# Bodeneffektsegeln

Die Natur als Vorbild für
Innovationen im Yachtdesign

Dipl.-Ing. Michael Dienst, Berlin.

Die letzten zweihundert Meter sind spektakulär. Über die Baumwipfel fliegen sie ein, sinken dem See entgegen. Jetzt - über dem Wasserspiegel - ändert sich der Flugstil und Körperhaltung der Gänse. Die Tragflächen wölben sich zum Wasser hin, bilden eine hufeisenförmige Figur aus. Dreißig, fünfzig, hundert Meter, die Vögel verlieren nicht mehr an Flughöhe, gleiten dicht über der Oberfläche dahin – langsam und unmerklich sinkt die Fluggeschwindigkeit. Das Wasser glättet sich sanft unter dem Tier und ein leichtes Schaukeln verrät: es geschieht von allein, ohne Manöver, ruderlos. Die elegante Landung erfolgt, so scheint es, nur notwendigerweise ... als sei der See zu kurz.

Gänse nutzen den Bodeneffekt. Das bodennahe Segeln war und ist Gegenstand der Forschung und anwendungsbezogener Untersuchungen. Perfekt vorgetragen vom biologischen Flieger sollte es möglich sein, Flugstil und konstruktives Arrangement als Vorbild für innovative Lösungsansätze im Yachtdesign zu nutzen. Schiffkörper zu optimieren gelingt, wenn die Form- und Reibungswiderstände minimiert werden. Keine Maßnahme jedoch ist so wirkungsvoll, wie die Reduzierung der benetzten Oberfläche ... und ich füge hinzu: durch Anheben des Schiffes!

Ein Beitrag hierzu könnte in der Nutzung des Bodeneffekts bestehen, wovon dieser Aufsatz handelt.

**Bionik.** Lebewesen sind in den Jahrmillionen der Evolution teilweise bis an den Rand des physikalisch Möglichen optimiert worden. Es liegt daher nahe, die Natur selbst zum Vorbild für eine innovative Technik zu nehmen mit dem Ziel, Produkte ökologisch verträglich und ergänzend zu formulieren. Einzelbeispiele zeigen, dass Produkte nach dem Vorbild der belebten Natur effizient, ressourcenschonend und leistungsfähig sein können.

Ein Blick in die Geschichte der Kulturen zeigt, dass Menschen von je her die Natur beobachteten, und sie zum Vorbild für Waffen, Werkzeuge und Kleidung, für Technik nahmen. Die moderne wissenschaftliche Bionik beschäftigt sich mit der Übertragung biologischer Problemlösungen in die technische Anwendung. Dazu bedarf es der Entschlüsselung relevanter biologischer Systeme.

**Leben ist auf unterschiedlichen Strukturebenen organisiert.** Der biologische Struktur- und Gestaltaufbau gründet auf hierarchisch angeordneten Struktur-Stufen. Auf jeder Ebene existiert ein hoher Ordnungsgrad. Die Strukturebenen bauen aufeinander auf. Atome bilden komplexe Biomoleküle, wie etwa die Proteine, die ihrerseits zu Organellen organisiert sind. Viele dieser Struktureinheiten ergeben zusammen Zellen, die für eine große Klasse von Organismen, Pflanzen, Tiere, dem Menschen in spezifische Zelltypen differenziert, Gewebe

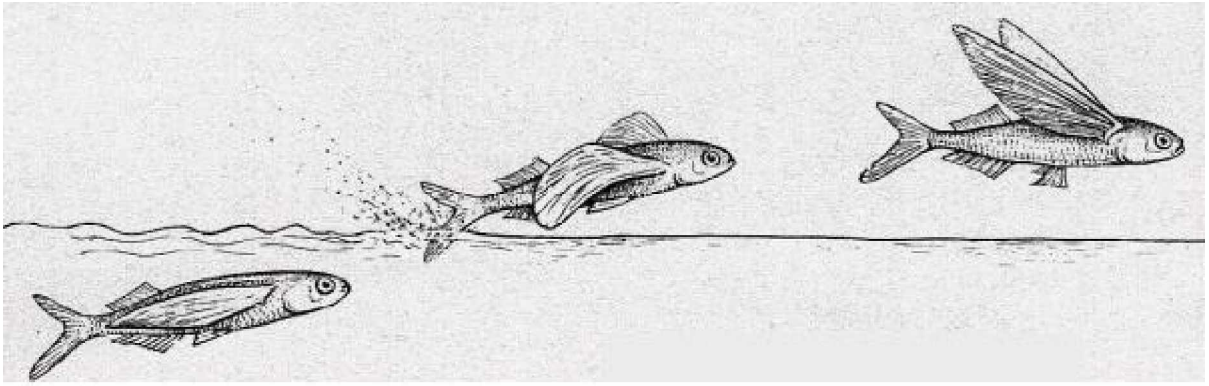
bilden. In bestimmten, wohlstrukturierten Anordnungen bilden die Gewebe Organe, die zu Körpern „organisiert“ sind. Die Stufen in der biologischen Hierarchie gehen über den einzelnen Organismus hinaus: eine Population ist eine örtlich begrenzte Gruppe von Organismen einer Art. Organismen verschiedener Arten bilden Lebensgemeinschaften in ökologischen Gefügen, den Ökosystemen. Hier treten Organismen in Wechselbeziehungen mit ihrer biologischen und abiotischen Umwelt.

Biosystemanalyse schafft den Stoff, aus dem Bionik Lösungen generiert. Die Erfahrung zeigt, dass gerade das Wechselwirken der biologischen Systeme mit ihrer Umwelt die signifikanten Effekte hervorbringt, die den Bioniker interessieren und die er zur Quelle seiner Konzepte, vielleicht seiner Visionen macht. Biologische Effekte existieren nicht losgelöst von ihren räumlich-zeitlichen Kontext, sie bilden sich aus in den Evolutions- und Adaptionsszenarien, in denen Lebewesen als „Systemgrenze zwischen einer äußeren Welt und ihrem eigenen inneren Milieu“ agieren.

Ein gutes Beispiel: Vögel und Gefieder. In Vögel hat die biologische Evolution enorm viel Entwicklungsarbeit investiert, sie sind hochoptimiert. Eine Ursache von Effizienz bei künstlichen und biologischen Systemen ist die Häufigkeit ihres Auftretens. Das gilt innerhalb einer Generation, also relativ und horizontal, es gilt aber auch absolut und vertikal über weite Optimierungszeiträume hinweg. In der Zeit, während der ein gewichtsgleiches Säugetier erwachsen wird, hat das System Vogel schon 4 oder 5 Generationenfolgen hinter sich. Rein statistisch wäre dies ein guter Grund, sich dem biologischen Hitec-Produkt Vogel besonders intensiv zu widmen. Es gibt noch ein weiteres Motiv, fliegende Biosysteme, Vögel, Säugetiere, ja nicht zuletzt auch Flugsaurier, zu untersuchen. Die energetischen Kosten für das Fliegen sind hoch. Hier in der Fluidmechanik wirken die dynamischen Kräfte. Da, wo es auf optimale Wirkungsgrade ankommt, hat die biologische Evolution tief in die Trickkiste der physikalischen Effekte und Wirkmechanismen gegriffen. Dennoch möchte ich mich hier nur am Rande mit dem Vogel als Vorbild für innovative Technik beschäftigen.

Bei der tastenden Suche der biologischen Evolution nach Möglichkeiten, den Luftraum als Territorium für Lebewesen zu erobern, stellen sich dem Beobachter zum Teil kuriose Konstruktionen zur Schau. Einige Arten gleiten mit Fallschirmen über kurze Entfernungen, der auf Java lebende Flugfrosch kann dagegen mit seinen ausgebreiteten Schwimmhäuten 30 über 35 Meter weit fliegen. Unter den Säugetieren ist es der Flattermaki mit 60 bis 70 Metern und das Flughörnchen, das gleitend eine Entfernung von 80 Metern überwinden kann. Die besten Flieger allerdings findet man unter den Insekten. Fliegen ist ein energieintensiver Vorgang. Vergleicht man die Energie pro Körpermasse und zurückgelegter Strecke, die von

auf Schwimmen, Laufen und Fliegen spezialisierten Tieren für die Fortbewegung aufgewendet werden muss, so stellt man fest, dass laufende Tiere meist mehr Energie pro Kilometer Strecke verbrauchen als gleich schwere Tiere, die fliegen oder schwimmen. Vergleicht man allerdings den Energieverbrauch pro Zeiteinheit, anstatt pro Wegstrecke, dann zeigt sich, dass fliegende Tiere in der gleichen Zeit mehr Energie verbrauchen als rennende oder schwimmende Tiere. Schwimmen ist die energetisch günstigste Art der Fortbewegung.



**Fliegende Fische**. Man möchte fragen, weshalb die Evolution auf die „Idee“ kommt, einen Fisch fliegen zu lassen? Es gibt etwa 40 Arten in der Familie der fliegenden Fische. Sie kommen vornehmlich in gemäßigten Zonen vor. Die größten Exemplare erreichen eine Körperlänge von 45 [cm]. Es sind Zwei- und Vierflügler bekannt. Im Laufe der Evolution haben sich die Brustflossen der Tiere zu dünnhäutigen Tragflächen entwickelt. Man dachte früher, dass der Fliegende Fisch wie eine von einem Unterseeboot senkrecht herausgeschossene Rakete aus dem Wasser saust. Detaillierte Untersuchungen ergaben aber einen anderen – nicht weniger erstaunlichen – Wirkmechanismus. Unter Wasser erreicht der Flugfisch eine Geschwindigkeit von ungefähr 30 [km/h]. Mit dieser Geschwindigkeit schwimmt er in einem flachen Winkel an die Wasseroberfläche, durchstößt sie und stützt sich sodann mit der typisch herausragenden Kante seines Körpers auf den Wasserspiegel. Seine Brustflossen bilden nun eine zur Wasseroberfläche abgewölbte Tragfläche aus. Der Fisch fliegt. Dieser Flugzustand nahe am Wasserspiegel wird durch den sogenannten **Bodeneffekt** begünstigt. Den Vortrieb leistet aber weiterhin die Schwanzflosse des Fisches. Er bewegt er sich nun so schnell, dass nur noch die untere Hälfte der Schwanzflosse wie eine Schiffsschraube im Medium Wasser arbeitet. Diese Antriebsart ist nicht nur originell, sondern in Verbindung mit dem Bodeneffekt höchst effizient. Das bodennahe Fliegen im Medium Luft ist extrem widerstandsarm, die Energieeinkopplung, der Antrieb, erfolgt aber im Wasser. In der Gleichung für den Energietransfer schlägt die Dichte des Wassers im Vergleich zur Dichte

der Luft etwa mit dem „Faktor 1000“ zu Buche. Fliegende Fische sind offenbar hervorragende Energiemanager. Mit Bodeneffekt und Hydroantrieb beschleunigt der Fisch nun auf eine Geschwindigkeit von 65 [km/h]. Unter einem Winkel von etwa 10 Grad hebt er von der Wasseroberfläche ab und erreicht dabei eine Flughöhe von 0,5 bis 5 Metern. Im atemberaubenden Kampf, in der Regel vor einem Raubfisch flüchtend, gleitet der Flugfisch wieder auf die Wasseroberfläche zurück und steckt dabei nur die Schwanzflosse ins Wasser. Durch schnelles Schwingen des Schwanzes beschleunigt er von neuem, dabei entsteht so viel Auftriebskraft, dass er sich wieder in die Luft erhebt. Während der Flucht wendet er diesen Trick drei bis viermal an und fliegt ähnlich wie ein auf die Oberfläche eines Teiches geworfener flacher Kieselstein mehrmals über die Wasseroberfläche. [GRE]

**Der Bodeneffekt / theoretische Überlegungen.** Leonardo da Vinci, der geniale Ingenieur und Naturforscher, entwarf muskelkraftgetriebene Schlagflugmaschinen. Heute wissen wir, dass Menschen rein physiologisch nicht in der Lage sind, derartige Maschinen zu betreiben und damit zu fliegen. Wegbereiter für Starrflügelkonstruktionen war Otto Lilienthal. Er hatte sich Ende des Neunzehnten Jahrhunderts für den biologischen Gleitflug als Vorbild für seine Flugmaschinen entschieden.

