

# 6

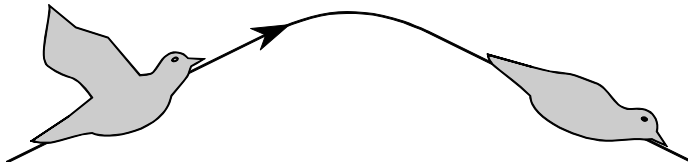
Vorlesung Bionik I im Winter 00/01 - Ingo Rechenberg, TU Berlin

## Vögel und Delfine im Auf und Ab Optimierung in der Natur (II)

---

### *Fliegen wie „Zappelphilipp“*

Wer einmal eine Meise, einen Sperling oder eine Lerche beim Hin- und Herfliegen genau beobachtet, stellt überrascht fest, dass diese Kleinvögel scheinbar recht unvernünftig fliegen. Auch längere Flugstrecken werden keinesfalls im kontinuierlichen Schwingenflug zurückgelegt. Vielmehr fliegen diese Kleinvögel in einer hektischen Girlandenbahn bergauf und bergab (**Bild 6-1**). Der Vogel schlägt seine Flügel und steigt, und schon – als wenn müde geworden – lässt er sich wieder fallen.



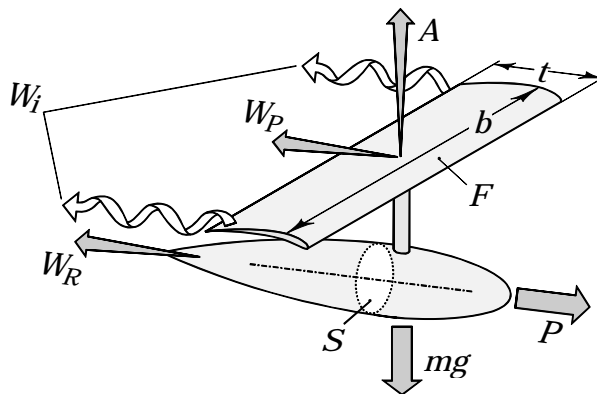
**Bild 6-1:**  
*Flug einer  
Meise.*

Sieht man genau hin, so zeigt sich, dass der Vogel während der Zeit des Fallenlassens seine Flügel dicht an den Körper anlegt. Der Biologe, inspiriert durch das Bild des Nur-Rumpf-Fliegens, spricht vom Bolzenflug. Der Luftwiderstand des Vogels ist während dieser Flugphase natürlich besonders gering. Vielleicht, so könnte man spekulieren, ist diese Flugtaktik gar nicht so schlecht und hilft Energie sparen. Vielleicht sollte zukünftig ein Atlantiküberflug – mögen die Passagiere noch so sehr leiden – in Girlandenform erfolgen. Wir wollen versuchen, das Verfahren des intermittierenden Vogelfluges mathematisch zu analysieren:

### **Widerstandsanalyse des Vogels**

Am Anfang steht die Aufgabe, die aerodynamischen Kräfte am fliegenden Vogel aufzulisten. Auf den Vogel werden die Regeln des Flugzeugentwurfs angewendet. Das heißt, auf die Eigenart des Schwingenflugs wird nicht eingegangen. Der Schwingenantrieb sei dem Propeller- Düsen- oder Raketenantrieb gleichgesetzt. Wir konstruieren einen Modellvogel, bestehend aus einem separaten Rumpf, einem separaten Flügel und einem separaten Antrieb (**Bild 6-2**). Interferenzen mögen nicht auftreten. Wir zählen die energieverzehrenden Widerstände auf:

- Form- und Reibungswiderstand des Rumpfes  $W_R$ .
- Form- und Reibungswiderstand des Flügelprofils  $W_P$ .
- Induzierter (Randwirbel-)Widerstand des Flügels  $W_i$ .



**Bild 6-2:**

*Kräfte am  
Modell-Vogel.*

Wir wollen die Kräfte tabellieren. Nach den klassischen Regeln der Aerodynamik gilt:

$$A = c_a F \frac{\rho}{2} v^2$$

$$c_a = \text{Flügel-Auftriebsbeiwert}$$

$$W_P = c_{wP} F \frac{\rho}{2} v^2$$

$$c_{wP} = \text{Profil-Widerstandsbeiwert}$$

$$W_i = c_{wi} F \frac{\rho}{2} v^2$$

$$c_{wi} = \frac{c_a^2}{\pi \Lambda} \quad \text{mit} \quad \Lambda = \frac{b^2}{F}$$

$$W_R = c_{wR} S \frac{\rho}{2} v^2$$

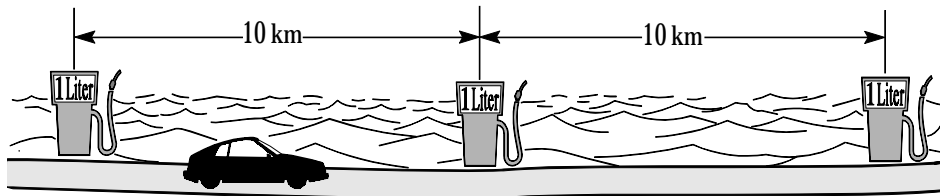
$$c_{wR} = \text{Rumpf-Widerstandsbeiwert}$$

### **Energie-Hamstern - eine technische Analogie**

Was gilt es zu minimieren? Eilfertig mögen viele auf die Summe der Widerstände setzen.

