). Aufgerufen am 05.07.2024 von https://www.yacht.de/segelwissen/manoeuver/foilen-foil-spezial-was-sie-zum-segeln-auf-fluegeln-wissen-muessen/	6
HD-4 von Alexander Graham Bell. Wikipedia. (2024). Aufgerufen am 05.07.2024 von https://de.wikipedia.org/wiki/Hydrodrome_IV	7
Vestas Sailrocket 2. Yachting World. (2021). Aufgerufen am 05.07.2024 von https://www.yachtingworld.com/ and-gear/worlds-coolest-yachts-vestas-sailrocket-2-133560	8
Unterschied des Widerstandes bei grösser werdender Geschwindigkeit zwischen nicht foi- lendem Segelboot und Segelboot mit Hydrofoils (lifting foils). Matthew Sheahan. (2015). Aufgerufen am 26.06.2024 von https://www.yachtingworld.com/special-reports/the-foiling-phenomenon-66269	10
a) Druckprofil b) Impulsübertragung c) Zirkulation d) Stromlinien. Tina Rosado. (1999). Aufgerufen am 19.08.2024 von https://web.mit.edu/2.972/www/reports/hydrofoil/hydrofoil.html	11
Der Druck auf der Oberseite des Hydrofoils nimmt bei grösser werdenden Entfernung (R) ab. Tina Rosado. (1999). Aufgerufen am 19.08.2024 von https://web.mit.edu/2.972/www/reports/hydrofo	
Oracle Team USA in San Francisco. John Navas. (2013). Aufgerufen am 05.07.2024 von https://www.sail-world.com/USA/Americas-Cup-AC72-sailing-explained-all-you-ever-need-to-know/-111961?source=google	13
Der AC75 des Challenger Alinghi Redbull racing für den Americas Cup 2024. Alinghi Red- bull racing. (2024). Aufgerufen am 05.07.2024 von https://alinghiredbullracing.americascup.com/photos/27 ONE-Sailing	14
Die Imoca class von Team Malizia. Hélène Katz. (2023). Aufgerufen am 05.07.2024 von https://www.team-malizia.com/news/intense-racing-until-the-finish-line-boris-herrmann-and-will-harris-seventh-in-the-transat-jacques-vabre-2023	15
Wirkende Kräfte auf Open-60 Boot. Stephan Gölnitz. (2024). Aufgerufen am 05.07.2024 von https://www.surf-magazin.de/windsurfen/zubehoer/foils/windsurfer-motte-imoca-so-funktionieren-verschiedene-foil-typen/	16
Ein 69F Boot. Persico 69F. (2020). Aufgerufen am 08.05.2024 von https://www.yachtsandyachting.com/ne 69F-Grand-Prix-21-in-Malcesine-overall	16
Die verschiedenen Kräfte die auf das 69F class Boot wirken bei null und zehn Grad Neigung (Heel). 69F Sailing. (2024). Aufgerufen am 09.06.2024 von https://69fsailing.com/wp-content/uploads/69F_Academy_-_Foiling_Basics.pdf	17
Das Mainfoil generiert weder Ab- noch Auftrieb. Alan Hillman. (2018). The Foiling Dinghy Book - Dinghy Foiling from Start to finish. S. 23	19

