

95/24

## Wie tauchen Pinguine?

Boris M. Culik und Rory P. Wilson

In: *Biologie der Polarregionen*.  
Ed. I. Hempel + G. Hempel

Gustav Fischer Jena 1995.

Nur im Meer sind die Pinguine in ihrem Element. Hier finden sie all ihre Nahrung, hier verbringen sie, außer bei der Mauser oder der Aufzucht ihrer Jungen die meiste Zeit. Im Gegensatz zu fliegenden Meerestvögeln haben Pinguine ihre Flugfähigkeit verloren (s. Beitrag Bannasch). Sie können dafür tiefer und länger tauchen als ihre fliegenden Verwandten und sich so Nahrungsquellen erschließen, die den anderen unerreichbar sind. Um im Lebensraum Meer zu bestehen, mußten die Pinguine eine Reihe spezieller Anpassungen entwickeln, welche die Anatomie, die Knochen, das Atmungssystem und bestimmte Fähigkeiten betreffen. Bevor wir uns der Frage widmen, wie Pinguine tauchen und wieviel Energie sie dafür benötigen, sollten wir zunächst einige dieser Fähigkeiten besprechen.

### *Anpassungen an einen aquatischen Lebensstil*

Die Fortbewegungsart der Pinguine läßt sich durch ihr Leben in dem neuen Element erklären. Wenn fliegende Vögel starten oder landen, sind sie auf die Auftriebskräfte, die an ihren Flügeln und am Schwanz entstehen, angewiesen. Dies erfordert eine waagerechte Stellung dieser „Tragflächen“, während die Füße senkrecht dazu auf den Boden zeigen, um das Körper-

gewicht noch zu tragen oder gleich aufzunehmen. Daher befinden sich die Beine fliegender Vögel etwa in der Mitte des Rumpfes. Wenn ein Schwan schwimmt, bedient er sich seiner Füße für den Vortrieb. Sie sind seine Paddel.

Beim Pinguin sorgen die Flügel für den Vortrieb. Die Stromlinienform konnte dadurch verbessert werden, daß die Beine möglichst weit hinten „eingebaut“ wurden. Sie werden nicht zum Paddeln benutzt, sondern wirken dort als Höhenruder, während der kurze Schwanz hauptsächlich die Funktion des Seitenruders erfüllt. Eine Landung wie bei fliegenden Vögeln findet nicht mehr statt. Stattdessen schwimmen Pinguine auf den Strand zu und stellen sich dann, ähnlich wie ein Mensch, auf die Beine, um die letzten Meter aufrecht zu Fuß zurückzulegen. Viel aufsehenerregender ist es allerdings, wenn sie mit hoher Geschwindigkeit aus dem Wasser schießen, um dann aufrecht auf einem Felsen oder einer Eisscholle stehend zu landen. Ihre menschenähnliche Körperhaltung, ein Hauptgrund für ihre Beliebtheit, ist also nur ein Nebenprodukt ihrer Anpassung an das Wasser.

Die Knochen sind bei den Pinguinen nicht luftgefüllt und leicht wie bei anderen Vogelarten, sondern, im Gegenteil, massiv und schwer. Außerdem ist das System der Luftsäcke, welches bei fliegenden Vögeln für die Kör-

perform sorgt, zugunsten eines riesigen Magens zurückgebildet, der, wenn er voll ist, bis zu einem Drittel des Körpergewichts der Tiere ausmachen kann. Ein Pinguin hat durch diese „Konstruktionsänderungen“ an der Wasseroberfläche nur noch sehr wenig Auftrieb. Deshalb sitzt er auch nicht auf dem Wasser wie ein Schwan, sondern liegt tief im Wasser, beinahe wie ein U-Boot: Nur sein Rücken, Hals und Kopf schauen hervor. Der Vorteil liegt darin, daß ein Pinguin mit wenig Kraftaufwand abtauchen kann, da die Auftriebskräfte, die dem entgegenwirken, gering sind.

Dennoch besitzen Pinguine ähnlich U-Bootfahrern einen Tauchretter: Die Luft in ihren Luftsäcken und ihrem Gefieder reicht nämlich aus, um nach einem Tauchgang ohne Anstrengung die Wasseroberfläche wieder zu erreichen. Mit zunehmender Tiefe nehmen diese Auftriebskräfte zwar ab, aber auch ein Pinguin, der auf 180 m abgetaucht ist, würde durch diesen Tauchretter ohne Antrieb wieder langsam an die Oberfläche gelangen (Wilson et al. 1992).