$$W_P + W_R + W_i = (c_{wP}F + c_{wi}F + c_{wR}S) \frac{\rho}{2} v^2.$$

Die mathematische Diskussion der Aufgabe  $\min \{W_P + W_R + W_i\}$  führt jedoch zu der unsinnigen Lösung:  $F \rightarrow \infty$  und  $v \rightarrow 0$ . Mit anderen Worten: Der „stehende Flug“ ist widerstandsminimal! Es erinnert an die „Rufer“ nach dem stehenden Autoverkehr als unfallminimale Lösung. Wir müssen die Aufgabe genauer stellen. Bleiben wir beim Auto: Der Ortswechsel zahlt sich aus, durch Gewinn an Freude oder Gewinn an Geld. Wir betrachten den Gewinn an Geld und konstruieren folgendes Beispiel: Gegeben sei eine sehr lange Autostraße. Alle 10 Kilometer befindet sich auf dieser Straße eine Tanksäule, an der kostenlos 1 Liter Benzin gezapft werden darf (**Bild 6-3**). Ein Autofahrer möchte auf dieser Straße billig seinen Tank füllen. Am ersten Tag fährt er mit 100 km/h in 10 Stunden 100 Zapfsäulen ab. Er hamstert so 100 Liter Benzin. Da sein Auto 5 l/100 km Benzin verbraucht, und er 1000 km gefahren ist, verbleiben 50 Liter im Tank. Am nächsten Tag rast unser Autofahrer mit 200 km/h in 10 Stunden 2000 km die Tanksäulenstraße entlang. Damit kommt er an 200 Zapfstellen vorbei und kann 200 Liter tanken. Doch sein Auto verbraucht nun doppelt so viel (10 l/100km), was 200 l auf 2000 km ergibt. Es verbleiben 0 Liter im Tank. Aber das heißt nicht, je langsamer je besser. Denn am dritten Tag bummelt unser Autofahrer mit 50 km/h 50 Zapfsäulen ab. Er schafft in 10 Stunden 500 km und sammelt 50 l. Zieht man den Verbrauch ab, ergibt sich in jedem Fall weniger als am ersten Tag.



**Bild 6-3:** Benzin-Hamstern auf der Zapfstraße.

Die Benzin-Gewinn-Formel für unseren Autofahrer lautet:

$$\text{Gewinn}[\ell/\text{Tag}] = \{ \text{Tanken}[\ell/\text{km}] - \text{Verbrauch}[\ell/\text{km}] \} \cdot v[\text{km}/\text{Tag}].$$

Ich sehe eine Parallele zwischen dem Autofahrer und einem Vogel. Dem Vogel bringt der fliegende Ortswechsel Nahrung ein. Eingesammelte Nahrung ist Energie, die dem Vogel aber nicht voll zugute kommt. Ein Teil wird im Fluge verbraucht, wenn der Vogel von der Futterstelle A zur Futterstelle B wechselt. Die Energie-Gewinn-Formel für den Vogel lautet:

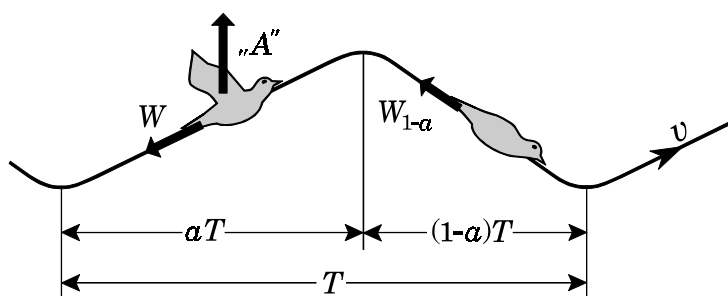
$$\text{Gewinn}[kJ/\text{Tag}] = \{ \text{Nahrung}[kJ/\text{km}] - \text{Flugarbeit}[kJ/\text{km}] \} \cdot v[\text{km}/\text{Tag}].$$

### **Optimale periodische Energieaufnahme**

Es sei  $N$  die Nahrungsenergie, die der Vogel pro km Flugstrecke sammelt. Sind  $W$  der Flugwiderstand und  $s$  der zurückgelegte Weg des Vogels, dann bestimmt sich die Flugarbeit zu  $W \cdot s$ . Aber für die Flugarbeit pro Wegeinheit ergibt sich wieder  $W$ . Wir erhalten für den Energie-Gewinn  $Q$  pro Zeiteinheit die Optimierungsformel:

$$Q = (N - W) v \rightarrow \text{Max.}$$

Jetzt muss  $W$  durch die Anteile  $W_P$ ,  $W_R$ ,  $W_I$  ersetzt werden. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass unser Vogel die Methode des Girlandenfluges anwendet.



**Bild 6-4:**

*Aerodynamische Kräfte im Girlandenflug.*

Es sei  $T$  die Schwingungsweite der Girlandenbahn. Während des Zeitanteils  $aT$  schlägt der Vogel seine Flügel und steigt nach oben. Und

während der restlichen Zeit  $(1-a)T$  legt der Vogel seine Flügel an den Rumpf an und fällt nach unten. Damit der Höhenverlust des freien Falls wieder rückgängig gemacht wird, die Flugbahn also im Mittel waagrecht bleibt, muss während des Flügelschlagens eine Auftriebskraft  $A = mg/a$  erzeugt werden. Diese Beziehung lässt sich leicht aus den Fallgesetzen ableiten. Die Kontrolle der Formel zeigt, dass für  $a = 1$  der Auftrieb erwartungsgemäß gleich der Schwerkraft ist ( $A = mg$ ). Und für  $a = 0,5$  muss der Auftrieb während des Flügelschlagens gerade doppelt so hoch sein ( $A = 2mg$ ). Auch das leuchtet ein. Denn für die ersten 50% der Zeit zieht die Schwerkraft  $mg$  den Vogel nach unten. Dann muss für die restlichen 50% der Zeit die Auftriebskraft zum einen die Schwerkraft  $mg$  kompensieren und zum anderen mit dem Überschuss  $mg$  den Vogels heben.