14	Das Mainfoil generiert aufgrund des Grossen Winkels zwischen Wand und Boot Abtrieb. Alan Hillman. (2018). The Foiling Dinghy Book - Dinghy Foiling from Start to finish. S. 23	20
15	Durch den Winkel des Wand generiert die Klappe des Mainfoil Auftrieb. Alan Hillman. (2018). The Foiling Dinghy Book - Dinghy Foiling from Start to finish. S. 23	20
16	Das Rudderfoil generiert Abtrieb, wodurch sich der Bug des Bootes hebt. Alan Hillman. (2018). The Foiling Dinghy Book - Dinghy Foiling from Start to finish. S. 24	21
17	Das Mainfoil generiert weder Ab- noch Auftrieb. Alan Hillman. (2018). The Foiling Dinghy Book - Dinghy Foiling from Start to finish. S. 24	21
18	Das Mainfoil generiert weder Ab- noch Auftrieb. Alan Hillman. (2018). The Foiling Dinghy Book - Dinghy Foiling from Start to finish. S. 24	22
19	Verschiedene Kräfte, die auf die Moth wirken. Bill Beaver. (2009). Full scale measurements on a hydrofoil international Moth. S. 11	22
20	Die Moth mit Luvkrängung, also zur Windrichtung geneigt. Alan Hillman. (2018). The Foiling Dinghy Book - Dinghy Foiling from Start to finish. S. 25	23
21	Die Moth mit Leekrängung, also vom Wind weg geneigt. Alan Hillman. (2018). The Foiling Dinghy Book - Dinghy Foiling from Start to finish. S. 25	24
22	Eine Bladerider Moth mit charakteristischem roten Rumpf. Virginia Veal. (2008). Aufgerufen am 08.06.2024 von https://www.bladerider.com.au	25
23	Eine Bieker Moth von Mackayboats in Aktion. Eric Pernet, 2024: Bieker Moth in action. Unveröffentlicht.	26
24	Die Ruderanlage der Bieker Moth ist ein geschlossener, aerodynamischer Körper. Eric Pernet, 2024: Ruderanlage Bieker V2. Unveröffentlicht	27
25	Eine Computergrafik zeigt die grössten Angriffsflächen der Bieker V3 auf. MackayBoats. (2023). Aufgerufen am 01.06.2024 von https://mackayboats.com/index.cfm/news/introducing-the-bm-v3/	27
26	Die Seile der Bieker Moth führen grösstenteils unter dem Deck durch. Die zusammenführenden Seile in der Mitte können mithilfe einer Platte abgedeckt werden, um den Luftwiderstand zu verringern. Eric Pernet, 2024: Bieker Moth Seitenansicht. Unveröffentlicht	28
27	Ein 3Di-Segel einer International class Moth, erkennbar an der schwarzen Farbe und den Fasern. North sails. (2024). Aufgerufen am 05.07.2024 von https://www.northsails.com/fr/pages/international-moth-class	29
28	Der Decksweeper verlängert das Segel am vorderen Teil und zieht sich bis auf das Boot hinunter. Quantumsails. (2024). Aufgerufen am 05.07.2024 von https://www.quantumsails.com/en/sails/ondesign/inshore/moth	30
29	Der Apparent Wind verschiebt die Richtung des spürbaren Windes in richtung Bug. Alan Hillman. (2018). The Foiling Dinghy Book - Dinghy Foiling from Start to finish. S. 26	32

30	Die Bladerider X8 International class Moth, welche zur Durchführung des ersten Experimentes benutzt wurde. Eric Pernet, 2024: Bladerider X8 Moth. Unveröffentlicht.	35
31	Der Sailmon MAX mini wurde mithilfe eines speziellen Adapters auf den Rumpf der Bladerider X8 montiert. Eric Pernet, 2024: Sailmon montiert auf Bladerider Moth. Unveröffentlicht.	35
32	Der 29er Skiff mit hinaufgezogenem Gennaker Segel. Ovingtonboats. (2024). Aufgerufen am 22.08.2024 von https://ovingtonboats.com/29er/	36
33	Ein Beispiel für ein fertiges Polardiagramm. Wikipedia. (2022). Polar diagram (sailing). .	38
34	Ein Beispiel für ein durch Python generiertes Polardiagramm. Eric Pernet, 2024: Polardiagramm Python Beispiel. Unveröffentlicht.	40
35	Polardiagramm einer international class Moth (Bladerider X8), gemessen bei Windgeschwindigkeiten von 5, 10 und 15 Knoten. Bootsgeschwindigkeiten (SOG) sind die Mittelwerte aller Werte über 1 Knoten. Eric Pernet, 2024: Polardiagramm international class Moth (Bladerider), Mittelwerte. Unveröffentlicht	42
36	Polardiagramm einer international class Moth (Bladerider X8), gemessen bei Windgeschwindigkeiten von 5, 10 und 15 Knoten, Bootsgeschwindigkeiten (SOG) sind die Höchstwerte aller Werte. Eric Pernet, 2024: Polardiagramm international class Moth (Bladerider), Höchstwerte. Unveröffentlicht.	43
37	Polardiagramm eines 29er Skiff, gemessen bei 5, 10 und 15 Knoten Windgeschwindigkeit, Bootsgeschwindigkeiten (SOG) sind die Mittelwerte aller Werte über 1 Knoten. Eric Pernet, 2024: Polardiagramm 29er Skiff, Mittelwerte. Unveröffentlicht.	43
38	Polardiagramm eines 29er Skiff, gemessen bei 5, 10 und 15 Knoten Windgeschwindigkeit, Bootsgeschwindigkeiten (SOG) sind die Höchstwerte aller Werte. Eric Pernet, 2024: Polardiagramm 29er Skiff, Höchstwerte. Unveröffentlicht.	44
39	Polardiagramm einer international class Moth (Bieker V2), gemessen bei 10 Knoten Windgeschwindigkeit, Bootsgeschwindigkeiten (SOG) sind die Mittelwerte aller Werte über 1 Knoten. Eric Pernet, 2024: Polardiagramm international class Moth (Bieker), Mittelwerte. Unveröffentlicht.	44
40	Polardiagramm einer international class Moth (Bieker V2), gemessen bei bei 10 Knoten Windgeschwindigkeit, Bootsgeschwindigkeiten (SOG) sind die Höchstwerte aller Werte. Eric Pernet, 2024: Polardiagramm international class Moth (Bieker), Höchstwerte. Unveröffentlicht.	45
41	Vergleich der Geschwindigkeiten eines 29er Skiffs (grüner Graph) und einer Bladerider X8 International class Moth (oranger Graph), gemessen bei 10 Knoten Windgeschwindigkeit. Bootsgeschwindigkeiten (SOG) sind die Mittelwerte aller Werte über 1 Knoten. Eric Pernet, 2024: Vergleich 29er Skiff und Bladerider Moth, Mittelwerte. Unveröffentlicht. .	45