### *Der Sauerstoff als limitierender Faktor*

Wer je einem Pinguin beim Schwimmen zugesehen hat, weiß, mit wie wenig Anstrengung diese Tiere ihre Geschwindigkeit im Wasser beibehalten. Sie schlagen einmal kurz mit den Flügeln und gleiten danach mühelos dahin, ohne auch nur die Wasseroberfläche zu kräuseln. Im Vergleich dazu ein menschlicher Athlet, der im Freistil sein Äußerstes gibt, um einen Wettkampf zu gewinnen: eine Energieverschwendung ohnegleichen. Das Wasser spritzt in alle Richtungen, und sobald er aufhört sich abzumühen, bleibt er schon nach ein paar Metern stehen. Der Mensch schafft gerade einmal 2 Meter pro Sekunde (oder 7,2 km/h). Ein Pinguin erreicht im Spurt dagegen mehr als das Doppelte. Auf die Körperlänge bezogen, ist er im Wasser sogar siebenmal schneller als der Mensch!

Während des Tauchens sind die Pinguine von der Frischluftzufuhr abgeschnitten und können daher nicht ihre Sauerstoffreserven erneuern. Der in ihrem Blut und ihren Muskeln gespeicherte Sauerstoff wird während des Tauchens durch Verbrennungsvorgänge in den Muskeln und den anderen Organen verbraucht. Dies geschieht um so schneller, je höher der Energiebedarf dieser Organe ist. Daher wird die Dauer, die der Vogel unter Wasser bleiben kann, von seinen Sauerstoffreserven und deren Verbrauch bestimmt.

Da Pinguine die meiste Zeit ihres Lebens auf See verbringen, sind sie an das Leben im Wasser extrem gut angepaßt. Dennoch haben bisher alle Untersuchungen an diesen Vögeln einen relativ hohen Energie- und daher Sauerstoffverbrauch beim Schwimmen ergeben. Die Kollegen, die sich mit dieser Frage beschäftigten, hatten ihre Versuche allerdings in Zoos mit schlecht trainierten Pinguinen oder von Schlauchbooten aus mit Unterwasserkäfigen durchgeführt (Baudinette und Gill 1985, Hui 1988). Durch die in der Versuchsanordnung entstehenden Turbulenzen mußten die Pinguine erheblich mehr leisten, als sie beim Schwimmen im Meer gewohnt waren.

Kein Wunder also, daß die Forscher an Hand ihrer Daten berechneten, daß zum Beispiel Adéliepinguine (*Pygoscelis adeliae*) nur 46 Sekunden lang tauchen können, bevor ihre Sauerstoffreserven erschöpft sind. Eine längere Tauchdauer wäre nur möglich, wenn die Tiere auf anaerobem Stoffwechsel zurückgriffen, also eine „Sauerstoffschuld“ eingingen. Allerdings gibt es hierfür keinerlei Hinweise: Die Muskulatur der Tiere weist kaum Fasern des Typs auf, die einen anaeroben Stoffwechsel tolerieren. Außerdem müßten die Pinguine nach dem Auftauchen für diese Sauerstoffschuld „bezahlen“ und zwischen den einzelnen Tauchgängen länger an der Oberfläche bleiben, als dies normalerweise beobachtet wird. Vom Energieverbrauch unter Wasser hängt auch ab, ob der im Körpergewebe mitgeführte Sauerstoffvorrat für einen Tauchgang ausreicht oder ob zusätzlich der im Atemsystem

vorhandene Sauerstoff benötigt wird. Sollte dies der Fall sein, wäre zu untersuchen, wie Pinguine sich vor der Taucherkrankheit schützen.