Ein echter Vogel fliegt deutlich flacher bergauf und bergab als es im **Bild 6-4** illustriert wird. In der Näherungsrechnung möge deshalb der Auftrieb immer in die Lotrechte weisen. (Definitionsgemäß steht der Auftrieb eigentlich senkrecht zur Anströmung). Ferner sei angenommen, dass sich die Geschwindigkeit  $v$  vom Gipfel zum Tal nicht ändert. Es gilt nun, die Widerstandskräfte zu ermitteln, die auf den Vogel während der beiden Flugphasen einwirken. Während der Steigphase  $aT$  erzeugen Rumpf und Flügel Widerstand. Der Flügelwiderstand wiederum setzt sich aus dem Profilwiderstand und dem Randwiderstand zusammen.

$$W_a = (c_{wR}S + c_{wP}F + c_{wi}F) \frac{\rho}{2} v^2 = (c_{wR}S + c_{wP}F) \frac{\rho}{2} v^2 + \frac{2(mg)^2}{a^2 F \pi \Lambda \rho v^2}.$$

In der Beziehung  $c_{wi} = c_a^2 / (\pi \Lambda)$  wurde  $c_a$  durch das Gewicht  $mg$  ersetzt. Betrachten wir nun den Sturzflug. Hier legt der Vogel seine Flügel an den Rumpf an, so dass nur noch Rumpfwiderstand zu verzeichnen ist. Zur Vereinfachung der Rechnung sei angenommen, dass sich durch das Flügelanlegen Form und Querschnitt des Rumpfes nicht ändern. Der Widerstand beträgt somit während der Fallzeit  $(1-a)T$ :

$$W_{1-a} = c_{wR}S \frac{\rho}{2} v^2.$$

Der Widerstand werde über die gesamte Schwingung  $T$  (gewichtet) gemittelt:

$$\bar{W} = aW_a + (1-a)W_{1-a} = aFc_{wP} \frac{\rho}{2} v^2 + \frac{2(mg)^2}{aF\pi\Lambda\rho v^2} + c_{wR}S \frac{\rho}{2} v^2 .$$

Wir setzen  $\bar{W}$  in die Optimierungsformel ein:

$$Q = (N - \bar{W}) v \rightarrow \text{Max} .$$

Welche Größen sind für die Optimierung verfügbar? Es sind dies die Geschwindigkeit  $v$ , die Flügelfläche  $F$  und der Intermittenzfaktor  $a$ . Da  $a$  immer in der multiplikativen Verknüpfung mit  $F$  auftritt, führen wir die neue Variable  $u = aF$  ein. Nach den Regeln der Extremwertbestimmung werden die ersten Ableitungen gleich Null gesetzt:

$$\frac{\partial Q}{\partial u} = \dots = 0 , \quad \frac{\partial Q}{\partial v} = \dots = 0 .$$

Was folgt ist eine langwierige Rechnung, die schließlich zu den Formeln führt:

$$(aF)_{opt} = \frac{1}{\Theta - 1} \cdot \frac{3 c_{wR} S}{2 c_{wP}} , \quad \text{und} \quad v_{opt}^2 = \frac{4mg\sqrt{c_{wP}}}{3 c_{wR} S \rho \sqrt{\pi} \Lambda} (\Theta - 1)$$

$$\text{mit der abgekürzten Größe} \quad \Theta = \frac{N}{2mg\sqrt{c_{wP}/(\pi\Lambda)}}$$

Die Größe  $\Theta$  lässt sich in Beziehung bringen mit dem gesamten Flügelwiderstand während der Periode  $T$ . Es gilt im Optimalpunkt:

$$aW_{Flügel} = (c_{wP} + c_{wi}) \frac{\rho}{2} v_{opt}^2 (aF)_{opt} = \dots = 2mg\sqrt{c_{wP}/(\pi\Lambda)} .$$

Damit lässt sich die Kenngröße  $\Theta$  physikalisch interpretieren: Theta gibt den tragflügelbezogenen Energieprofit an:

$$\Theta = \frac{N}{aW_{Flügel}} = \frac{\text{Energie-Einnahmen (Nahrung)}}{\text{Energie-Ausgaben (Flügelwiderstand)}} .$$

Noch ist das Ziel nicht erreicht. Es gilt, den optimalen Intermitenzfaktor zu bestimmen. Die Formel für  $(aF)_{\text{opt}}$  liefert deshalb ein  $a_{\text{opt}}$ , weil über die Tragflügelfläche  $F$  nicht frei verfügt werden kann. Es ist die Start- und Landebedingung, die ein so großes  $F$  erfordert, dass der Optimalwert  $(aF)_{\text{opt}}$  nur durch ein  $a < 1$  erreicht werden kann.

Bei der theoretischen Diskussion des Girlandenfluges sollte man zweckmäßig den Weg der Evolution nachgehen: Unser Modellvogel muss erst einmal vom Boden wegkommen, um zu fliegen. Es gibt eine Geschwindigkeit  $v_0$ , bei der unser Vogel laufend und flügelschlagend abheben muss. Die Abhebe-Fluggeschwindigkeit  $v_0$  berechnet sich nach der Formel:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2mg}{\rho c_a F}}.$$

Gewiss soll die Flügelfläche klein gehalten werden, denn sie kostet etwas. Deshalb wird der Vogel (und auch das Flugzeug) beim Start den Flügel so weit anstellen, dass sein Auftriebsbeiwert das Maximum erreicht. Wir erhalten dann als notwendige (minimale) Flügelfläche:

$$F^* = \frac{2mg}{\rho c_{a\text{max}} v_0^2}.$$

Damit berechnet sich  $a_{\text{opt}}$  zu:

$$a_{\text{opt}} = \frac{1}{\Theta - 1} \cdot \frac{3 c_{wR} S}{2 c_{wP} F^*}.$$

Zurück zu unserem Wert Theta. Für den Vogel muß sich das Fliegen energetisch rechnen. Theta gleich Eins reicht nicht. Die Energie-Einnahmen (Wirkungsgrad mit eingerechnet) würden bereits durch den Widerstand des in der Zeit  $a$  ausgefahrenen Tragflügels kompensiert werden. Und der Rumpfwiderstand ließe die Energiebilanz ins Minus rutschen. Wir wollen annehmen, dass der über die gesamte Schwingung ( $T = 1$ ) wirksame Rumpfwiderstand mindestens so groß ist wie der halbe Gesamtwiderstand des Flügels ( $W_R \geq W_P = W_j$ ). Fliegen lohnt also sich nur, wenn  $\Theta \geq 1,5$  ist. Diese Behauptung erscheint sinnvoll, denn der Vogel muss Energie auf Vorrat tanken.