In den vergangenen zwei Jahrzehnten beschäftigte man sich am Fachgebiet Bionik und Evolutionstechnik der Technischen Universität Berlin intensiv mit biologischen Fliegern, insbesondere mit Störchen und hatte dies mit Lilienthal gemein, denn auch sein Lieblingstier war der Storch. Aber nicht nur das Studienobjekt „Storch“ war für die modernen Wissenschaftler interessant, sondern auch Lilienthals Art und Weise des Erkenntnisgewinns und sein Experimentierstil. Lilienthal hatte keinen Windkanal. Dennoch gelang es ihm mit einem „Flügelkarussell“ Modelltragflächen im umströmten Zustand zu untersuchen. Das Prinzip dieses Tragflächen-Messstandes ist denkbar einfach. Lilienthal begann mit zwei etwa gleichen Flügeln und ließ sie auf dem Flügelkarussell rotieren. Sobald der eine oder andere Flügel auch nur ein Quäntchen mehr Auftrieb erzeugte – sei es nun aufgrund des günstigeren Anstellwinkels oder einer kleinen Geometriemodifikation – neigte sich die Karussellwaage und der tauglichere Flügel war sofort identifiziert. Lilienthal baute nun den „Gewinner“ exakt nach; die Strömungswaage blieb im Gleichgewicht. Eine kleine Modifikation führte in der nächsten Generation wieder zu einer Qualitätsveränderung. War diese positiv, wurde das Merkmal beibehalten; war sie negativ, wurde das Merkmal verworfen.

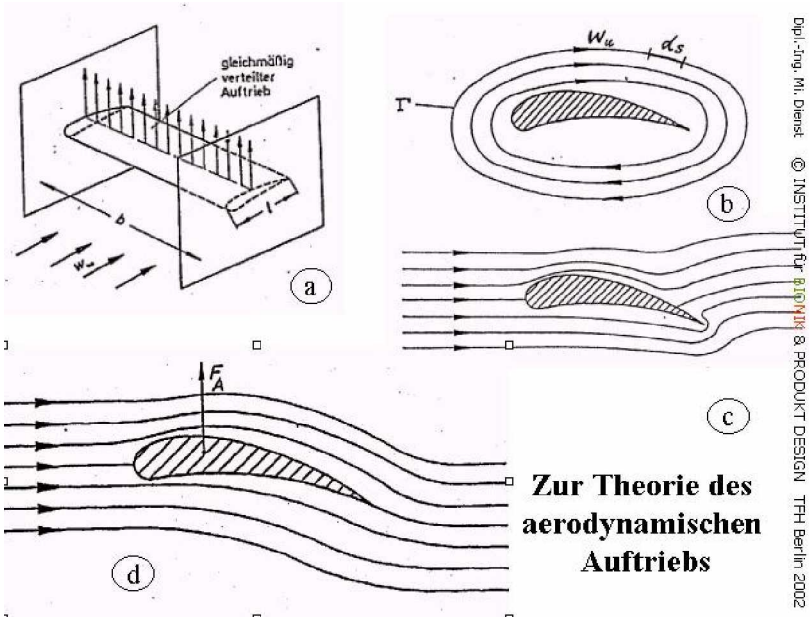
Generation, Variation, Qualität, Merkmal? Sie ahnen, worauf ich hinaus will. Lilienthal betrieb „künstliche Phylogenese“. Für Ingo Rechenberg, den Leiter des FG Bionik und

Evolutionstechnik ein guter Grund, das Flügel-Karussell Lilienthals nachzubauen, um fortan dem staunenden Studenten Mutation, Selektion und damit Evolution „im Fluge begreifbar“ zu machen.

Am Tag der offenen Tür wurde es dann eng in den Institutsgängen. Immerhin ist so ein Drehgestell auch eine potentielle Gefahrenquelle und man platzierte es in eine Ecke. Kaum war das elektrisch betriebene Karussell in Gang gesetzt, begannen die Tragflächen heftig auf und ab zu schweben; das System schaukelte sich förmlich auf, die Vorführung wurde abgebrochen. Was war passiert? Immer in Wandnähe nahm der Auftrieb der vorbeifliegenden Tragfläche spontan und enorm zu, der Flügel stieg, das Karussell wankte: wir hatten eine Begegnung mit dem „Bodeneffekt“ !

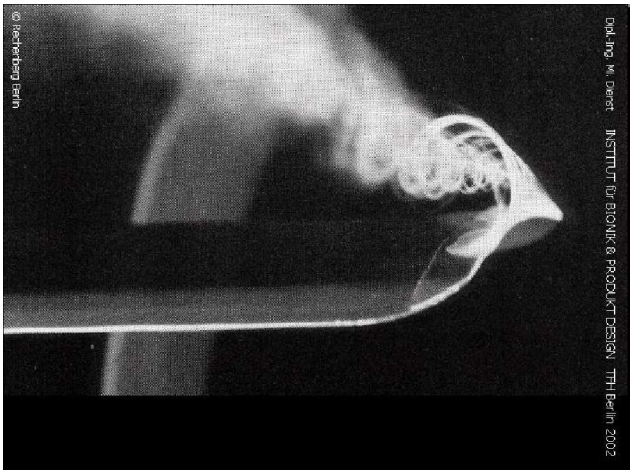
Der Bodeneffekt ist kein Effekt des Bodens, sondern ein Effekt, der aus der Abwesenheit (Minderung) des induzierten, weil auftriebbedingten Widerstands eines Strömungskörpers resultiert. Gehen wir für die folgenden Betrachtungen von einem Tragflügel mit einem über die gesamte Spannweite konstantem Querschnitt aus. b[m] sei die Tragflügelspannweite, t[m] die Flügeltiefe, so ergibt sich $A = b\ t$ [m²] die Tragflügelfläche. Um den Einfluss des Schlankheitsgrades $\lambda = A/b^2$ des Flügels auszuschließen, wird dieser als unendlich breit angesehen, was man sich durch Einspannen des Flügels zwischen zwei feste Wände verwirklicht denken kann.

Die Strömung um einen derartig eingespannten Flügel darf, in zu den seitlichen Wänden parallel verlaufenden Schnittebenen, als ebene Strömung angesehen werden (a). Befindet sich nun ein Tragflügel in einer reibungsfreien Parallelströmung, ergibt sich gemäß der Potentialtheorie das Stromlinienbild (b) mit hinterem Staupunkt auf der Tragflügeloberseite.



Hierbei wird die Hinterkannte des Profils mit (unendlich) großer Geschwindigkeit von unten her umströmt. Zum hinteren Staupunkt hin fällt die Strömungsgeschwindigkeit auf den Wert Null ab. Diese Parallelströmung erzeugt noch keinen Auftrieb. Erst durch die Überlagerung einer Zirkulationsströmung (c) entsteht eine Auftriebskraft am Flügel (d). Die Zirkulationsströmung wird ebenfalls als reibungsfrei angenommen. Die Überlagerung von Parallel- und Zirkulationsströmung ergibt dann folgende zusammengesetzte Strömung. Hierbei ist der hintere Staupunkt gegenüber der reinen Parallelströmung, bei der sich der Staupunkt auf dem Tragflügel befindet, zur hinteren Tragflügelkante hin verschoben. (Abflussbedingung nach Kutta). Das Strömungsbild entspricht den Erfahrungen und kann in Modellversuchen am Windkanal eindeutig nachgestellt werden.

In einem Bereich bestimmter Anstellwinkel bildet sich auf der Unterseite des Tragflügels ein (relatives) Überdruckgebiet aus, auf der Oberseite ein Unterdruckgebiet. Das Über- und das Unterdruckgebiet um ein umströmtes Profil erzeugt den Vortrieb beim Segeln. Den gibt es aber nicht umsonst, denn reale Flügel sind endlich lang. Bei Flugzeugtragflügeln mit endlicher Breite entsteht durch den Druckunterschied zwischen Tragflügeloberseite und Flügelunterseite eine Umströmung der Flügelenden. Dieser Druckausgleich führt zu einem Auftriebsverlust. Da es sich um eine räumliche Strömung handelt, kann diese nicht mehr durch die ebene Potentialtheorie erfasst werden.

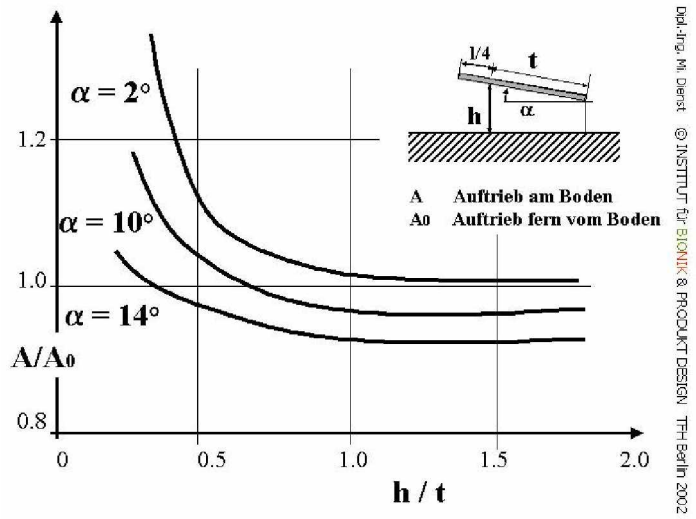



Die Zirkulation und somit auch der Auftrieb wird von der Tragflügelmitte bis zu den Enden stetig kleiner und erreicht am Tragflügelende schließlich den Wert Null. (elliptische Zirkulationsverteilung). Nach dem Wirbelsatz von Helmholtz ist die Zirkulation über die gesamte Breite des Tragflügels aber konstant, so dass die zu einer rechteckigen Zirkulationsverteilung fehlende Zirkulation in Form von freien Wirbeln abschwimmt. Diese Wirbelschicht rollt sich dann hinter dem Tragflügel zu zwei Einzelwirbeln auf. Die beiden freien Wirbel (Randwirbel) und der tragende Wirbel am Flügel schließen sich dann nach Helmholtz durch den sogenannten Anfahrwirbel - er entsteht durch das Abreißen der Strömung an der Tragflügelhinterkante bei Beginn der Bewegung des Auftriebskörpers und hat die gleiche Zirkulationsintensität wie der tragende Wirbel - zu einem geschlossenen

Wirbelring. Die freien Wirbel induzieren nun nach dem Satz von Biot und Savart einen Abwind am Ort des Tragflügels, wodurch dann der induzierte Widerstand beim Tragflügel hervorgerufen wird. Der Anteil dieses sogenannten „induzierten“, weil auftriebbedingten Widerstands, beträgt bis zu 30 % am Gesamtwiderstand eines Auftriebsystems.