Die Taucherkrankheit beruht auf Gasblasen in den Geweben und im Blut, die ähnlich entstehen wie die Blasen in einer Mineralwasserflasche, wenn der Deckel abgeschraubt wird. In beiden Fällen treten Gase aus einer übersättigten Flüssigkeit aus, sobald der Außendruck vermindert wird. Bei den Blasen in der Sprudelflasche handelt es sich um Kohlensäure, im Falle der Taucherkrankheit ist es im wesentlichen Stickstoff. Um die Taucherkrankheit zu verhindern, müssen Sporttaucher peinlichst darauf achten, daß sie nach einem Tauchgang beim Aufstieg in den vorgesehenen Tiefen Pausen einlegen, um den Stickstoffüberschuß in ihren Geweben wieder abzubauen. Bei Berufstauchern werden hierfür Kompressionskammern verwendet, in denen die Taucher nach einem längeren Einsatz in großen Tiefen langsam wieder auf Normaldruck gebracht werden. Diese sogenannte Dekompression kann Tage dauern.

### Verhalten der Pinguine auf See

Zwei Fragen waren also zu klären: 1. Wie lange tauchen Pinguine in der freien Natur, und 2. Wieviel Energie benötigen sie hierfür? In der Literatur waren keine konkreten Daten hierüber zu finden, so daß wir uns selbst daran machen mußten, eine Antwort zu suchen.

Zusammen mit anderen Kollegen entwickelte Rory Wilson in den letzten 10 Jahren mehrere Geräte, die den Pinguinen am Nest an das Gefieder geklebt und nach Rückkehr des Pinguins wieder abgenommen werden. Dabei macht er sich die Eigenschaft zunutze, daß Pinguine während der Brutphase sehr nesttreu sind und nach einem Ausflug auf See innerhalb weniger Tage zurückkehren, um ihre Jungen zu füttern.

Angefangen hatte Rory's ganze Begeisterung für Pinguine und ihr Verhalten auf See während seines Aufenthalts auf Marcus Island, in Südafrika. Eine Frage interessierte ihn brennend: Wie schnell und wie weit

schwimmen Brillenpinguine (*Spheniscus demersus*) auf ihren Jagdausflügen? Da es damals keine geeigneten Meßgeräte hierfür gab, begann er damit, ein Gerät zu entwickeln, welches er den Pinguinen umschnallen konnte. Das Geld für die Pinguinforschung war damals sehr knapp, und so mußte er ein Geschwindigkeitsmeßgerät bauen, welches sein bescheidenes Budget nicht sprengte.

Nach einer Reihe von Fehlentwicklungen baute er am Ende das ganze Meßgerät aus einer Einwegspritze, wie sie in Arztpraxen verwendet wird, sowie einem Stück Stahldraht, Nagellack und einem kleinen Stück Schaumgummi. Die Spritze lieferte das Gehäuse, in dem die aus dem Draht gewundene Feder befestigt wurde. Aus dem Schaumgummi schnitt er einen Stempel, der an das andere Ende der Feder geklebt wurde. Nun konnte man diesen Stempel gegen den Druck der Feder in das Gehäuse drücken. Ließ man los, kam der Stempel, von der Feder gedrückt, wieder in seine Ausgangslage zurück. Den Nagellack brauchte Rory, um die Feder anzumalen, damit sie im Salzwasser nicht gleich verrostete.

Das Gerät wurde an einem Pinguinmodell aus Plastik befestigt und in einem Wassertank getestet. Je höher die Geschwindigkeit, desto weiter wurde der Stempel vom Wasser in das Gehäuse gepresst. Sobald man das Modell anhielt, kehrte der Stempel in seine Ausgangsposition zurück. Die Bewegung des Stempels wurde mit Hilfe einer Leuchtdiode (mit Uhrenbatterie) und eines Kleinbildfilms aufgezeichnet. Der „Pinguin-tacho“ war fertig (Wilson und Bain 1984).

Trotz seiner etwas rustikalen Konstruktion funktionierte das Gerät hervorragend, und schon nach kurzer Zeit konnte Rory ablesen, daß Brillenpinguine unter Wasser eine Reisegeschwindigkeit von 7–9 km/h bevorzugen und Maximalgeschwindigkeiten von 20 km/h erreichen. Außerdem konnte er feststellen, daß Pinguine, die kleine Küken versorgen müssen, täglich ca. 30 km auf der Suche nach Nahrung zurücklegen, während

Vögel mit großen Küken rund 80 km weit schwimmen müssen, um genügend Fische zu fangen. Nach Veröffentlichung der technischen Details wurde das Meßgerät auch von einer Reihe anderer Pinguinforscher benutzt. Es zeigte sich, daß alle Pinguine etwa gleich schnell schwimmen. Die größeren Arten sind nur geringfügig schneller als die kleineren.