Wir wollen Zahlen sehen. Gegeben sei eine ganz alltägliche Meise ( $c_{wP} = 0,05$ ,  $c_{wR} = 0,15$ ,  $FS = 0,1$ ). Wir berechnen für verschiedene  $\Theta$ -Werte die optimalen Intermittenzfaktoren:

|                |   |                  |
|----------------|---|------------------|
| $\Theta = 1,5$ | ☞ | $a_{opt} = 0,90$ |
| $\Theta = 2,0$ | ☞ | $a_{opt} = 0,45$ |
| $\Theta = 3,0$ | ☞ | $a_{opt} = 0,23$ |
| $\Theta = 4,0$ | ☞ | $a_{opt} = 0,15$ |
| $\Theta = 5,0$ | ☞ | $a_{opt} = 0,12$ |

In lateinischer Sprache würde EUKLID zum Schluss schreiben: q. e. d. (quod erat demonstrandum). Für uns heißt das Ende des Beweises: ***Der Girlandenflug ist eine Optimallösung der Evolution.***

### ***Girlandenflieger, Flugzeug der Zukunft?***

Der Bioniker denkt an die technische Anwendung. Denn was für den Vogel als Nahrungs-Gewinn zählt, das bedeutet für die Fluggesellschaft der Geld-Erlös. Für sie gilt es, den

$$\text{Erlös}[\text{€}/\text{Tag}] = \{\text{Passagierpreis}[\text{€}/\text{km}] - \text{Flugkosten}[\text{€}/\text{km}]\} \cdot v[\text{km}/\text{Tag}]$$

zu maximieren. Das Optimierungsziel der Vogelflug-Evolution deckt sich mit dem Optimierungsziel der Fluggesellschaft. Dennoch müssen wir zukünftig nicht alle in Girlandenart über den Atlantik fliegen. Denn die Analyse des Problems ohne intermittierende Flugtaktik zeigt: Maßgeblich ist, die Flügelfläche so auszulegen, dass bei der geflogenen Geschwindigkeit der Profilwiderstand des Flügels  $W_P$  gleich dem Randwiderstand  $W_i$  wird. Hoher Erlös erfordert hohe Fluggeschwindigkeit  $v$ . Ist aber  $v$  groß, wird (zur Erfüllung von  $W_P = W_i$ ) die Flügelfläche  $F$  klein. Das Ergebnis ist, dass das Flugzeug nicht in die Luft bzw. nicht heil herunter käme. Der Intermittenzfaktor  $a$  ist es, der beim Vogel aus einer großen Flügelfläche während des Fliegens scheinbar eine kleine macht. Aber der Flugzeugkonstrukteur löst das Problem der Flächenverkleinerung im Flug auf andere Art. Er vermindert nach dem Starten die Flügelfläche, indem er Landeklappen einfährt. So einfach ist das. Ein Musterbeispiel dafür, dass evolutionäre Lösungen nicht bloß abgekupfert werden sollten.



Es sei angemerkt, dass die Vogel-Evolution diese „Patentlösung“ auch entwickelt hat. Ein Vogel schiebt seine Flügel-Federn auseinander, wenn er startet oder landet. Ferner wird er, wie das Flugzeug, zugleich die Profilwölbung erhöhen, um ein hohes  $c_{amax}$  zu erzielen. Aber diese Maßnahmen reichen wohl nicht aus, um mit der regulären (verkleinerten) Fläche optimal schnell zu fliegen. Deshalb hat die biologische Evolution zusätzlich den Girlandenflug erfunden.

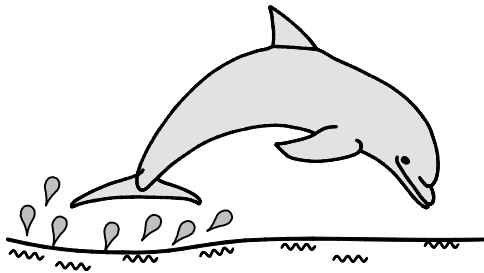
Das Beispiel zeigt, wie wichtig es ist, dass der Bioniker die biologischen Phänomene versteht, die er kopieren möchte. Der Naturschwärmer, der das schwingende Auf und Ab des Kleinvögel-Fluges als ein „sich Einwiegen in den Biorhythmus der Natur“ deutet, würde das Girlanden-Flugzeug allen Ernstes bauen. Wer aber das hinter dem Girlandenflug steckende Prinzip erkennt, entwirft ein Flugzeug mit Start- und Landeklappen. Das ist die technisch einfachere Lösung. Schließlich wird die Austauschbarkeit von  $a$  und  $F$  mathematisch dadurch belegt, dass diese Größen in den Optimierungsgleichungen stets im Produkt  $a \cdot F$  verbunden sind.

Zugegeben, wir mussten lange rechnen, um den Bolzenflug der Vögel zu analysieren. Das Problem wäre bedeutend einfacher gewesen, wenn nicht so nachdrücklich auch nach der optimalen Geschwindigkeit gefragt worden wäre. Angenommen, die Geschwindigkeit werde durch eine „höhere Instanz“ vorgegeben. Mit  $a_{opt}$  fliegen heißt dann, bei der gegebenen Geschwindigkeit mit minimalem Widerstand zu fliegen. Und mit minimalem Widerstand fliegen bedeutet, bei vorgegebener Flugarbeit  $W_s$  die größte Flugstrecke  $s$  herauszuholen. — So, als sei die Geschwindigkeit von einer „höheren Instanz“ vorgegeben, wollen wir im folgenden Abschnitt über den Schwimmstil der Delfine spekulieren.