- 42 Vergleich der Geschwindigkeiten eines 29er Skiffs (grüner Graph) und einer Bladerider X8 International class Moth (oranger Graph), gemessen bei 10 Knoten Windgeschwindigkeit. Bootsgeschwindigkeiten (SOG) sind die Mittelwerte aller Werte über 1 Knoten. Eric Pernet, 2024: Vergleich 29er Skiff und Bladerider Moth, Höchstwerte. Unveröffentlicht. . . . 46
- 43 Vergleich der Geschwindigkeiten zweier international class Moth, Bladerider X8 (oranger Graph) und Bieker V2 (blauer Graph), gemessen bei 10 Knoten Windgeschwindigkeit. Bootsgeschwindigkeiten (SOG) sind die Mittelwerte aller Werte über 1 Knoten. Eric Pernet, 2024: Vergleich Bieker Moth und Bladerider Moth, Mittelwerte. Unveröffentlicht. . . . 46
- 44 Vergleich der Höchstgeschwindigkeiten zweier international class Moth, Bladerider X8 (oranger Graph) und Bieker V2 (blauer Graph), gemessen bei 10 Knoten Windgeschwindigkeit. Bootsgeschwindigkeiten (SOG) sind die Höchstwerte aller Werte. Eric Pernet, 2024: Vergleich Bieker Moth und Bladerider Moth, Höchstwerte. Unveröffentlicht. . . . 47

10 Anhänge

Anhang 1

How does the hull form of the AC75 or AC40 differ to regular non-foiling boats? Why is the special hull form so important? Is the hull form built to be rather aerodynamic or hydrodynamic?

It is hard to answer the first question as there are so many non-foiling boats type around the world (from inshore sailing to offshore sailing, from cruising to racing, etc.) Moreover, AC75 hulls are designed to respect certain rules in terms of weight, CG location, etc. So, it is even hard to compare them with other foiling boats that can be designed without any rules or that has other specifications. As the hull is most of the time out of the water, for sure the aerodynamic part is quite critical, but this is also important not to neglect hydrodynamic for the transition phases (take-off, touchdowns, etc.)

Why are the sails on the AC75 as low as possible on the deck? How does this influence the efficiency?

Many racing boats (not necessarily foiling like F18 catamaran for instance) are going for deck sweeper sails that are lower, closer to the deck / trampoline. It is mainly aerodynamic, the hull working as an end plate between the rig and water surface, sealing the interface between wind and water. This reduces turbulence and minimizes drag. Having a lower centre of effort also helps for stability as it produces less moment.

Is there a sweet spot for the windspeed as well as the weather conditions for foiling? How do these conditions vary for a boat like the AC75 and smaller foiling boats like the international class moth?

Every boat is designed for certain conditions. Some boats like Ultim can handle strong winds and big waves, while others are designed more for flat water and low wind range (TF35 for instance). Depending on what you want, you will adapt your design of foils, sails, etc. But I think 15 knots – no waves may be the easiest conditions to make all type of boats fly.