Bei biologischen Fliegern wurde das bodennahe Gleiten und auch der Kraftflug dicht über der Wasseroberfläche schon vor geraumer Zeit beobachtet und beschrieben. Bei der Umsetzung in künstliche, technische Flugsysteme fällt automatisch der Name Prof. Dr. A. M. Lippisch. Er gilt allgemein als der Vater der Bodeneffektfahrzeuge. Allerdings war Lippisch nicht der erste Wissenschaftler, der sich theoretisch und experimentell mit den Besonderheiten der „Staulufteffekte“ befasste. So hatte Wieselberger, Assistent von Prof. Prandtl in Göttingen, bereits 1920/21 eine Theorie der Bodeneffekte an Tragflügeln veröffentlicht. Sie beruhte auf der Annahme, dass der induzierte Widerstand bei Annäherung eines Tragflügels an den Boden vermutlich kleiner wird. Praktische Versuche mit kleinem Bodenabstand und großer Flügeltiefe haben damals nicht stattgefunden.

Der Finne Kaairo hatte erstmalig 1932 den Bodeneffekt an einem Schlittenfahrzeug angewendet und auch ein Patent darauf erhalten. Da dieses nur in finnischer Sprache vorlag, blieb es lange Zeit unbekannt. Erst 1959 wurde Kaairo zu einem Vortrag in die USA eingeladen. Neben den Arbeiten von Wieselberg wurde die Theorie des Bodeneffektes für die ebene Platte von Tamotika, Nagatnya und Takenouti 1933 behandelt. Tani, Taima und Limidu (1937) haben denselben Fall mit einer Näherungsmethode untersucht.



Beide Ergebnisse sind schematisch dargestellt. Das Diagramm zeigt die Abhängigkeit der Auftriebskraft vom Abstand der Tragfläche zum Boden. Nach Kaairos Vortrag in den USA begann man auch dort mit der Erforschung des Bodeneffekts. In den Folgejahren wurde die Wieselbergersche Theorie durch die NASA im Windkanal bestätigt.
Zusammenfassend darf gesagt werden: Um den Bodeneffekt zu erklären, bedarf es keiner neuen Theorie. Die theoretischen Grundlagen des Bodeneffekts sind die des endlichen Tragflügels. Wenn es nur gelingt, die auftriebsbedingte Randkantenumströmung zu vermeiden, können Tragflächen mit hohen Wirkungsgraden realisiert werden.

**Aktuelle Entwicklungen: Bodeneffektfahrzeuge.** Das Motiv für eine technische Nutzung des Bodeneffekts als Lösungskonzept für den Gütertransport ist klar, denn zu jeder Transportgeschwindigkeit gibt es ein optimal effizientes Verkehrsmittel. Für Geschwindigkeiten bis etwa 50 [km/h] ist es das Schiff, oberhalb von ungefähr 400 Stundenkilometer das Flugzeug und im Bereich dazwischen die Eisenbahn. Für die mittleren Geschwindigkeiten sind Hubschrauber, Tragflächenboote und Luftkissenfahrzeuge verfügbar, aber unrentabel. Bodeneffektflugzeuge die im Meer starten und landen können und 300 bis 600 Stundenkilometer schnell sind, könnten hier eine Lücke schließen. Schon Anfang der dreißiger Jahre begannen die Lufthansapiloten, den von Wieselberger theoretisierten Bodeneffekt auf ihren Transatlantikflügen zu nutzen. Die hervorragenden Flugeigenschaften der Do-X und der Wal-Flugboote erlaubten bei ruhigem Wetter stundenlanges, freihändiges Fliegen knapp über dem Wasser. Dabei konnte bis zu 50% Kraftstoff eingespart werden. Natürlich waren Flugboote trotz der großen Flügeltiefe noch keine typischen Bodeneffektfahrzeuge. Es wurde aber gezeigt, dass Meere und Ozeane ideale Einsatzgebiete für die Nutzung des Bodeneffekts sind. Hybridfahrzeuge aus Schiff und Flugzeug nennt man im Westen WIG *(wing in ground,* Tragflügel im Bodeneffekt) und in Osteuropa Ekranoplan. Obwohl diese bereits vor Jahrzehnten als Truppentransporter in der Sowjetunion entwickelt wurden, sind sie nach zivilen Standards für einen wirtschaftlichen und sicheren Betrieb noch nicht geeignet. Ekranoplan ist auf zusätzliche Düsen angewiesen, die das zum Abheben notwendige Gaskissen bilden und damit eher mit den Hovercraft-Fahrzeugen zu vergleichen, die zwischen England und Frankreich pendeln. Auch kleinere deutsche Firmen haben bereits Prototypen entwickelt, doch hätte ein Personentransport mit 300 Stundenkilometern in einer Flughöhe von wenigen Metern wohl derzeit keine Aussicht auf Genehmigung.

**Konditionieren der Kantenumströmung / Randwirbel.** Messungen am Windkanal bestätigten die Vermutung, dass der aufgefingerte Vogelflügel ein sehr effizientes Flugaggregat ist. Die Entdeckungen des Wirbelspuleneffekts bei den aufgefingerten Tragflächen der Landsegler hat in den vergangenen zwanzig Jahren viel Phantasie bei Flugzeugkonstrukteuren freigesetzt. Versuche, den Vogelflügel technisch nachzubilden, führten zu den sogenannten Winglets. Aber um es vorweg zu sagen: Das aufgefingerte Unterliek am Yachtsegel, das „**Sailet**“, ist derzeit nicht in Sicht.

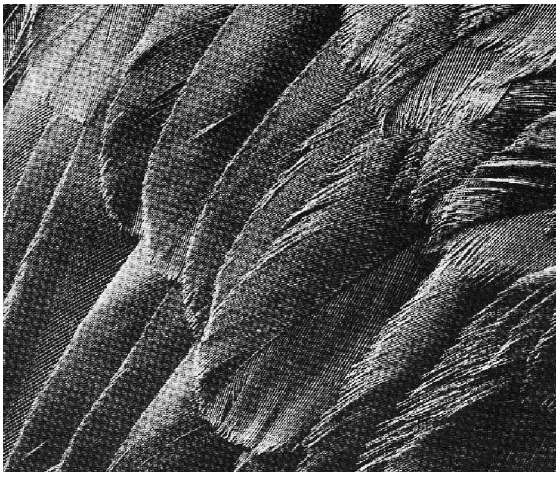
Die Zeiten, in denen die Konzentrationsfaktoren von aeromechanischen Wirbelspulen bis an die Grenzen des physikalisch Machbaren ausgereizt wurden, sind zunächst vorbei. Am Fachgebiet Bionik und Evolutionstechnik wird dennoch weiter an der Kantenumströmung biologischer und technischer Tragflächen geforscht. Die Ergebnisse sind weniger spektakulär als damals, dafür aber praxisnah. Auf der Suche nach geeigneten Randbogengeometrien machte man kürzlich eine verblüffende, ja nahezu triviale Erfahrung. Während der zahlreichen Experimente am Windkanal kam man auf dem Weg zu einem aufgefingerten technischen Tragflügelrandbogen zwangsläufig an einer großen Zahl nichtoptimaler Zwischenlösungen vorbei. Zwar erreichen diese die widerstandsmindernden Leistungen biologischer Tragflächen nicht annähernd, sind aber auch keine Totalausfälle. Wenn man nicht in die Effizienz-Spitzenregionen biologischer Gefieder vordringen will oder kann, leistet fast jede (strömungsmechanisch vernünftige) Randbogengeometrie, die in der Lage ist, den Randwirbel „räumlich zu verschmieren“ (Ingo Rechenberg) einen spürbaren Beitrag zur Reduzierung des induzierten Widerstands. Der Konstrukteur findet dann zwar mit hoher Wahrscheinlichkeit keine Weltrekordler, wohl aber eine Schar robuster Allrounder. Dies bedeutet für den Ingenieur ein Zugewinn an gestalterischer Freiheit mit der Aussicht später, aus einer Position des kreativen Mittelfeldes heraus, eine spezifische, dem Produkt nahe Optimierung anzugehen.

**Technische Gefieder.** Einen Randwirbel räumlich verschmieren, das könnte für einen Flugzeugtragflügel die geschickte, weil strukturmechanisch unbedenkliche Auswahl einer Endscheibe oder eines Winglets bedeuten. Räumlich verschmieren, das mag bedeuten, den Ort der Wirbelentstehung zu variieren. Aus diesem Blickwinkel ist die Auffingerung eine geniale Auflösung der kompakten Randbogengestalt. Für die elliptische Flügelform trifft dies ebenfalls zu. Die Keime der stromabwärts abfließenden Wirbel werden auf einem eleganten Bogen verteilt. Bekanntlich besitzt der elliptischen Randbogen sehr gute Widerstandsbeiwerte. Schon in den Jahren vor dem Zweiten Weltkrieg gelang dem deutschen

Aerodynamiker M. Munk, der mathematische Beweis, dass für einen Einzelflügel der induzierte Widerstand dann einen Minimalwert annimmt, wenn die induzierten Abwärtsgeschwindigkeiten entlang der Flügelhinterkante gleich groß sind. Der elliptische Tragflügel ist im Hinblick auf den induzierten Widerstand der ideale Flügelumriss. Alle anderen Grundrissformen sind in dieser Hinsicht ungünstiger, insbesondere die Dreieckform.

Gut, es gibt das elliptische Rigg. Aber überspitzt ausgedrückt, herrscht beim Yachtsegel die Formel vor: Mast, Baum, Tuch, dreieckig.

Ist das der Rahmen, in dem sich der gemeine Riggkonstrukteur zu bewegen hat? Gibt es praktikable Möglichkeiten den geometrischen Rahmen, den das Dreieck aufspannt zu verlassen? Moderne Riggs sind bei weitem nicht mehr dreieckig, aber das technische Arrangement ist sehr kompliziert.