### ***Schwimm-Springen der Delfine***

Das Biologie-Regal jeder größerer Buchhandlung ist gefüllt mit Bildbänden über Wale und Delfine. Außen auf dem Buchumschlag sehen wir den springenden Delfin (**Bild 6-4**). Und drinnen finden wir dutzendweise Photos von Delfinen, wie sie in Reih und Glied bogenförmig über die Wasseroberfläche fliegen. Die Meinungen der Biologen

über den Sinn dieses Schwimmstils gehen auseinander. Die einen meinen, hier sei spielerische Lebensfreude am Wirken. Andere sagen, dass das Springen Energie spare. Wer selbst einmal schwimmspringende Delfine



**Bild 6-4:**

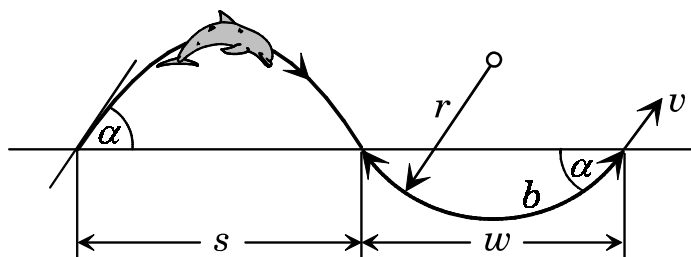
*Sprung-  
Schwimmstil  
eines Delfins.*

hat beobachten können, wie sie sich Kilometer um Kilometer zielstrebig in diesem Stil fortbewegen, kann nicht recht an ein Spielen glauben. Wir wollen das Springen der Delfine mathematisch analysieren:

Wir werfen einen Stein. Im Physikbuch findet sich die Formel für die Weite  $l$  des Wurfs in Abhängigkeit vom Abwurfwinkel  $\alpha$ .

$$l = \frac{v^2}{g} \sin(2\alpha).$$

Ein Delfin, der mit der Geschwindigkeit  $v$  unter dem Winkel  $\alpha$  aus dem Wasser schießt, wird die Strecke  $l$  praktisch widerstandslos überbrücken. Er taucht schließlich mit dem (komplementären) Winkel  $(-\alpha)$  in die Meeresoberfläche ein. Wieder im Wasser muss der Delfin seine Geschwindigkeit  $v$  halten. Es gilt, zum erneuten Sprung den Eintauchwinkel  $(-\alpha)$  auf den ursprünglicher Absprungwinkel  $\alpha$  zurückzudrehen. Wir wollen annehmen, dass die Unterwasser-Wendung in einem Kreisbogen der Länge  $b$  erfolgt.



**Bild 6-5:**

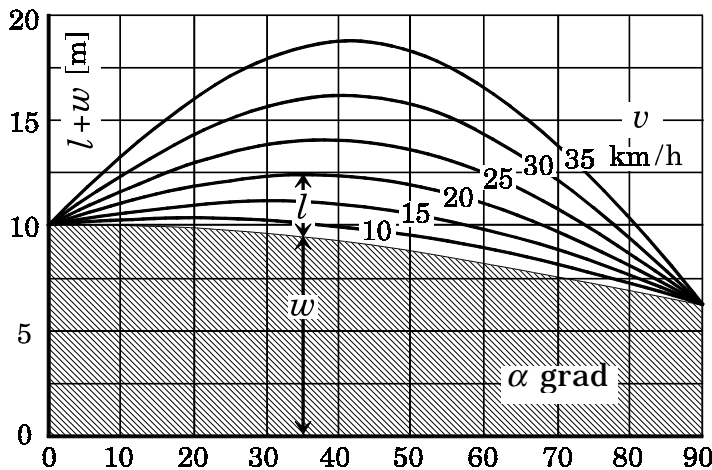
*Über- und Unter-  
wasserbahn eines  
Delfins.*

Man beachte, dass auch der Unterwasser-Kreisbogen die Wasseroberfläche unter dem Winkel  $\alpha$  schneidet! Dies bedeutet, dass der Bogen  $b$  den Bogenwinkel  $2\alpha$  bildet. Wir wollen die recht weitgehende Annahme machen, dass der Delfin seinen Unterwasser-Schwimmbogen  $b = 2\alpha r$  stets gleich lang hält. Der Weg  $b$  sei notwendig, um durch Flossenpropulsion Geschwindigkeit aufzuholen. Wir erhalten mit  $w/2 = r \sin \alpha = b/(2\alpha) \cdot \sin \alpha$  für die gesamte horizontal zurückgelegte Strecke:

$$l + w = \frac{v^2}{g} \sin(2\alpha) + \frac{b}{\alpha} \sin \alpha.$$

Es sei ein real erscheinendes Beispiel konstruiert: Der Unterwasser-Wendebogen eines Delfins betrage konstant  $b = 10$  Meter. Das heißt: Ist der Absprung- und Eintauchwinkel flach ( $\alpha \cong 0^\circ$ ), liegt der horizontal projizierte Unterwasserweg auch nahe bei 10 m. Sollte der Delfin dagegen senkrecht aus dem Wasser springen und wieder eintauchen ( $\alpha = 90^\circ$ ), bildet die 10 m lange Unterwasserkehre einen Halbkreis, und der horizontal zurückgelegte Weg verkürzt sich auf  $w = 10/(\pi/2) = 6,4$  m.

Aus „ballistischer“ Sicht ist  $\alpha = 45^\circ$  der am weitesten führende Absprungwinkel ( $l = l_{max}$ ). Es gilt jedoch,  $l + w$  zu maximieren; und die Unterwasserweite  $w$  hat sich für  $\alpha = 45^\circ$  auf 9,0 m verkürzt. Wie sieht der optimale Kompromiss aus? Wir stellen  $l + w$  in Abhängigkeit von  $\alpha$  in einem Diagramm dar (**Bild 6-6**):



**Bild 6-6:**

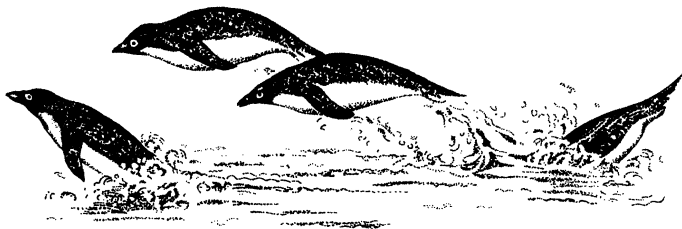
Weggewinn des Schwimmsprungstils der Delfine.