Which one of the foils on the AC75 is used for regulating the lift of the boat? Is this managed similarly to the international class Moth, where the height of the boat on the water is automatically located and thus regulating the lift of the foils with adjustable flaps?

AC75 is behaving quite similarly as a Moth with a rudder on which you can change the rake for pitch control and with foils with flaps that are adjusting the lift of the boat depending on the phase of sailing (take-off, straight line, etc.). However, we can't have an autopilot-like system that directly links the height of the boat to the flap actuation. This was done on the AC40 but is not allowed on the AC75.

Why are 3Di-sails better for sailing rather than regular sails?

3Di sails are considered superior to regular sails due to their construction and materials. They are made of fiber and resin, like more traditional sails. But with 3Di, the fiber is made of spread filament tapes,

which make up about 70% of the sail's structure. The tape material can then vary depending on the boat, sailing style, and performance goals. The glue is thermoset resin, which makes up 30% of the sail's structure. This resin is a two-part adhesive that cures via a chemical reaction when heat and vacuum pressure are applied. Once cured, this resin is unaffected by heat, moisture, or UV rays also increasing durability. Also, full-size 3D molds are used to create 3Di sails, allowing a more precise and efficient sail shape. This results in sails that are both high-performance and reliable.

Are T-shaped hydrofoils the fastest kind of foils for inshore-sailing?

T-shaped hydrofoils are indeed commonly used but it is impossible to say that they are the fastest kind of foils for inshore-sailing as it depends on a lot of other factors. Again, foiling boats must be thought as a package of foils but also sails, platform, etc, depending on what you want to achieve (high speed, good upwind or downwind angles, etc.) you may go for different solutions such as L-foils. A good example would be the F50 Sail GP catamaran than can achieve same speeds than AC75 but lower angles. T-shaped hydrofoils are effective and widely used but it would be an oversimplification to say they are the fastest kind of foils for inshore sailing. The optimal foil shape depends on the specific circumstances and requirements of the sailboat and the sailing conditions.

How does the water temperature influence the efficiency and speed of hydrofoils? Are hydrofoils generally less effective in colder water? Does the efficiency also get influenced by salty or fresh water? If so, why does this occur?

The efficiency and speed of hydrofoils can indeed be influenced by water temperature and salinity, although the effects are complex and can depend on a variety of factors. However here are some trends: Water Temperature: The temperature of the water can affect the density and viscosity of the water, which in turn can influence the lift and drag experienced by a hydrofoil. As water temperature increases, its density decreases, which could potentially reduce the lift generated by the hydrofoil. However, warmer water also has lower viscosity, which could reduce the drag on the hydrofoil and potentially increase its speed. Water Salinity: The salinity of the water can also affect the performance of hydrofoils. Saltwater is denser than freshwater, which means that a hydrofoil could potentially generate more lift in saltwater than in freshwater for the same speed and angle of attack. However, the increased density could also result in increased drag, which might offset some of the benefits of the increased lift. Additionally, the corrosive effects of saltwater could potentially damage the hydrofoil over time, which could reduce its performance. In conclusion, while water temperature and salinity can influence the performance of hydrofoils, the effects are complex and most of the time minor compared to other factors.

Anhang 2

Benutzer:

Create a python program to draw a polar diagram for a sailboat given the twa and boat speed for different true wind speeds

ChatGPT:

Sure, you can use the Matplotlib library in Python to create a polar diagram for a sailboat. Here's a simple example:

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # Define your data: True Wind Angle (TWA) and Boat Speed for different True Wind
   Speeds (TWS)
5 # Example data:
6 twa = np.arange(0, 181, 10) # True Wind Angle in degrees
7 tws = np.array([5, 10, 15]) # True Wind Speeds in knots
8 boat_speeds = np.array([[3, 4, 5, 6, 7, 8, 8.5, 8.8, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9,
   9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9],
9                               [4, 5, 6, 7, 8, 9, 9.5, 9.8, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10,
10                              10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10],
11                              [5, 6, 7, 8, 9, 10, 10.5, 10.8, 11, 11, 11, 11, 11, 11, 11, 11, 11, 11,
12                               11, 11, 11, 11, 11, 11, 11, 11, 11, 11, 11, 11]])
13
14 # Create a polar plot
15 fig, ax = plt.subplots(subplot_kw={'projection': 'polar'})
16
17 for i in range(len(tws)):
18     ax.plot(np.radians(twa), boat_speeds[i], label=f"TWS: {tws[i]} knots")
19
20 ax.set_theta_zero_location('N')
21 ax.set_theta_direction(-1)
22 ax.set_rlabel_position(0)
23 ax.set_title('Polar Diagram')
24 ax.legend(loc='upper right')
25
26 plt.show()
27
28 This code will create a polar plot with boat speed curves for different true wind
   speeds. You can adjust the twa, tws, and boat_speeds arrays with your actual data
   .
29
30 Confidence level: Medium
```

Reference:

Documentation for Matplotlib: <https://matplotlib.org/stable/index.html>

Benutzer:

ValueError: x and y must have same first dimension, but have shapes (19,) and (29,)

ChatGPT:

Apologies for the oversight. It seems there's a mismatch in the dimensions of the `twa` array and the `boat_speeds` arrays. Let's correct that by ensuring that both arrays have the same length. We can do this by making sure that each `boat_speeds` array has the same length as the `twa` array. Here's the corrected code:

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # Define your data: True Wind Angle (TWA) and Boat Speed for different True Wind
   Speeds (TWS)
5 # Example data:
6 twa = np.arange(0, 181, 10) # True Wind Angle in degrees
7 tws = np.array([5, 10, 15]) # True Wind Speeds in knots
8 boat_speeds = np.array([[3, 4, 5, 6, 7, 8, 8.5, 8.8, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9,
   9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9],
9                             [4, 5, 6, 7, 8, 9, 9.5, 9.8, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10,
10                                10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10],
11                             [5, 6, 7, 8, 9, 10, 10.5, 10.8, 11, 11, 11, 11, 11, 11, 11, 11, 11, 11,
12                                11, 11, 11, 11, 11, 11, 11, 11, 11][:len(twa)]])
13
14 # Create a polar plot
15 fig, ax = plt.subplots(subplot_kw={'projection': 'polar'})
16
17 for i in range(len(tws)):
18     ax.plot(np.radians(twa), boat_speeds[i], label=f"TWS: {tws[i]} knots")
19
20 ax.set_theta_zero_location('N')
21 ax.set_theta_direction(-1)
22 ax.set_rlabel_position(0)
23 ax.set_title('Polar Diagram')
24 ax.legend(loc='upper right')
25
26 plt.show()
27
28 \textit{ChatGPT:}
29 This code ensures that each boat\_speeds array has the same length as the twa array,
   avoiding the ValueError. You can adjust the boat\_speeds array to match your
```

	actual data.
28	
29	Confidence level: High

Anhang 3

```

1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # Define your data: True Wind Angle (TWA) and Boat Speed for different True Wind
   Speeds (TWS)
5 # Example data:
6 twa = np.arange(0, 190, 10) # True Wind Angle in degrees
7 tws = np.array([5, 10, 15]) # True Wind Speeds in knots (fuer 20 Knoten Graph nach
   "15" 20 einfüegen)
8 boat_speeds = np.array([[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
   0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0], #Blauer Graph
9                        [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
   0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0], #Oranger Graph
10                       [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
   0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0], #Gruener Graph
11                      [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
   0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]]) #Roter Graph
12
13 # Polardiagramm erstellen
14 fig, ax = plt.subplots(subplot_kw={'projection': 'polar'})
15
16 for i in range(len(tws)):
17     ax.plot(np.radians(twa), boat_speeds[i], label=f"{tws[i]}Knoten")
18
19 ax.set_theta_zero_location('N')
20 ax.set_theta_direction(-1)
21 ax.set_rticks([2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18]) #Werte fuer Geschwindigkeiten im
   Diagramm
22 ax.set_rlabel_position(0)
23 ax.set_title('Polardiagramm') #Titel setzen
24 ax.legend(loc='lower_left', title = 'Windgeschwindigkeit') #Legende unten links
25
26
27 plt.show()

```

Anhang 4

Anhang 5

29er Messungen für Polardiagramm:

Mittelwerte:

Windgeschwindigkeit — Bootsgeschwindigkeit, beginnend bei 0 Grad TWA bis 180 Grad TWA

5 Knoten — 0, 3.4, 3.59, 4.41, 4.69, 4.68, 4.17, 3.1, 3.36, 3.64, 5.54, 6.05, 5.8, 5.64, 4.89, 3.65, 3.86, 4.29, 3.08

10 Knoten — 0, 4.14, 4.42, 4.29, 4.47, 5.54, 5.57, 5.68, 6.66, 7.35, 6.79, 8.38, 9.28, 8.26, 8.23, 7.67, 7.37, 7.14, 7.11