Seit jenen frühen Tagen auf Marcus Island hat die Pinguinforschung allerdings Riesenfortschritte gemacht. Die Anzahl der Geräte, die von Pinguinforschern eingesetzt werden, hat sich vervielfacht (Wilson et al. 1993 a). Wir selbst setzen heute hochkomplizierte, kleine, stromlinienförmige Fahrtenschreiber ein, die am Pinguin gleichzeitig Tauchtiefe, Schwimmgeschwindigkeit und -richtung sowie Wassertemperatur und Helligkeit aufzeichnen, und das alle 2 Sekunden. Dabei sind die Geräte mit einer Größe von 150×60×40 mm relativ klein und mit 200 g Gewicht auch nicht gerade schwer. Die Daten werden elektronisch im Gerät gespeichert, während der Pinguin auf See ist. Nach der Rückkehr des Pinguins zum Nest wird der Fahrtenschreiber wieder entfernt und die Daten werden zur Auswertung auf den Computer übertragen. Mit Hilfe von Computerprogrammen können wir schon nach wenigen Minuten genau aufzeigen, wo der Pinguin hingeschwommen ist und wo er nach Nahrung tauchte.

Nachdem Rory den neuen Gerätetyp erfolgreich an afrikanischen Brillenpinguinen erprobt hatte, wurden die Fahrtenschreiber von uns in der Antarktis an Adélie-, Zügel- (*Pygoscelis antarctica*) und Eselspinguinen (*Pygoscelis papua*) eingesetzt. Die spektakulärsten Ergebnisse erzielte allerdings unser Kollege Klemens Pütz, der im Rahmen seiner Doktorarbeit an 2 französischen Expeditionen zum Crozet-Archipel im Süd-Indischen Ozean teilnahm. Er untersuchte dort mit Hilfe der neuen Geräte das Verhalten von Königspinguinen (*Aptenodytes patagonicus*). Nach Rückkehr der Vögel zum Nest hatte er Rekordergebnisse vorzuweisen: Ein Königspinguin war in nur 8 Minuten 323 m tief ge-

taucht, bei einer mittleren Reisegeschwindigkeit von 9 km/h (Pütz 1994). Die während des Tauchgangs vom Fahrtenschreiber gemachten Lichtmessungen lassen den Schluß zu, daß Königspinguine auch in dieser Tiefe ihre Beute visuell aufspüren (Wilson et al. 1993 b).

Mit Hilfe der neuen Fahrtenschreiber können wir eine ganze Menge über das Verhalten der Tiere auf See lernen. Das Interesse an ökologischen Fragestellungen treibt aber viele Forscher dazu, die Vögel mit zu großen Geräten auszustatten. Mit zunehmender Größe der Geräte werden die Pinguine mehr und mehr beeinträchtigt: Aufgrund der Reibungsverluste erhöht sich ihr Energieverbrauch, während sich ihre Schwimmgeschwindigkeit und die erzielte Tauchtiefe verringern. Die Dauer eines Jagdausfluges wird von den Tieren erhöht, um diese Effekte zu kompensieren, und dennoch ist ihr Jagderfolg geringer als ohne Meßgerät. Eine erschreckende Bilanz! Außerdem sind es genau diese Parameter, die der Forscher unverfälscht messen wollte.

Um diese für Forscher und Pinguine gleichermaßen unbefriedigende Situation zu verbessern, haben wir gerade in den letzten Monaten mit großem Aufwand den Einfluß der Geräte auf unsere Studienobjekte, die Pinguine, untersucht (z. B. Bannasch et al. 1994). Um die Tiere möglichst wenig zu behindern, beziehungsweise in ihrer Aktivität zu beeinträchtigen, hat Rudolf Bannasch (s. Beitrag Bannasch) unsere Fahrtenschreiber vor ihrem Einsatz am lebenden Tier im Wind- und Wasserkanal geformt und in Hinblick auf ihren Strömungswiderstand optimiert.