$w =$  Wasserweg  
 $l =$  Luftweg

Das Ergebnis in Worten: Angenommen, der Delfin schwimmt im Wasser mit 20 km/h. Er schwimmt geradlinig unter der Oberfläche 10 Meter weit ( $\alpha = 0^\circ$ ,  $w = b = 10$  m), wofür er die Schwimmarbeit  $W \cdot w$  ( $W =$  Widerstand) aufwendet. Wenn er nun seinen Stil ändert und einen 10-Meter-Bogen ( $b = 10$  m) schwimmt, um mit optimalem Winkel ( $\alpha = 35^\circ$ ) aus dem Meer aufzutauchen, bleibt die Schwimmarbeit  $W \cdot b$  dieselbe. Aber er kann nun 3,0 Meter im Flug durch die Luft zurücklegen. Zwar hat sich durch die gebogene Kehre der im Wasser zurückgelegte Weg auf 9,4 m verkürzt. Doch  $9,4 + 3,0$  ergeben 12,4 m; das sind 2,4 geschenkte Meter!

Allerdings, die Theorie besitzt eine Unbekannte. Der Delfin, der aus dem Meer herausschnellt und eintaucht, erzeugt Gischt und Wellen. Dies bedeutet zusätzlichen Widerstand, der nicht eingerechnet wurde. Es wäre gewagt, aus **Bild 6-6** abzulesen zu wollen, dass sich Schwimmspringen ab  $v = 15$  km/h lohnt. Ich würde eher schätzen, dass es sich ab 20 km/h rechnet, springend den 800 mal geringeren Widerstand im Medium Luft auszunutzen. Aber vielleicht ist die Evolution raffinierter als wir ahnen. Ein ins Wasser zurückgleitender Delfin schleppt einen Luftschleier mit sich. Aus schiffbautechnischen Untersuchungen ist bekannt, dass Luftblasen, in eine Grenzschicht injiziert, den hydrodynamischen Reibungswiderstand vermindern. Es wäre denkbar, dass dieser zusätzliche Effekt den Gischt- und Wellenwiderstand mehr als aufhebt.

Im Sportschwimmen bedeutet Delfinstil, sich wie ein Delfin auf- und abtauchend an der Wasseroberfläche fortzubewegen. Dieser Stil ist nach dem Brustkraul die zweitschnellste Schwimmart des Menschen. In der Natur sind es nicht nur die Delfine, die sich der gemischten Luft-Wasser-Fortbewegung bedienen. Kontinuierliches Schwimmspringen lässt sich auch bei den Pinguinen beobachten (**Bild 6-7**).

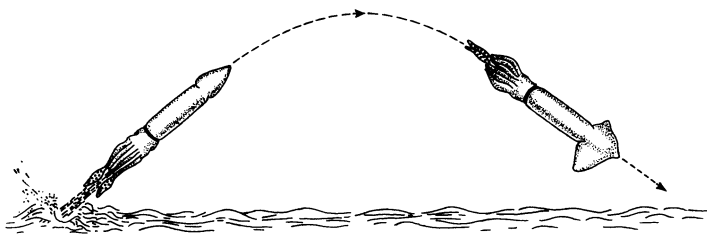


**Bild 6-7:**

*Pinguine im  
„Delfinstil“.*

Manta- und Adlerrochen machen hohe Sätze über das Wasser. Eher sporadisch springen kleinere Fische, z. B. Lachse und Forellen. Denn kleine Fische haben es schwer. Sie schwimmen zu langsam. Die Erdgravitation ist zu groß, um bei kleinerer Geschwindigkeit ballistisch Strecke zu gewinnen\*. Nur in Sondersituationen (z. B. Flucht), wenn unökonomisch schnell geschwommen werden muss, lohnt sich der zusätzliche Sprungfortschritt.

Zusammengefasst: Der Girlandenflug der Meise und das Schwimmspringen eines Delfins mögen dem Ingenieur als Kuriosum erscheinen. Er würde seine mobilen Systeme so nicht konstruieren. Erst die Optimierungsrechnung macht klar: Beide Male ist die exotische Fortbewegung Ergebnis der Optimierung der Evolution: **Das Auf und Ab der Fortbewegung spart Energie**. Selbst Tintenfische (**Bild 6-8**) bedienen sich dieser Technik.



**Bild 6-8:**  
Sprung  
eines  
Kalmars.

### **Die Flugbahn des Albatros**

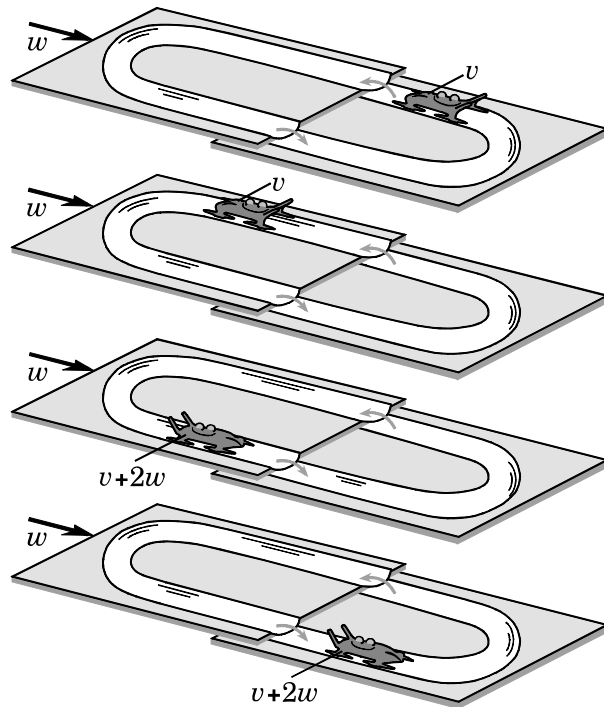
Es erinnert an ein Perpetuum mobile, wenn Vögel ohne Flügelschlag unentwegt dahingleiten ohne Höhe zu verlieren. Aber wir wissen, dass es aufsteigende Luftströme gibt, die Vögel und Segelflugpiloten gleichermaßen nutzen. Wind strömt einen Berghang hinauf; erwärmte Luft steigt als Thermik nach oben; und die Dichteschichtung der Atmosphäre führt hinter einem Bergmassiv zum auf und ab von „Schwere-

---

\* Bei Kleinfischen hat die Evolution den Tragflügel hinzuerfunden. Durch ausgebreitete, evolutiv vergrößerte Brustflossen, die der Aquarienfisch *Pantodon buchholzi* sogar aktiv bewegt, wird die ballistische Flugstrecke durch Auftrieb wirksam verlängert.

wellen“ des Windes. Wenn aber der Albatros flügellos stundenlang dicht über dem Meer seine Höhe hält, und das nachweislich ohne Aufwärtskomponente des Windes, erscheint dies rätselhaft. Segelfluggpiloten träumen davon, Gleiches zu vollbringen.