Werfen wir einen Blick auf die belebte Natur. Das Gefieder der Vögel birgt eine Vielzahl unterschiedlichster Geheimnisse. Es speichert Luftmasse, wirkt also als Barriere gegen Wärmeaustausch und ist extrem leicht. Gefieder bildet, im Gegensatz zum Segeltuch, das eher dem physikalischen Modell einer gewölbten Platte entspricht, räumliche Tragflächenprofile aus. Als Universalflügel kann der Vogel mit Gefieder extrem unterschiedliche Manöver und Flugstile fliegen. Wie manche Kunststoffgewebe, neigt Gefieder dazu, sich im Fluge elektrostatisch aufzuladen. Wozu das dient, wissen wir noch nicht! Genauso wenig weiß man darüber, welchen Nutzen die Gasdurchlässigkeit von Federn birgt. Eine einzelne Feder ist gasdurchlässig. Werden viele dieser Elemente dachziegelartig angeordnet, tritt eine neue Qualität auf: Der Widerstand gegen Massendurchfluss in einem Gefieder besitzt einen Gradienten und es ist davon auszugehen, dass er variant ist – vielleicht sogar regelbar.

Welch ein wunderbares Baumaterial. Spielen wir kurz mit der Idee „Gefieder“. Angenommen, wir besäßen (als Riggkonstrukteur) kleine Konstruktionselemente (Panels), die alle Festigkeitseigenschaften der Segeltuchfläche (Matrix) aufwiesen und darüber hinaus noch die Gefiedereigenschaft des definierten Massendurchflusses besäßen. In unserem Spiel dürfen wir nun die Panels frei auf der Matrix verschieben. Ich wage zu behaupten, dass unsere Segeltragfläche nur noch entfernt an ein Dreieck erinnerte. Wie Windkanalversuche zeigen, kann das Vorliek am Segelkopf um bis zu 15 % abgeschnitten werden, ohne dass sich dies auf die Segelleistung am Wind auswirkt [MAR]. Spannender noch ist die Situation am

Unterliek. Wir wollen ja den Randwirbel deformieren indem wir Einfluss nehmen auf die Orte der Umströmung. Dem Experimentator an einem fiktiven Windkanal stünde nun eine Messanlage zur Verfügung um die Qualität jeder einzelnen Riggvariante zu ermitteln. Die Variation kann beginnen. Wahrscheinlich müssten wir ganz schön viele Verschiebungen unserer Panels durchführen, vielleicht das eine oder andere Panel ganz aus dem Spiel nehmen oder neue Panels dazu, um irgendwann einmal ein optimales Rigg zu finden. Mit einer klugen Strategie, die uns sagt, ob an dieser oder jener Stelle ein Panel „gesetzt oder gestrichen“ wird, ließe sich das Verfahren beschleunigen. Die belebte Natur besitzt solch ein gut ausgetestetes Optimierungsverfahren: die Evolution.

**Evolutionsstrategie und Phylogenetische Algorithmen.** Ein von Ingo Rechenberg in der Mitte der siebziger Jahre entworfenes und seither immer weiter verfeinert und entwickeltes Verfahren greift markante Merkmale der Evolutionstheorie auf und gießt sie in eine für technische Optimierungsaufgaben verwertbare Form: die Evolutionsstrategie. Sie sind als hocheffizientes Instrument für Strukturoptimierungen FEM, Strömungssimulationen CFD und Kombinationen beider Simulationsverfahren von uns entworfen worden und lassen sich für Aufgaben einsetzen, bei denen einer mathematischen Behandlung auf Grund der Komplexität des Problems der Zugang versperrt ist und/oder ein genaues Wissen über die speziellen Eigenschaften nicht existiert. Gemäss dem oben angeführten Gedankenexperiment stellt ein phylogenetischer Algorithmus eine Plattform für Experimente am Windkanal da oder mag als optimierende Umgebung für CFD/FEM Szenarien dienen. Ein derart optimiertes Segel macht, was auch der Bodeneffekt bewirkt: es deformiert oder tilgt den schädlichen Randwirbel, es reduziert den induzierten Widerstand.

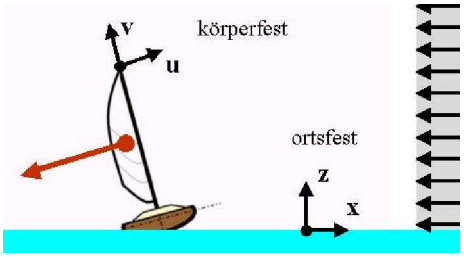
Das Gefieder von Vögeln im Bodeneffekt ist am Randbogen gespreizt, und die Erfahrung zeigt, dass selten ein Detail des Flugbildes biologischer Flieger keinen (energetischen) Sinn ergibt – rein aus einer evolutiostheoretischen Logik heraus. Ich persönlich halte die partiell und lokal durchströmte Tragfläche für ein wichtiges Detail auf dem Weg zu einem Bodeneffektsegel.

Wir sprachen über Optimierung. Um überhaupt einem Optimierungsprozess zugänglich zu sein, müssen Systeme - biologische wie künstliche – einige wenige aber notwendige Kriterien erfüllen:

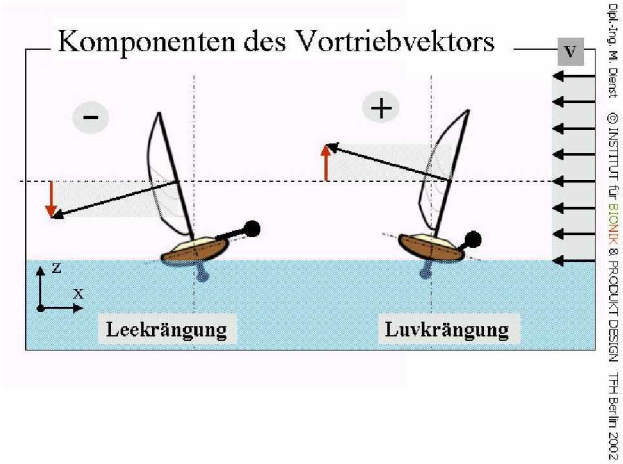
Variabilität der Parameter ,Überprüfbarkeit und Qualitätsfunktion, Entwicklungszeit .

Auch möchte ich den Flügel oder das Segel als Konstruktion nicht von der Art es zu betreiben, dem Flug- oder Segelstil isolieren. Bodeneffektsegeln ist immer das Wechselspiel von Wirkungen des äußeren Systems, der Strömung, mit dem inneren System, der Konstruktion, dem Lebewesen.

**Bodeneffekt und Segelstil.** Die Kraft, die beim Segeln den Vortrieb erzeugt stelle ich mir gerne als eine senkrecht auf der Segelfläche im Druckpunkt stehende Kraft vor. Dieser Vektor, der in einem am Segel körperfesten Koordinatensystem in „Normalenrichtung“ – wie es immer so schön heißt – zeigt, ist natürlich fiktiv, fasst alle am Segel auftretenden Auftriebskräfte in einem Punkt zusammen und dient hier nur als Erklärungsmodell. Vektoren haben einen Betrag, eine Richtung und einen Richtungssinn, was für unsere Betrachtungen von Bedeutung ist. Körperfeste Koordinatensysteme ihrerseits besitzen nun (definitionsgemäß) die angenehme Eigenschaft, dass sie sich mit dem Körper mitbewegen, was auch immer mit den Kräften, die ich in solch einem körperfesten Koordinatensystem betrachte, geschieht. Den Wind mit dem ich segeln will, betrachte ich hingegen in einem ortsfesten Koordinatensystem, das ich mir fest montiert auf der Wasseroberfläche vorstelle. Das klingt verwirrend, ist aber sehr praktisch. Beispielsweise kann ich mir nun vorstellen, wie sich mein Segel bei Leekrängung abmüht, mit einer verkleinerten wirksamen (projizierten) Funktionsfläche Vortrieb zu erzeugen. Und ich sehe noch mehr. Meine Vortriebskraft – sie steht ja senkrecht auf der Segeltragfläche – weist bei einer Krängung nach Lee in den See hinein. Ich habe zwar, so stelle ich mir vor, mehr oder weniger erfolgreich dem Wind Energie entzogen, habe diese Energie auch umgewandelt in eine zum Vortrieb verwertbare Kraft, aber was tue ich mit diesem wertvollen, der Luftströmung mühsam abgetrotztem Gut? Ich versenke es im See.




Um die Intensität dieser Kraft gen Wasseroberfläche abzuschätzen, übertrage ich sie kurz in das ortsfeste Koordinatensystem. Im Zweidimensionalen Fall und bei einem Krängungswinkel von 10° beträgt der senkrecht zur Wasseroberfläche gerichtete Anteil gleich 100 SIN(10°) = 17.4 Prozent der gesamten



von meinem Segel produzierten Vortriebskraft. Bei 15° Krängung sind es bereits über 25 Prozent. Nun zur guten Nachricht: für Luvkrängung gilt das Gegenteil. Der Vortriebsvektor besitzt nun eine vom See weg gerichtete Vertikalkomponente. Theoretisch ist das perfekt: man fährt seine Jolle mit (ein wenig) Krängung nach Luv, und schon fliegt man (ein wenig).

Mein Segeln dient nicht dem Transport von Gütern. Mein Segeln ist in erster Linie Selbstzweck:„ich segle doch nicht um auf die andere Seite des Sees zu kommen!“ Segeln heißt aber auch Spaß haben am Perfektionieren des Segelstils. Die beste Art seinen Segelstil zu perfektionieren ist das Segeln. Die zweitbeste Art ist das Beobachten.
> Paul Elvström war überrascht, wie viel er in den drei Jahren lernte, als er aufhörte Regatten zu segeln und nur von einem Motorboot aus beobachtete: "Ich habe nie soviel über Taktik gelernt, wie von dem Motorboot aus. Ich erinnere mich gut daran, als wir einmal hinausgingen, um Segel, die wir gemach hatten, anzuschauen. Es war ein großes Feld und ein Freund fragte mich, „Paul, kannst du mir nicht sagen, wo ich hinsegeln soll?“ Ich sagte 0.K. Auf der nächsten Kreuz fuhr ich hinter ihm und sagte, Wende!, und dann nach einer Weile wieder, Wende!, und so segelte er vom 25. auf den dritten Platz vor .< [TWI]
Am meisten freue ich mich auf unsere alljährliche Champagner-Regatta. Der 505er gehört zu den sportlichsten internationalen 2-Mann-Booten. Die „Pfeife“, wie diese Gleitjolle liebevoll genannt wird, ist reizvoll zu segeln und regatta- und segeltechnisch ein sehr anspruchsvolles Boot. Für mich ist die 505er die Königsklasse unter den Jollen. Vielleicht liegt es auch am Klientel. Nicht Akrobaten auf fliegenden Röhnrädern, sondern meist sehr erfahrene, abgeklärt und ausgeruht wirkende Spezialisten gehen hier auf die Kreuz. Bei keinen anderen Regatten habe ich mehr über das Aufrechtsegeln erfahren, als bei der 505er Klasse. Das ist nicht nur schön anzusehen, das aufrechte Segeln lässt diese wunderbare Gleitjolle zur Rakete werden.
Es gibt eine Reihe guter Gründe, ein Schiff aufrecht zu segeln. Der Krängungswiderstand des Bootes ist eigentlich Teil des Formwiderstandes, nämlich die Zunahme des Fahrwiderstandes, sobald das Boot krängt. Es zeigt sich, dass bei Yachten oberhalb eines Krängungswinkels von 15°-20° der Krängungswiderstand beachtlich wächst und bei Jollen solche Krängungswinkel schon zu erheblichen Fahrtverlusten führen. Jollen sollten aufrecht, Yachten so aufrecht wie möglich gesegelt werden. [DEN] Folgen wir noch einmal den Beobachtungen von Eric Twiname in „Sail, Race and Win“: > Wo liegt der Unterschied zwischen jedem einzelnen Boot? Exakt welche Bewegungen führt die Mannschaft in den besseren Booten aus? Ist die Bewegung konstant oder nur gelegentlich, stark oder gering? Auf diese Weise kann ein Beobachter ungeheuer viel lernen, besonders an einem böigen Tag, denn Böen erschweren