### *Der Energiebedarf*

Um zu ergründen, wieviel Energie Pinguine nun wirklich während des Schwimmens verbrauchen, konstruierten wir in Kiel ein Pinguin-„Olympiabecken“, einen 21 m langen Kanal, der mit Zubehör (Feldlabor, Gene-

rator, Pumpen, Meß-, Analyse- und Registriergeräten) 3 Tonnen wog und einen Frachtcontainer mit 19 Kubikmetern füllte (manchmal sehnen wir uns nach den Zeiten, als Zoologen ausschließlich Notizblock und Schmetterlingsnetz benötigten). Die ganze Ausrüstung wurde im November 1989 in Bremerhaven auf den Forschungseisbrecher „Polarstern“ verladen und an Bord bis zur Ardley Insel (Süd-Shetland Inseln) in die Antarktis gebracht. Die Entladung, mit Hilfe eines kleinen Landungsboots der russischen Station Belingshausen, dauerte 8 Stunden. Bei eisigem Wind und Schnee (dem sogenannten „antarktischen Sommer“) montierten Boris, Rory, Rudolf und der Student Torsten kurz vor Weihnachten mit Hilfe der russischen Kollegen das Feldlabor und den Kanal. Dann kleideten wir das Becken noch mit einer einzigen, unter diesen Temperaturen ziemlich steifen Plastikfolie aus, um es wasserdicht zu machen.

Nun mußten wir nur noch die motorgetriebene Feuerwehrrampe anschließen, die Boris im Gepäck hatte, um vom 100 m entfernten Strand Seewasser in den Kanal zu pumpen. Das war kein Vergnügen, weil die Pumpe andauernd Algen ansaugte und Boris mit seinen Gummistiefeln am Strand stehen mußte, um im Eiswasser mit bloßen Händen die Algen vom Ansaugstutzen zu entfernen. Als der Kanal nach 2 Stunden endlich randvoll war, wurde er mit Plexiglasplatten abgedeckt, um die Pinguine am Auftauchen zu hindern. Luft sollten sie nur in zwei eigens dafür vorgesehenen Kammern, Käseglocken nicht unähnlich, an den beiden Enden des Kanals beziehen, wo sie auftauchen konnten. Diese Atemkammern waren mit starken Pumpen versehen, um ständig ausreichend Frischluft zuzuführen, sowie mit Ventilatoren, um die Luft innerhalb der Kammern umzuwälzen. Ein Teilstrom dieser Luft wurde ins Labor geleitet, in dem Boris moderne Meßapparaturen einsetzte: 3 Gas-Analysengeräte, Temperatur-, Druck- und Feuchtfühler, Schreiber, Computer, Geräte zum Eichen, usw. Natürlich benötigten all diese Geräte ausreichend Strom. Der kleine, flüsterleise Generator lief Tag und Nacht.

Damit er nicht ausging, hatten wir 2000 Liter Benzin mit im Gepäck ...

Man kann sich kaum die Spannung vorstellen, als wir den ersten Pinguin, frisch am Strand gefangen, in den Kanal einsetzten: Würde er sich an die künstlichen Verhältnisse gewöhnen? Nun, es dauerte keine 2 Minuten, und das Tier war nach einem ersten, zugegebenermaßen etwas panischen Tauchgang in einer der beiden Kammern aufgetaucht. Nach einigen Versuchen hatte er bald herausgefunden, daß es am anderen Ende der 21 Meter langen „Rennstrecke“ noch eine Kammer gab. Dieser Pinguin und die meisten anderen Versuchstiere schwammen nach ca. 30 Minuten Eingewöhnungszeit ruhig auf und ab (Abb. 1). Jedesmal, wenn sie auftauchten, atmeten sie und verbrauchten dabei einen Teil des Sauerstoffs in der betreffenden Kammer, was von den Analysengeräten erfaßt und vom Computer aufgezeichnet wurde. Es funktionierte! Nun mußte Boris nur noch für die Dauer eines Versuchs auf die Leiter klettern, um von oben den Ka-



Abb. 1. Schwimmen für die Wissenschaft: der Eselspinguin im Schwimmkanal, ein Athlet, dessen Geschwindigkeit und Energieverbrauch gerade gemessen werden, wird kritisch von seinen beiden Trainern beobachtet. Foto: Torsten Reins

nal zu überblicken und seine Beobachtungen des Pinguinverhaltens auf Tonband zu sprechen. Allerdings wurde ihm manchmal während eines 5stündigen Versuches die Zeit doch etwas lang.