Welche mysteriöse Kraft hält den Albatros auf Höhe? Es war Lord RAYLEIGH, der bereits 1883 in der Zeitschrift *Nature* das Prinzip beschrieb. Und es war P. IDRAC, Professor an der École Polytechnique in Paris, der mit seiner Reise in das Südpolarmeer 1924 den Nachweis erbrachte: Albatrosse beziehen mittels einer raffinierten Flugbahn Energie aus dem Scherprofil des Windes, wie es sich nahe der Meeresoberfläche ausbildet. Um das Prinzip anschaulich zu machen, möchte ich ein Modell entwickeln, das zunächst mit dem Albatrosflug nichts zu tun hat. Gegeben seien zwei große Eisschollen, in die eine haarnadel-förmige Rinne eingelassen ist. In der Eisrinne kreise ein Bobschlitten. Wie im **Bild 6-9** zu sehen ist, gleitet die linke Eisscholle mit der Geschwindigkeit  $w$  der rechten (stehenden) Scholle entgegen. Der Bob fahre mit der Geschwindigkeit  $v$  von rechts nach links auf die bewegte Scholle zu und springe schließlich auf diese hinüber. Im reibungsfreien Idealfall behält der Bob für den bezugsfesten äußeren Beobachter seine Geschwindigkeit  $v$  bei. Ein Beobachter auf der bewegten Eisscholle, der sich mit der Geschwindigkeit  $w$  bewegt, sieht den Bob mit der Geschwindigkeit  $v+w$  von rechts nach links an sich vorbeifahren. Diese Geschwindigkeit bleibt nach dem Durchfahren der Haarnadelkurve für den bewegten Beobachter erhalten. Sie hat nur ihre Richtung gewechselt. Der Schlitten gleite nun wieder auf die feste Scholle hinüber. Was beobachten wir Außenstehende? – An uns zieht der Bob mit der Geschwindigkeit  $v+2w$  von links nach rechts vorbei. Und  $v+2w$  (von rechts nach links) ist auch seine Geschwindigkeit nach der  $180^\circ$ -Wende. Der Schlitten gewinnt pro Runde die Geschwindigkeit  $2w$ . Um den Vorgang am Laufen zu halten, möge die rechte Eisscholle sich im Wellengang des Meeres wiegen und gerade zurückgleiten, während der Bob auf der stehenden Scholle kurvt. Es ist also die  $90^\circ$ -Bobkurve auf der wiegend bewegten Eisscholle, die dem Bobschlitten jedes Mal beim Durchfahren einen „Kick“ gibt.

**Bild 6-9:**

Zwei Eisschollen und ein Bobschlitten „üben“ den dynamischen Segelflug.

Das Fliegen in Haarnadelkurven ist die Strategie des Albatros. Der Albatros möchte keine Höhe verlieren und gleite deshalb wagerecht dahin. Das Halten gleicher Höhe ist mit dem Aufzehren von Geschwindigkeit verbunden. Aus der Bewegungsgleichung folgt:

$$m \frac{dv}{dt} = W \equiv \frac{W}{A} mg \equiv \frac{c_w}{c_a} mg \quad \Rightarrow \quad \frac{dv}{dt} = \frac{c_w}{c_a} g, \quad \frac{c_w}{c_a} = \text{Gleitwinkel}.$$

Ein Albatros hat einen besten Gleitwinkel von  $1/20$ . Da das nachfolgend beschriebene Flugmanöver erfordert, dass der Albatros an unterschiedlichen Punkten seiner Tragflügelpolaren fliegt, setzen wir als Mittel den schlechteren Wert von  $c_w/c_a = 1/15$  an. Damit nimmt nach der obigen Formel die Geschwindigkeit des Albatros pro Sekunde um  $0,65$  m/s ab. Sehen wir, ob dieser Geschwindigkeitsverlust durch ein Manöver à la Bobfahrer wettgemacht werden kann. — Dem mit  $20$  m/s über Grund fliegenden Albatros komme – statt der Eisscholle – eine

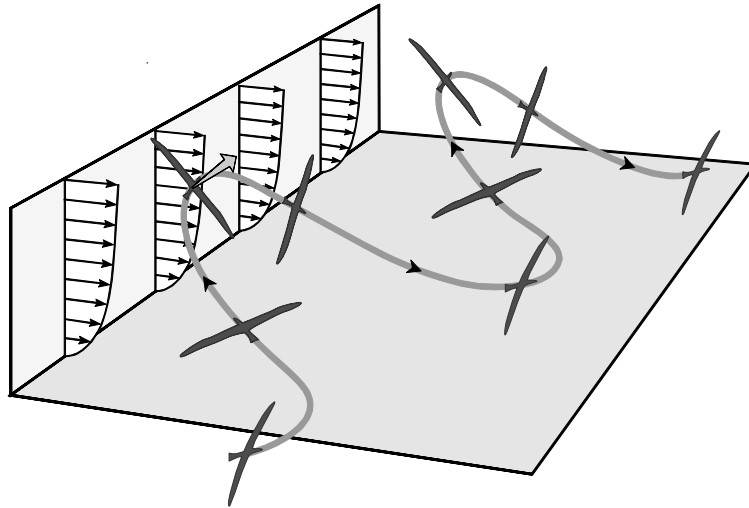
Luftmasse mit der Geschwindigkeit  $w=5$  m/s entgegen. Er taucht in diesen Gegenwind ein. Nach der flugmechanischen Geschwindigkeitsformel