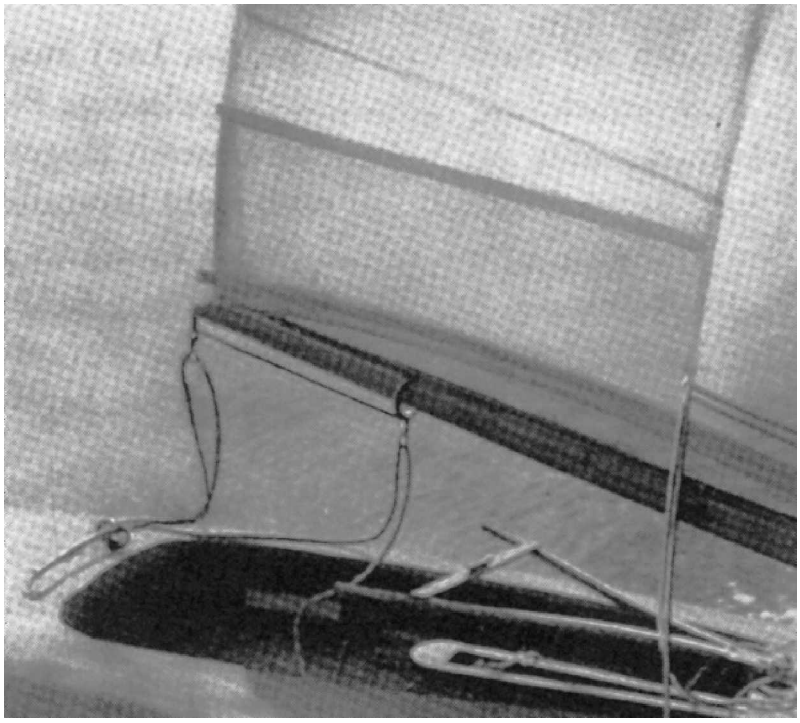
das aufrechte Segeln sehr. Er wird sehen, dass die führenden Segler ihre Boote sehr aufrecht halten, selbst in den Böen. Das Mittelfeld krängt in den Phasen gleichmäßigen Windes ein wenig und in den Böen stärker. Der Rest krängt die ganze Zeit über recht stark und legt sich in den Böen flach. Dabei sieht der Beobachter, wie viel die krängenden Boote an Boden verlieren, und erkennt, wie wichtig aufrechtes Segeln ist, um eine Jolle bei Wind schnell zu segeln. Der beste Weg, mit dem Üben zu beginnen, ist genau das Gegenteil zu tun - absichtlich nach Luv gekrängt zu segeln. Segele das Boot hoch am Wind wie gewöhnlich mit der gesamten Crew hart ausreitend, luve dann ein bisschen an und fiere die Großschot ein wenig, so dass das Boot ungefähr 10 Grad krängt und so halte es beim Segeln. Es ist nun wichtig, weiterhin auszureiten und wie auf einer Wettfahrt hoch am Wind zu segeln, aber mit der 10 Grad Krängung nach Luv. < [TWI]

Aufrechtsegeln, nach Luv krängen. In perfekter Weise tun dies Surfer. Das Unterliek vollständig zum Abschluss gebracht, sausen sie raumschots mit imposanter Luvkrängung über die Wasseroberfläche. Gerne (und neidvoll) beobachte ich Surfer beim Bodeneffektsegeln.

Als Zusammenfassung der Zitate und meiner Überlegungen zum Segelstil möchte ich einen Slogan zum Bodeneffektsegeln formulieren:

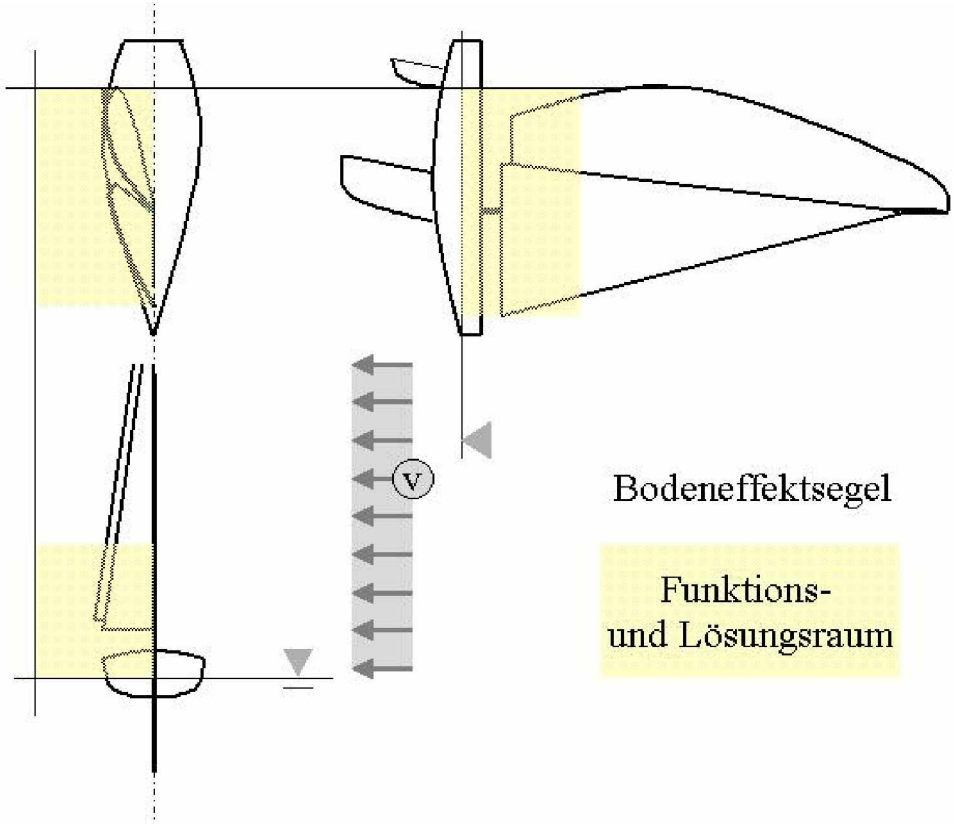
„Tilge den Randwirbel und gib dem Segel eine Vertikalkomponente!“

**Entwürfe.** Vorhandene Technik nutzen, den Segelstil perfektionieren, das ist gut. Ich möchte diesen Aufsatz über das Bodeneffektsegeln nicht abschließen ohne auf Konstruktionen und Entwürfe einzugehen, die das Bodeneffektsegeln begünstigen. Lassen wir an dieser Stelle Manfred Curry zu Wort kommen. > Die Luft strömt also sowohl von der Segel-Vorder- und Hinterkante in Form von Wirbeln als auch von der Unterkante (Großbaum) dem luftverdünnten Raum zu. Wir sahen ferner, dass der unter dem Großbaum (in der Nähe des Mastes) gehaltene Flaum mit großer Beschleunigung um diesen herum nach Lee



gesogen wird. Der Leser weiß auch bereits, dass wir durch eine richtig geformte und entsprechend gestellte Fock leitflächenähnlich die von vorne um den Mast eilende Luft ablenken, bzw. die Ausfüllung des Unterdruckraumes durch diese Ablenkung erschweren können. Nicht aber haben wir versucht, die von unten (und oben) einströmende Luft abzuhalten! Wäre es denn nicht auch möglich, diese um den Großbaum kommende Luftzufuhr zu verhindern?

Diese Überlegungen waren es, die mich auf den Gedanken gebracht haben, an dem Großbaum eine *horizontale Platte* anzubringen. Weder kann nun die Luft auf der Luvseite nach unten ausweichen (wird folglich komprimiert), noch kann sie um den Baum herum auf der Leeseite nach oben in den Unterdruckraum strömen. Dieser «Platten-Großbaum» wurde von der Versuchsanstalt Junkers nachgeprüft, und die Überlegung erwies sich als richtig.< Das Bild zeigt allerdings nicht die Pokaljacht, die hier erwähnt wird, sondern die 10m²-Jolle Currys mit Segeltasche und ist seinem Buch [CUR] entnommen. Die Segeltasche der 10m²Jolle ist ein bemerkenswertes Detail. Sie realisiert eine ganze Schar von Anforderungen (Slogans), die ich




Dipl.-Ing. Ml. Dienst © INSTITUT für BIONIK & PRODUKT DESIGN TFH Berlin 2002

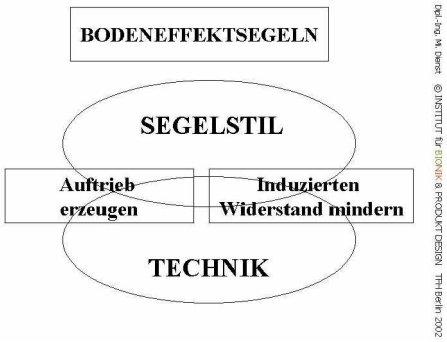
mit der Idee eines Bodeneffektsegels verknüpfe:

* Die Segeltasche ist einfach.
* sie ist beidseitig beaufschlagbar, wendbar.
* sie adaptiert auf vorhandene Technik, ist also eine Erweiterungs- und Optimierungskonstruktion.

* gegenüber der Kantenumströmung übernimmt die Segeltasche die Funktion einer Endscheibe. Vielleicht gelingt hier die Deformation des schädlichen Randwirbels, von dessen Existenz und Wirkung Curry wusste.
* Die Segeltasche ist eine Option.