In der Zwischenzeit setzte Rory täglich aufs neue die Fahrtenschreiber ein. Auf der Ardley-Insel brüten neben Adéliepinguinen auch Zügel- und Eselspinguine, und wir hatten uns vorgenommen zu ergründen, ob alle drei Arten dasselbe Seegebiet zur Nahrungssuche nutzen. Natürlich gab es auch Schwierigkeiten: Das Wetter machte oft das Anbringen der Fahrtenschreiber unmöglich, da das eingesetzte Tesa-Band auf dem nassen Gefieder der Vögel nicht haftete. Es kam auch vor, daß ein „ausgerüsteter“ Pinguin erst nach einer Woche wieder gesichtet wurde, weil ein Schneesturm dazwischengekommen war. Dann waren natürlich die Batterien des Bordcomputers längst leer und alle Informationen „vergessen“. Trotz dieser und anderer Schwierigkeiten erhielten wir jedoch sehr gute Ergebnisse: Im Mittel bevorzugten Adéliepinguine eine Reisegeschwindigkeit von 2,2 m/s (7,9 km/h) und ihre mittlere Tauchdauer beträgt 85 Sekunden, wie sich aufgrund von 1 600 Messungen bzw. Tauchgängen herausstellte (Wilson et al. 1993 b).

Lange nach dem Ende der Expedition waren wir in Kiel noch mit der Auswertung der Ergebnisse beschäftigt. Die Meßdaten über den Sauerstoffverbrauch der Pinguine im Kanal lassen sich in Energiebedarf umrechnen, anhand der Beziehung  $1 \text{ ml O}_2 = 20,1 \text{ Joule}$ . Dabei wird angenommen, daß Pinguine mit Hilfe des Sauerstoffs Fett, Kohlenhydrate und Proteine anteilig „verbrennen“. Die Untersuchungen im Schwimmkanal ergaben, daß die Pinguine durch die Fahrtenschreiber kaum behindert wurden. Ihr Energieverbrauch stieg nach Anbringen des Geräts um nur 5%, während ihre Schwimmgeschwindigkeit um 7% sank. Wir sind also sehr zuversichtlich, daß die Daten, die mit Hilfe der Fahrtenschreiber an Pinguinen im Meer gemessen wurden, realistisch sind (Culik et al. 1993 a).

Unter Annahme der besten Voraussetzungen (optimale Geschwindigkeit von 2,2 m/s, geradliniges Schwimmen, kein Abbremsen oder Beschleunigen) beträgt der Energieverbrauch schwimmender Adéliepinguine etwa 40 Watt. Nimmt man an, daß die Tiere im freien Wasser, wie im Kanal auch, immer wieder beschleunigen und abbremsen müssen, erhöht sich ihr Energieverbrauch auf 60 Watt (Abb. 2). Sie verbrauchen also nur soviel Energie wie eine Glühbirne.

Boris' Berechnungen ergeben daher, daß der Energieverbrauch der Pinguine viel niedriger ist, als bisher angenommen wurde und sie daher mit ihren Sauerstoff-

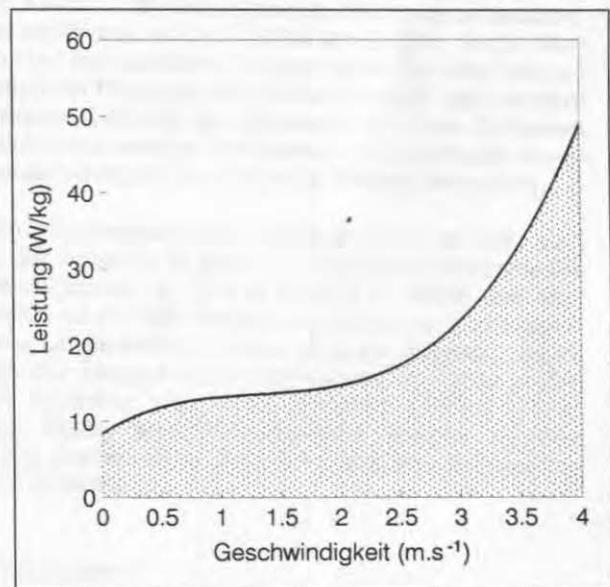


Abb. 2. Energieverbrauch von Adéliepinguinen im 21 m langen Schwimmkanal. Der Energieverbrauch ist hier als „Leistung“ in Watt pro Kilogramm Körpergewicht angegeben und gegen die von den Tieren freiwillig erreichte Schwimmgeschwindigkeit (m/s) aufgetragen. Mit zunehmender Geschwindigkeit erhöhen sich die Reibungsverluste, was auch zu einem erhöhten Energieverbrauch führt.