$$v = \sqrt{\frac{2mg}{\rho F} \cdot \frac{1}{c_a}}$$

ist es für den Albatros einfach, durch Erniedrigung der Flügelanstellung den  $c_a$ -Wert so zu senken, dass er sich jetzt relativ zur Luft mit der Geschwindigkeit von 25 m/s bewegt. Denn Flugzeug und Vogel können bei gleichem Auftrieb (Auftrieb = Gewicht) verschiedene Geschwindigkeiten fliegen, wobei allerdings der Bestpunkt der Tragflügelpolaren verlassen wird. Unser Albatros bewege sich also – wie unsere Bobfahrer – mit unveränderter Geschwindigkeit von 20 m/s über Grund auf gleichbleibender Höhe in der bewegte Luftmasse. Als dann dreht er – wie unser Bobfahrer – eine Haarnadelkurve. Nach deren Vollendung hat er über Grund die Geschwindigkeit von 30 m/s. Mit diesem Gewinn von 10 m/s tritt der Albatros schließlich aus der bewegten Luftmasse heraus. Und wenn es ihm gelingt, sein Drehmanöver in weniger als 15 Sekunden abzuschließen, hat er die zwischenzeitlich erforderte Abbremsung gutgemacht.

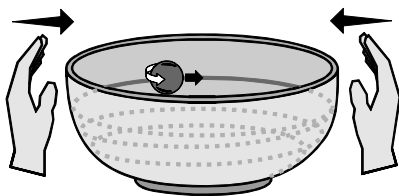
Nun weht einem Albatros selten schubweise Luftmasse auf gleicher Höhe frontal entgegen. Er muss sich den Gegenwind in größerer Höhe suchen. Die Haarnadelkurven sind schräg nach oben geneigt (**Bild 6-10**). Das Steigen gegen den Wind und das Fallen mit dem Wind macht das Manöver komplizierter. Aber das Prinzip bleibt. Es ist die Zentripetalkraft in der Kurve, die dem Albatros einen Schwung verleiht. Die Zentripetalkraft (waagerechte Auftriebskomponente des schräggestellten Flügels in der Kurve) mal der Verschiebungsgeschwindigkeit des Windes ist eine Leistung, die dem Albatros zugeführt wird. So deutet sich die große Schräglage des Albatros im Kurven-Gipfelpunkt (nach IDRAC bis zu 65°).





**Bild 6-10:** Flugbahn eines Albatros im dynamischen Segelflug.

Wer glaubt, es sei die Trägheit, die den Vogel wie an einer Drachenschnur gehalten im Gegenwindflug steigen läßt, übersieht, daß sich dieser Effekt im Mitwindflug auslöscht. — Um sich die Dynamik des Albatrosfluges zu veranschaulichen, nehme man eine Schale und lasse darin durch geschickte Gegenbewegungen der Wandung eine Kugel kreisen (**Bild 6-11**).



**Bild 6-11:**

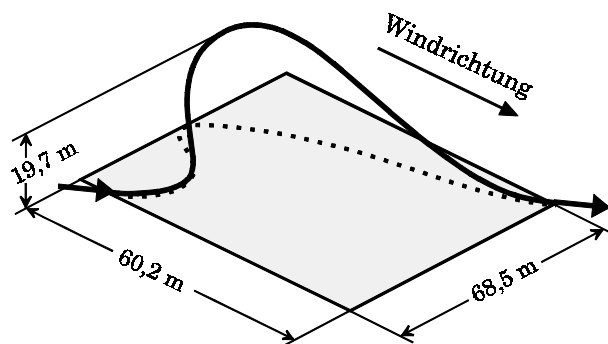
*Kugelschleudern als Denkmodell zum dynamischen Segelflug.*

### ***Dynamisch Segelfliegen im Sport?***

Die Bionik möchte herausragende Leistungen der Natur technisch nachbilden, und dabei sollte es egal sein, ob es sich wirtschaftlich rechnet oder „nur“ sportlich reizt. Einige Segelflieger behaupten, dass sie schon nach Albatros-Art geflogen seien. Das mag sein, wenn es sich um

Windscherungen in größeren Höhen handelt. Die große Herausforderung wäre aber das wiegende Auf- und Abfliegen im Windprofil nahe der Meeresoberfläche. Gewiss wird auch dies eines Tages gelingen, wahrscheinlich mit speziell für diesen Zweck entworfenen Segelflugzeugen. Ein „Dynasegler“ wird höchste aerodynamische Güte bei hohen Auftriebsbeiwerten, geringe Spannweite und hohe Flächenbelastung aufweisen. Ein dynamischer Segelflieger muss seine Kreise schnell durchmessen, damit er der Geschwindigkeitsaufzehrung durch den Kurven-Schwung zuvorkommt. Er wird also enge Kurven ziehen, wozu er – zum Aufbringen der Zentripetalkraft – hohen aerodynamischen Auftrieb benötigt. Klein muss der Dynasegler sein, damit er nahe an die Meeresoberfläche kommt, wo die Windabbremmung maximal ist. Und große Flächenbelastung muss er haben, damit gespeicherte kinetische Energie ihn in die obere Gipfelkurve trägt. Kurz, ein Schmetterling wird kaum dynamischen Segelflug betreiben können.

GOTTFRIED SACHS hat für einen Albatros in einem turbulenten Windprofil die optimale Flugbahn berechnet (**Bild 6-12**). Damit ein Segelflugzeug einer solchen Bahn folgt, bedarf es höchster Geschicklichkeit. SACHS schlägt vor, in das Cockpitfenster einen computergenerierten Korridor einzublenden, dem der Pilot folgt. Oder ein Autopilot, der Daten von einem Satelliten-GPS bezieht, folgt der optimalen Bahn. Letzteres könnte man vielleicht gar in einem Flugmodell realisieren.



**Bild 6-12:**

*Albatros-Flugbahn  
minimalen  
Windbedarfs*

$$v_{\text{Boden}} = 5,6 \text{ m/s}$$

$$v_{\text{Gipfel}} = 9,4 \text{ m/s}$$