Seiten der Optimierungsmethodik ist der letzte Punkt natürlich besonders hervorzuheben. Optionen zu haben, bedeutet die Variabilität der Parametern des Problems in einem Lösungsraum. Eine kluge Optimierungsstrategie würde nun versuchen, eine Modellbildung zu entwickeln und mit der (abstrakten) „Idee Segeltasche“ zu spielen, ihre Gestalt zu variieren. Jede Variation ließe sich im Windkanal oder einer CFD-Simulation, sofern diese das leistet, auf ihre Qualität überprüfen. Die Tauglichste unter den Varianten wäre der Elter der nächsten Generation, seine Varianten (Mutanten) würden wieder auf Qualität überprüft, usw. Sie kennen diese Spiel - es ist ein Phylogenetischer Algorithmus.
In der Tat waren derartige Variationen Grundlage meiner Arbeiten zum Bodeneffektsegeln. Verfolgen wir den Gedanken der Geometrievariation weiter, so erhalten wir den Lösungsraum, auf den eine den Randwirbel minimierende und den Bodeneffekt unterstützende Erweiterungs- und Optimierungskonstruktion fokussiert.

**Das Bodeneffektsegel (BoESe).** Segeln heißt, aus der Atmosphärenströmung Energie zu entkoppeln, sie zu wandeln und in Vortrieb umzusetzen. Dies soll auf effektive und elegante Weise erfolgen. Speziell Bodeneffektsegeln heißt, segeln unter zwei besonderen Aspekten:




I Einen Teil der vom Segel erzeugten Kraft für den aerodynamischen Auftrieb nutzen.

II Das physikalische Wirkprinzip der Widerstandsminderung einer auftrieberzeugenden Tragfläche in Bodennähe nutzen.

Bodeneffektsegeln ist ein bestimmter Stil zu segeln. Bodeneffektsegeln kann aber auch bedeuten, dass eine besondere Technik, ein besonderes Segel, das Bodeneffektsegel BoESe

eingesetzt wird. Nachfolgend sollen Lösungsvorschläge für diese technisch zu lösende Aufgabe erarbeitet werden.

Man wusste ja in etwa was einem da erwartete. Bilder eines 18 Feeter hatte ich schon gesehen, dann den ersten 49er am Wannsee. Dennoch war die Präsentation des 29er, der kleinsten Speedjolle, ein Spektakel. Die 29er-Jolle ist die logische Konsequenz eines allgemeinen Trends hin zu Geschwindigkeit, schnellem Aufgleiten und maximal fun. Für unsere Kids genau das Richtige. Es herrscht eine spürbare Tendenz zum „Vortriebgigantismus“ bei Skiffs und Rüsselbooten sowieso, aber auch bei bewährten Konstruktionen. Interessanterweise gibt es in dieser Saison eine Neuerung am 505er: die Vergrößerung der Spinnakerfläche. Der Kopf des Vorwindsegels liegt nun ein beachtliches Stück höher, der vergrößerte Spi steht nun fast senkrecht. Das führt einerseits zu mehr Geschwindigkeit auf Vorwindkursen, andererseits steht das Vorsegel steiler. Gefragt, hätte ich genau zum Gegenteil geraten: „Suche eine Lösung, die den Spinnaker flacher werden lässt“.

Bioniker sind keine Yachtkonstrukteure. Die Bionik als Wissenschaft soll erfolgreiche Lösungen der belebten Natur aufspüren und deren Wirkprinzipien entschlüsseln. Bionik ist auch keine Wunderwaffe und kein Allheilmittel, sondern ein gut funktionierendes Instrument. Wie jedes Werkzeug, kann man es ungebraucht in der Schublade liegen lassen, oder im Bedarfsfall einsetzen, um das eine oder andere Problem zu lösen. Die Kernkompetenz des Instituts für Bionik und Produkt Design der TFH Berlin ist die „frühe Phase“ im Produktentwicklungsprozess. Auf dem Weg von einem guten zu einem optimierten Produkt lassen sich immer Produktfunktionen aufspüren, die nicht, oder unzureichend von einem physikalischen Effekt bedient werden. In der Praxis besteht das Problem selten darin, dem Mangel zu nennen, sondern in einer sehr frühen Phase im Produktentwicklungsprozess eine kompetente und attraktive Schar von Lösungsvarianten zur Verfügung zu haben. Hier setzen Bioniker an, hier zeigen sie auf die Lösungen der belebten Natur. Der Entwurf, die Konstruktion, der gesamte Prozess der Produkterstellung, inklusive der „after sales aspects“ bleibt in den Händen der Experten.
Konstruktionsbereiche die im Laufe der Produktgenerationen schon einen sehr hohen Grad der Anpassung an technische Erfordernisse, Kundenerwartungen oder gesetzliche Bestimmungen erworben haben, sind allzu oft geradezu resistent gegenüber Innovationen. Von der Erfindung der Winglets bis zu ihrem ersten Einsatz am Serienflugzeug vergingen über 20 Jahre.

**Die Intensität des physikalischen Effekts**. Bioniker müssen den Entwicklungsingenieuren die naturwissenschaftlichen Grundlagen aufzeigen, auf der ihr Vorschlag einer Optimierung eines Produkts nach dem Vorbild der belebten Natur basiert. Bioniker haben es leichter, als die Entwicklungsingenieure, die in Betrieben Rechenschaft darüber ablegen, ob und warum sich der hohe Aufwand einer Weiterentwicklung oder sogar einer Neukonstruktion überhaupt lohnt. Rechnen Sie bitte damit, dass in einer Welt der datendurchdrungenen Produktenterstellung ein Marketingsachbearbeiter Ihren (genialen) Entwurf kritisch hinterfragt und nicht selten ihr Projekt zu Fall bringt. Ihre CAD Konstruktion ist perfekt, Sie haben den physikalischen Effekt mit CFD Simulation wieder und wieder modelliert, die Bauteilfestigkeit mit FE Methoden nachgewiesen, Sie haben mit raffiniertesten Optimierungsalgorithmen das gesamte System konditioniert; kurz, Sie malen sich die vollständige Prozesskette einer modernen Produkterstellung aus, um während Ihrer Präsentation in der 12. Etage feststellen zu müssen, dass dort auf dem Niveau von Legosteinen über Ihr Projekt entschieden wird. Für genau diese Situation ist die nachfolgend abschätzig als Abschätzung zu bezeichnende Handrechnung gedacht.

**Fragen wir zunächst danach, auf welchem Energieniveau Segeln stattfindet.** Segeln heißt Energie aus einem bewegten Medium entkoppeln. Welche Energiemenge steht im Idealfalle zur Verfügung? Wie viel Energie lässt sich, unter Annahme einer wirkungsgradoptimalen Leistungsentnahme (alle $\eta$=1), maximal entkoppeln?

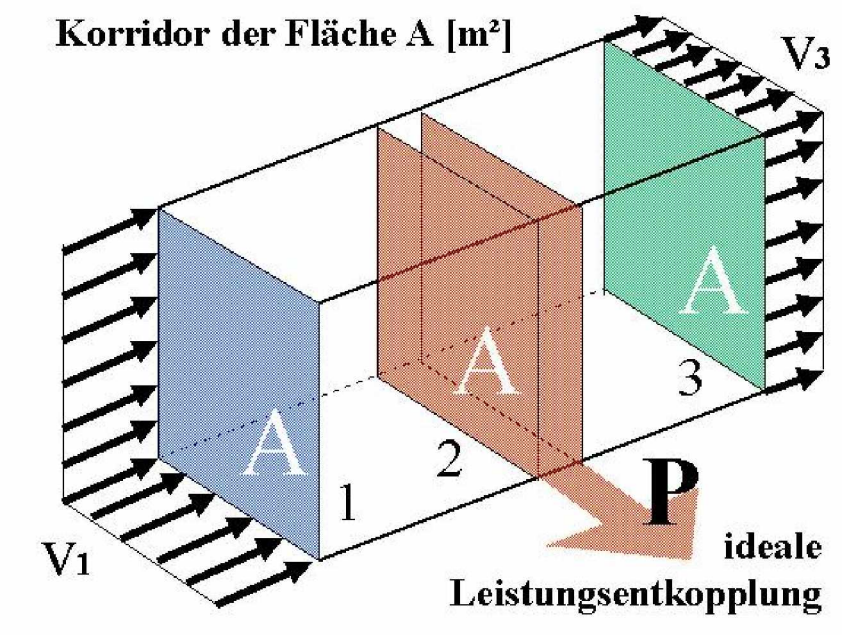
Betrachten wir einen 1 [m] mal 1 [m] großen Korridor, in den ein Fluid – in unseren Falle Luft, mit einer Geschwindigkeit von v [m/s] hineinfließt. Mit der kinetischen Energie der bewegten Luftmasse E

$$E = \tfrac{1}{2}\, m\, v^2 \qquad (1)$$

Der Korridor habe die Fläche A = 1 [m²]. Uns interessiert nun die Leistung P = dE/dt der Strömung durch die Kontrollfläche.

$$P = \dot{E} = \tfrac{1}{2}\, \dot{m}\, v^2$$

$$P = \tfrac{1}{2}\, \rho\, A\, v^3 \qquad (2)$$




Diese Leistung P lässt sich aber nicht vollständig dem Wind entziehen. Unabhängig davon mittels welchen physikalischen Prozesses der Strömung Energie entkoppelt wird, wollen wir an dieser Stelle annehmen, dass an einer bestimmten Stelle des Korridors, der aktiven Ebene (Ebene 2) dem Wind durch Verzögerung verlustfrei Energie entzogen wird. Die Kontinuitätsgleichung liefert:

Kontinuitätsgleichung

$$\rho A_1 v_1 = \rho A_2 v_2 = \rho A_3 v_3 \quad (3)$$

Die Dichte ρ [kg/m³] soll konstant sein. Die der Strömung entzogene kinetische Energie ist die Differenz der in den Korridor eingehender und aus dem ihm herausgehender kinetischer Energie. Die (durch Verzögerung) dem Wind ideal und verlustfrei entnommene Leistung ist:

$$E_{kin} = \tfrac{1}{2}\, m\, (v_1^2 - v_3^2)$$

$$P_{entkoppelt} = \tfrac{1}{2}\, \dot{m}\, (v_1^2 - v_3^2) \quad (4)$$

Ein kleines Gedankenspiel: Verzögerten wir die Strömung nicht, dann wäre v(1) = v(3) und die entkoppelte Leistung P(entkoppelt) = 0 . Verzögerten wir - bei idealer Leistungsentnahme - wir die Strömung zu stark, käme es zu einer „Verstopfung“ des Korridors. Im Extremfall wird dann der Massenstrom (dm/dt ) = 0 und v(3) = 0. Es muss also zwischen v(3) = v(1) und v(3) = 0 einen günstigen Wert geben, damit eine Leistungsentkopplung überhaupt stattfinden kann; Segeln wäre sonst nicht möglich. In der Strömungsmechanik ist der sogenannte Leistungsbeiwert nach Betz cp bekannt, auf dessen Herleitung ich an dieser Stelle verzichte. Für die entkoppelte Leistung gilt dann:

$$P_{entkoppelt} = \frac{1}{2}\, \dot{m}\, v_1^2\, c_p$$

mit $\dot{m} = \rho A v$

$$P_{entkoppelt} = \frac{1}{2}\, \rho A\, v^3\, c_p \qquad (5)$$

Der maximal erreichbare Leistungsbeiwert liegt bei cp = 0.59 [-]. Man muss – bildlich gesprochen – dem Wind einen ordentlichen Energiebetrag lassen, damit der Korridor nicht verstopft und die energetisch „ausgeweidete“ Strömung abfließen kann. Für eine erste Abschätzung wähle ich generell cp = 1/2 [-]. Fassen wir die Modellannahmen noch einmal zusammen:

I idealisierte Strömung durch Korridor, die Kontinuitätsgleichung gilt.