vorräten meistens bequem auskommen können (Culik et al. 1994): Maximal können Adéliepinguine 113 Sekunden lang unter der Wasseroberfläche schwimmen und dabei 248 m zurücklegen, ohne eine Sauerstoffschuld einzugehen (Abb. 3). Dies ist wesentlich länger als ihre in der Natur gemessene mittlere Tauchdauer von 85 Sekunden. Der in ihren Luftsäcken gespeicherte Sauerstoff wäre nach diesen Berechnungen nur ein

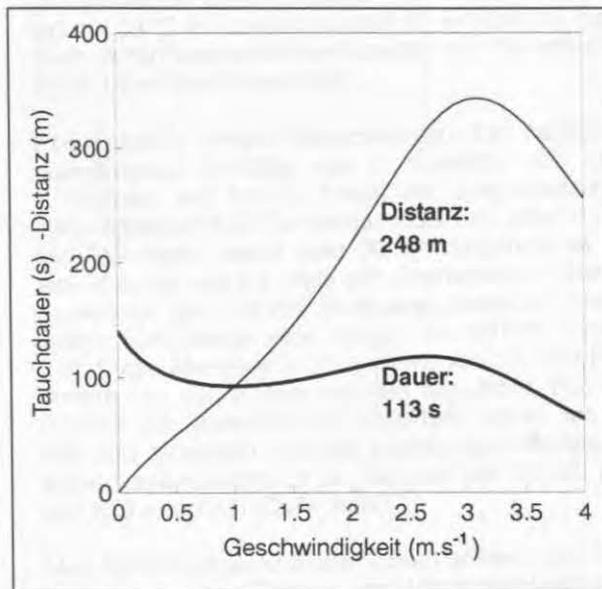


Abb. 3. Die während eines Tauchgangs unter Wasser zurückgelegte maximale Strecke (in Metern, dünne Linie) sowie die Tauchdauer (in Sekunden, dicke Linie) hängen von der gewählten Geschwindigkeit ab. Hier wird vorausgesetzt, daß die Pinguine geradlinig und ohne abzubremesen oder zu beschleunigen schwimmen. Adéliepinguine bevorzugen eine mittlere Reisegeschwindigkeit von 2,2 m/s (7,9 km/h). Obwohl eine höhere Geschwindigkeit in bezug auf die Tauchstrecke Vorteile brächte, würden die Tiere, wenn sie zu schnell schwimmen würden, ihre Beute übersehen. Bei der Wahl der „richtigen“ Geschwindigkeit sind also mehrere Faktoren zu berücksichtigen.

Notvorrat. Sie würden ihn nur gebrauchen, wenn sie zum Beispiel durch Eis am Auftauchen gehindert würden.

Daß diese Ergebnisse richtig sind, bestätigte uns Rudolf Bannasch aufgrund unabhängiger Messungen an Pinguinmodellen im Wasserkanal des Instituts für Wasserbau und Schiffbau in Berlin. Er hatte herausgefunden, daß der Adéliepinguin einen Strömungswiderstandsbeiwert, kurz Cw-Wert genannt, von 0,0396 bei einer Geschwindigkeit von 2,2 m/s erreicht. Das ist erheblich weniger als ein Sportwagen, dessen (dimensionsloser) Cw-Wert bei 0,3 liegt. Berechnet man aufgrund des Energieverbrauchs der lebenden Pinguine im Kanal in der Antarktis ihren Strömungswiderstand, so erhält man einen Cw-Wert von 0,0368. Beide Werte sind fast identisch. Der geringere Cw-Wert bei den lebenden Pinguinen wird dadurch erklärt, daß sie dem Wasser aufgrund der Eigenschaften ihres Gefieders noch etwas weniger Widerstand als das Modell entgegenzusetzen (Culik et al. 1994; s. Beitrag Bannasch).