15 Knoten — 0, 5.3, 5.35, 5.41, 5.82, 6.9, 6.93, 7.21, 8.34, 8.77, 8.61, 9.79, 10.91, 10.17, 9.54, 8.69, 8.63, 8.52, 7.08

Höchstwerte:

Windgeschwindigkeit — Bootsgeschwindigkeit, beginnend bei 0 Grad TWA bis 180 Grad TWA

5 Knoten — 0, 5.88, 5.49, 6.26, 8.83, 7.23, 6.53, 10.47, 10.55, 9.33, 11.24, 11.58, 11.25, 11.04, 11.82, 10.19, 8.64, 9.18, 7.12

10 Knoten — 0, 7.64, 7.71, 8.04, 8.48, 8.78, 8.54, 8.72, 11.61, 13.52, 13.55, 13.94, 13.97, 14.41, 14.44, 14.03, 12.79, 12.76, 12.38

15 Knoten — 0, 8.23, 8.45, 9.34, 9.88, 10.24, 10.36, 9.68, 13.53, 16.7, 16.21, 16.89, 16.58, 16.89, 15.34, 15.32, 13.45, 13.23, 12.14

Bladerider X8 International class Moth Messungen für Polardiagramm:

Mittelwerte:

Windgeschwindigkeit — Bootsgeschwindigkeit, beginnend bei 0 Grad TWA bis 180 Grad TWA

5 Knoten — 0, 2.26, 2.18, 2.13, 2.25, 2.47, 2.43, 2.44, 2.1, 2.18, 1.91, 1.6, 1.78, 1.56, 1.74, 1.42, 1.26, 1.3, 1.4

10 Knoten — 0, 3, 4.33, 4.98, 5.37, 5.03, 4.11, 8.26, 7.65, 8.26, 6.84, 6.72, 4.99, 4.07, 3.85, 4.03, 4.21, 4.01, 4.04

15 Knoten — 0, 3.35, 4.32, 4.13, 4.02, 4.22, 7.12, 7.68, 6.56, 8.4, 9.35, 9.63, 6.9, 5.21, 5.63, 4.77, 1.77, 1.57, 1.2

Höchstwerte:

Windgeschwindigkeit — Bootsgeschwindigkeit, beginnend bei 0 Grad TWA bis 180 Grad TWA

5 Knoten — 0, 2.52, 3.07, 2.87, 3.35, 3.13, 3.13, 3.34, 3.95, 4.33, 4.64, 4.24, 2.67, 3.67, 3.67, 3.09, 2.91, 2.27, 2.24

10 Knoten — 0, 4.53, 9.75, 13.02, 13.83, 14.53, 14.99, 14.99, 13.37, 14.36, 15.41, 15.84, 15.45, 14.86, 14.22, 9.22, 11.91, 8.52, 5.92

15 Knoten — 0, 5.87, 6.68, 9.7, 11.38, 17.46, 21.02, 21.02, 16.5, 15.37, 16.22, 14.63, 16.27, 16.26, 13.72, 7.28, 2.38, 1.59, 1.56

Bieker V2 International class Moth Messungen für Polardiagramm:

Mittelwerte:

Windgeschwindigkeit — Bootsgeschwindigkeit, beginnend bei 0 Grad TWA bis 180 Grad TWA

10 Knoten — 0, 5.2, 6.62, 7.74, 11.35, 11.2, 9.11, 8.52, 8.16, 8.48, 10.18, 14.09, 16.42, 17.89, 18.37, 15.34, 15.92, 15.62, 11.79

Höchstwerte:

Windgeschwindigkeit — Bootsgeschwindigkeit, beginnend bei 0 Grad TWA bis 180 Grad TWA

10 Knoten — 0, 15.31, 17, 19.46, 20.5, 21.17, 23.17, 24.49, 24.97, 24.07, 26, 26.19, 26.21, 26.99, 27.15, 27.15, 27.15, 27.04, 25.98, 26.68, 22.7

Bestätigung

Ich bestätige, dass ich die Maturaarbeit vollständig selbst erstellt habe, einzige Ausnahmen sind die in den Quellenangaben aufgeführten Teile.

26. August 2024, Kreuzlingen

E. Pernet