II die durchflossene Querschnittsfläche soll A = 1[m²] sein.

III ideale Leistungsentkopplung im Korridor, der Wirkungsgrad des Segels sei $\eta$ =1.

IV der Betz’sche Leistungsbeiwert soll cp = 0.5 [-] betragen.

Um die Modellannahmen auf Segeltragflächen im Betrieb anzuwenden, gehen wir ferner davon aus, dass für eine ideale Leistungsentkopplung im Korridor die Geschwindigkeit des „scheinbaren Windes“ betrachtet wird. Unter Berücksichtigung der Modellannahmen erhält man eine extragriffige Formel für die Leistung, die man einem Quadratmeter Aktionsfläche entnehmen kann. (ein Plausi-Check bestätigt, dass die Einheit der Leistung P [kg m²/ s³] ist).

| | | |
|---|---|---|
| **m** | **[kg]** | **Masse** |
| **$\dot{m}$** | **[kg/s]** | **Massenstrom** |
| $\rho$ | **[kg/m³]** | **Dichte** |
| **A** | **[m²]** | **Fläche** |
| **v** | **[m/s]** | **Geschwindigkeit** |
| **F** | **[ N ], [m kg/s²]** | **Kraft** |
| **E** | **[ J ], [m² kg/s²]** | **Energie** |
| **P** | **[ W ],[m²kg/s³]** | **Leistung** |
| $\eta$ | **[-]** | **Wirkungsgrad** |
| **cp** | **[-]** | **Leistungsbeiwert** |

$$P_{entkoppelt} = \frac{1}{2} \rho A v^3 c_p$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit | $A_{Korridor}$ | 1 | [m²] |
| | $\rho_{Luft}$ | 1.2 | [kg/m³] |
| | cp | 0.5 | [-] |

$$\mathbf{P\ [W] = 0.3\ [kg/m]\ v^3\ [m/s]^3}$$

**ideal aus Luftströmung entkoppelbare Leistung pro Quadratmeter**

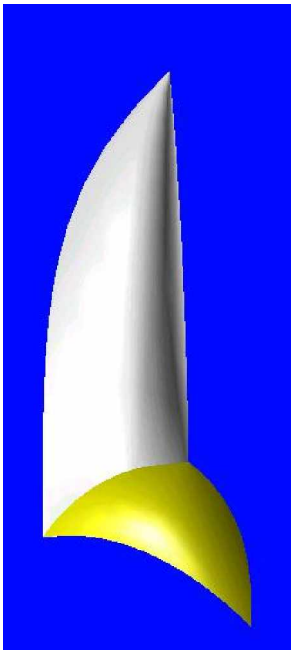
**(6)**

Wir Segler denken ja gerne in Beaufort, segeln aber nach dem scheinbaren Wind. Die beigefügte Tabelle hat daher eher Unterhaltungswert.

| Beaufort<br>Bf [-] | Geschwindigkeit<br>V [m/s] | entkoppelbare Leistung<br>P [W / m²] |
|---|---|---|
| **1** | **bis 1.5** | **1** |
| **2** | **bis 3.3** | **10.8** |
| **3** | **bis 5.4** | **47.2** |
| **4** | **bis 8.0** | **153.6** |
| **5** | **bis 10.7** | **367.5** |
| **6** | **bis 13.8** | **788.4** |

*Beispiel: Eine Laserjolle mit 7 [m²] Segelfläche segelt mit einer Bootsgeschwindigkeit von 7 [m/s] bei 4 Bf mit einem scheinbaren Wind von etwa 9 [m/s]. Die entkoppelbare Leistung beträgt dann P = 1530 [W]. Bei einer Bootsgeschwindigkeit von 7 [m/s] erkalten wir eine Vortriebkraft von Fv = 218 [N] und damit eine Segelkraft von etwa Fs = 300 [N]. (Modellannahme: Fs² = (Fv² + Fq²)). Das stimmt größenordnungsmäßig mit den gemessenen Werten für die Finn-Jolle von Fs = 254 [N]bei ähnlichen Verhältnissen überein* [MAR].

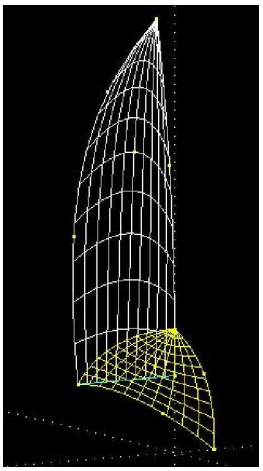
Zugegeben, die Handrechnung zur theoretischen Leistungsentnahme wird wissenschaftlichen Ansprüchen nicht gerecht, dient sie doch nur zu einer groben Abschätzung der Größenordnungen den energetischen Geschehens um das Modelsystem Segelboot. Für mich persönlich war es ein gutes Motiv, diesen Aufsatz zu schreiben, als ich sah, dass ein 1.2 [m²] kleines Bodeneffektsegel am Wind etwa den gleichen Leistungseintrag besitzt, wie ein 18 [m²] großer Spinnaker vor dem Wind. Wenn man also ein Bodeneffektsegel am Wind bis hart am Wind fährt, ist die Leistungsaufnahme recht hoch. Auf diesen Kursen ist auch das Krängen nach Lee ein Problem. Es könnte sich also lohnen.
*Holen wir nun (ganz kurz nur) die hässliche „Luftpolster-Theorie“ aus der Schublade: Angenommen, ich platzierte in Lee des Segels ein Luftpolster, mit dem sich das Schiff gegen das Wasser abstützte, ich würde – mühelos, ganz von allein – aufrecht segeln.*



**Symmetrie.** Man sagte mir, die Trapezgerüste der Skiffboote würden ja auch wie Flügel wirken. Selbst wenn dem so wäre, ich halte davon nichts. Auch die Hydro-Foils der Tragflügelboote sind symmetrische Konstruktionen, aber sie arbeiten im Medium Wasser und die Richtung der Leistungsentkopplung fällt (fast) mit der Symmetrieachse des Fahrzeugs zusammen. Bei einem, die Windenergie nutzenden, Segel ist das anders. Hier schneiden sich die Richtungen der Ent- und Einkopplung in einem satten, nichtspitzen Winkel (mit dem Vorwindkurs als Ausnahme). Das hat den Nachteil, dass wir die Richtung der Energie umlenken müssen; es hat den Vorteil, dass „stabile“ Betriebspunkte existieren. Vergleichen Sie das vielleicht mit einem Fahrrad beim überqueren einer Straßenbahn-schiene im spitzen und dann im rechten Winkel.
Das hier vorgestellte Bodeneffektsegel (BoESe) soll also nicht mit dem Fahrtwind arbeiten, sondern mit dem scheinbaren Wind – es ist bezüglich der energetischen Beaufschlagung mit dem Hauptsegel getaktet. ( Das erspart uns in der Praxis eine Menge Ärger ).
In der Skizze sind die Lösungsräume für ein Bodeneffektsegel schematisch dargestellt. Der Darstellung liegt die Annahme zu Grunde, dass Bodeneffektsegel eine (bezüglich der Rumpfachse) asymmetrische Anordnung haben sollten.

**Lösungsraum.** Mit den einfachen Entwürfen beginnend erscheint mir natürlich der Lösungsraum um eine kat-getakelte Jolle sympathischer, als das von Schoten, Wanten und

Stagen durchsetzte Entwurfgebiet einer slupgetakelten Yacht. BoESe ist zunächst ein Experiment und als solches schon komplex genug. Wie heißt es so schön: “nimm zuerst ein kleines Boot!“

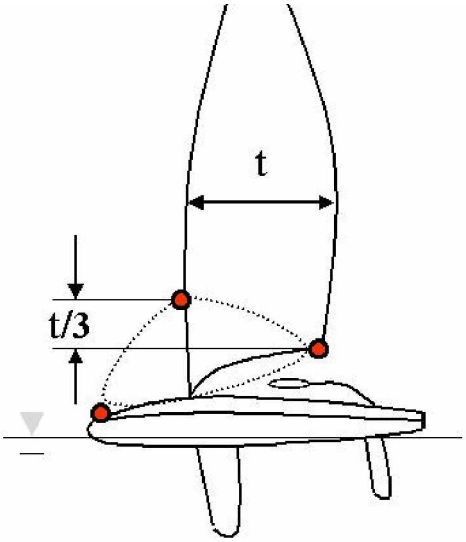


**Adaption.** Seit über 5000 Jahren segeln die Menschen über die Meere. Vom Prinzip hat sich eigentlich nicht viel geändert. (Ver-) setzte man einen „alten“ Phönizier auf einen 49er, Sie könnten schon nach der Mittagspause mit ihm um die Wette segeln. Im Yachtdesign ist man gut beraten, Visionen zu entwickeln und sie in etablierten Konzepten zu realisieren. Die Entwicklung des Neuen beginnt mit der Erkenntnis über das Alte.

In diesem Sinne adaptiert BoESe ein etabliertes Konzept. Das hier dargestellte Bodeneffektsegel für eine Kat-Jolle ist im Grunde ein sehr tief angeschlagener und nach Lee ausgebaumter Gennaker. Wie dieser wird es am Wind gefahren.

**Vorversuche**. Die ersten Experimente am Windkanal wurden mit Flügelmodellen aus Blech, Pappe, und plastizierbaren Kunststoffen durchgeführt. Die Versuche hatten anfangs die „räumliche Deformation“ des Randwirbels am Unterliek zum Ziel.

**Blech ist geduldig**. Die Arbeiten Currys im Hinterkopf, sollte der Einfluss einer halbrunden, düsenförmigen Röhre auf die Gestalt des Randwirbel mit einfachen Mitteln untersucht werden. Erst später stellte sich die Frage, wie man eine derartige „unten offene Segeltasche“ vernünftigerweise ausbaumt, anschlägt und schotet.

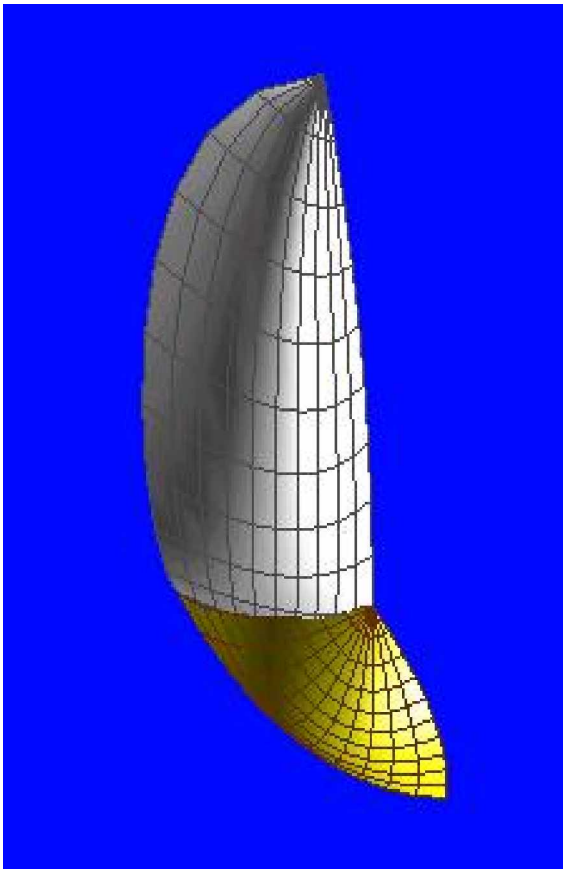



Ist erst einmal die Topologie der Gestalt einer solchen Segeltasche festgelegt, sind alle! geometrischen Funktionsgrößen eine Variation der Koordinaten. Oder um mit Begriffen Phylogenetischen Algorithmen zu sprechen: das Bodeneffektsegel ist eine affine Mutante einer offenen Segeltasche.

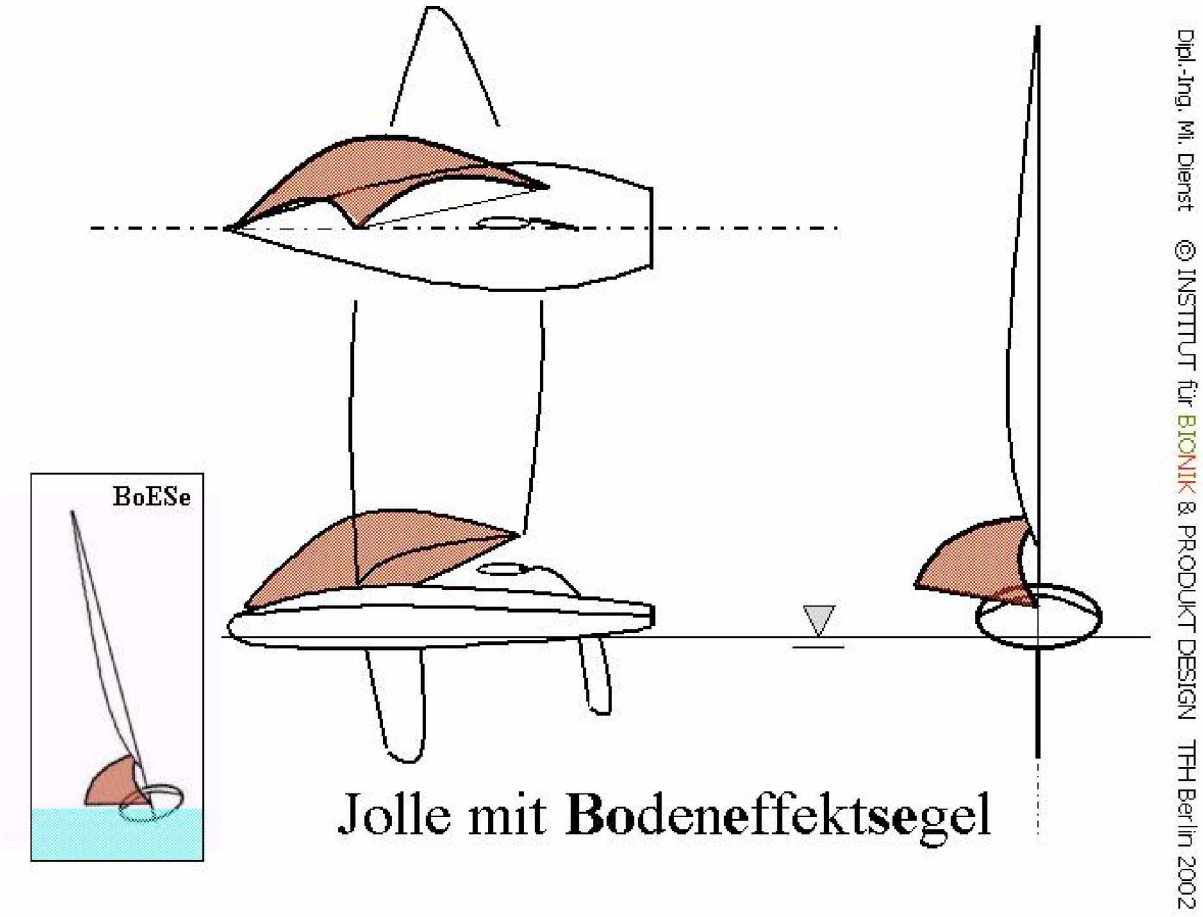
Über die ersten praktischen Versuche mit einem Laser möchte ich an dieser Stelle nicht berichten (ein Elend), wohl aber über die Erfahrungen und Konsequenzen für eine weiterführende Studie zum Bodeneffektsegel BoESe.

**Das Konzept.** Der Kopf des Segels wird am Baum angeschlagen. (etwa 1/4 bis 1/3 maximaler Segeltiefe). Bei einem kat-getakelten Boot erfordert dies einen fixierbaren Mastbügel oder eine Modifikation (Langloch) in der Masttasche des Großsegels. Der Segelhals wird vorn am Bug befestigt (unser Laser hat dort einen Griff), der Achterholer läuft über einen Block oder eine Ringöse an der Nock des Großbaumes. Damit liegt die Topologie des Segels fest.

**Stress.** Es stellte sich schnell heraus, dass das Segel nicht selbstständig steht und leewärtig (an irgend einem Punkt des Unterlieks) ausgebaumt werden muss, was das gesamte Arrangement verkompliziert. Wird das BoESe über die Nock geschotet, was bezüglich der Deformation des Randwirbels anzustreben ist, erweist sich ein konventioneller Spinnaker-baum als heimtückischer Hebel, der darüber hinaus das Segel zu einem eckigen Dach verformt. Die Schotführung über den Baum ist unglücklich und eine Wende wird zu einer nicht immer beherrschbaren Kunst. Über die Wirkungsweise des Segels, das sei hier zugegeben, kann ich noch nichts sagen. Soweit zum Status quo.



Für das Bodeneffektsegel der nächsten Generation ist ein in einer Lattentasche geführtes elastisches Rundrohr (D=12[mm]) vorgesehen, dessen Steifigkeit durch eingelegte Carbonstäbe variiert werden kann. Nach dem Prinzip einer Power-Latte erhält das BoESe seine Form und wird über ein kleines Zugsystem am Mast sogar trimmbar. Von der Segellatte erwarte ich, dass sie Änderungen der Segelstellung elastisch beantwortet. Der Entwurf sieht vor, dass die Lattetasche vor dem Unterliek endet, so dass sich im Betrieb eine Lippe ausbildet. Die Frage nach dem zu verwendenden Tuch ist derzeit offen.




Bodeneffektsegeln als Stil ist seit langem bekannt; in der Natur und auch im Segelsport. Bodeneffektsegel als Konstruktionen sind neu. Leicht wird ein Entwurf zur Kuriosität, Effekte in ihrer Wirkung überschätzt, die technologische Machbarkeit nicht ausreichend hinterfragt. Aufgabe der Bionik ist es, Effekte der belebten Natur zu entschlüsseln, Wirkgefüge darzulegen und daraus technische Visionen zu entwickeln. Das macht angreifbar. Ziel dieses Aufsatzes soll sein, einen Beitrag zu leisten, das Phänomen Bodeneffekt zu erklären, die Diskussion darum zu beleben und den Experten, den Rigg-Konstrukteur, den Yachtdesigner zu ermutigen, einen Sinn für die wunderbaren Lösungen der Natur zu entwickeln.
Segelnde Bodeneffektfahrzeuge werden kommen; sie sind eigentlich schon da.

Merkwürdigerweise wechseln die Ringelgänse seit ein paar Jahren nicht mehr in ihr Winterquartier. Und solange unser Geländewart gegen Maulwürfe kämpft, wird ihn vielleicht das grün-weiche „Gänseproblem“ nicht weiter beschäftigen. Gute Aussichten also für einen Bioniker, auch in der segelfreien Zeit das biologische System zu beobachten, von der Natur zu lernen.

Bibliographie


[AIAA] Bechert, D.W. (1997) Biological Surfaces and their Technological Application. 28th AIAA Fluid Dynamics Conference.

[BAP] Bappert, R. u.A, (1999) Bionik, Zukunftstechnik lernt von der Natur. SiemensForum München/Berlin und Landesmuseum für Technik und Arbeit in Mannheim

[BOH] Bohl, W.: Technische Strömungslehre. Würzburg

[BRY] Bryan, T., (ed.): Fluid Motion Memoins, Incompressible Aerodynamics. Oxford: University Press.1960

[CUR] Curry, M.: Regatta-Segeln. 1994, Bielefeld: Delius Klasing Verlag

[DEN] Denk, R. Handbuch Segeln. München, Wien, Zürich BLV Verlagsges. 1991

[GRE] Greguss, F. (1985) Patente der Natur, Verlag Neues Leben, Berlin.

[HEY] Heynert, H. (1976) Grundlagen der Bionik, VEB Verlag, Berlin.

[HTL] Hertel, H.: Struktur-Form-Bewegung. Mainz: Krauskopf 1963

[KLW] Klausewitz, W.: Fliegende Tiere des Wassers. In: Natur und Museum: Bericht der Senkenbergischen Naturforschenden Ges. Band 101. Frankfurt a. M. 1971

[KRE] Coineau, Y., Kresling, B. (1987) Erfindungen der Natur, Tessloff Verlag

[MAR] Marchaj, C. A. (1997) Die Aerodynamik der Segel. Bielefeld: Delius Klasing.

[REC] Rechenberg,-I.: Evolutionsstrategie. Stuttgart-Bad Cannstatt: Friedrich Frommann Verlag 1973

[TWI] Twiname, E. Auf Sieg segeln. (1996) Delius Klasing Verlag Bielefeld

[WEB] Webb, P.W.: Hydrodynamics and Energetics of FishPropulsion. Ottawa 1975

[WUN] Wunderlich, K, Gloede,W (1977) Natur als Konstrukteur. Edition Leipzig

[PÖP] Pöppe, Ch. (1998) Das Überschallschiff. in Spektrum der Wissenschaft 08.98