Die Hauptnahrung der Adéliepinguine ist Krill, eine in der Antarktis in großen Schwärmen vorkommende Leuchtgarnele (s. Beitrag Siegel). In Größe und Aussehen ist ein Krill vergleichbar mit einer Nordseegarnele. Umgerechnet in diese „Energie-Währung“, benötigt der Pinguin zum Schwimmen 10 Gramm Krill pro Kilometer oder einen gehäuften Eßlöffel voll. In den Magen eines Adéliepinguins passen ungefähr 1 200 Gramm. Eine „Füllung“ reicht also für maximal 120 Kilometer.

### Fischerei

Doch wieviel Energie brauchen Pinguine insgesamt zum Leben? Wie kann man dies in Nahrungsbedarf umrechnen? Woher beziehen sie ihre Nahrung? Für den Adéliepinguin scheinen wir in der Lage zu sein, die während der Brutsaison benötigte Nahrungsmenge berechnen zu können. Dazu untersuchten wir zu-

sätzlich die Auswirkungen des Wetters, also der Sonneneinstrahlung, der Temperatur, der Windgeschwindigkeit und so weiter auf die Tiere. Wir wollten wissen, wieviel Zeit und Energie sie für Liegen, Stehen, Laufen, Kämpfen, Putzen, Schwimmen, Tauchen etc. . . benötigen. Wir untersuchten den Energiebedarf der heranwachsenden Küken und die Frage, wieviel Energie erforderlich ist, um eiskalten Krill (Wassertemperatur) auf 39 °C (Körpertemperatur) zu erhitzen. In mehreren Antarktisexpeditionen konnten wir die erforderlichen Daten hierfür sammeln.

Das Ergebnis unserer Berechnungen: Ein Adéliepinguin-Brutpaar benötigt vom 1. November bis zum 7. Februar, also für die Dauer der Jungenaufzucht, 180 Kilogramm Krill. Die beiden Küken erhalten in dieser Zeitspanne davon etwa 30 kg. Umgerechnet auf eine Kolonie, wie die nahe der argentinischen Station Esperanza (ca. 110 000 Brutpaare), bedeutet dies in jedem Südsommer eine Menge von 20 000 Tonnen Krill. Diese Menge wird im Umkreis von 25–100 Kilometern von den Adéliepinguinen abgefischt. Für den Bereich der Antarktischen Halbinsel haben wir, für alle dort gezählten 322 000 Adéliepinguin-Brutpaare, einen Gesamtverbrauch pro Sommer von 56 000 Tonnen Krill errechnet (Culik 1994).

Man könnte aufgrund dieser Zahlen meinen, daß Adéliepinguine neben Robben und Wale die Hauptvertilger der Leuchtgarnele Krill sind. Weit gefehlt. Auch hier haben wir der Natur wieder einmal den Rang abgelaufen: Die Fischerei zieht Jahr für Jahr 70 000 Tonnen Krill aus dem Seegebiet rund um die antarktische Halbinsel, mit einem Rekordfang 1982 von über 105 000 Tonnen. Der Mensch fischt allein etwa halbsoviel Krill aus diesen Gewässern wie alle Robben und Seevögel zusammen. Wayne Trivelpiece (in Anderson 1991) erklärt bereits den Rückgang der Adéliepinguinpopulation auf der King-George-Insel mit der Fischerei und weist auf die Indikatorstellung der Pinguine in diesem Zusammenhang hin. Auch wenn der Rückgang der Pinguinzahlen heute noch nicht dramatisch ist,

müssen vor einer weiteren Ausbeutung der antarktischen Gewässer mögliche Auswirkungen genau untersucht werden. Ein Schritt in die richtige Richtung ist die bereits erfolgte Begrenzung der jährlichen Krillfischerei, die im übrigen seit 1991 aus ökonomischen Gründen stark zurückgegangen ist (s. Epilog).

## Störungen

Der in der Antarktis aufgebaute Schwimmkanal bot aber auch die Möglichkeit, handfeste Daten in bezug auf Beringung und Ölverschmutzung der Pinguine zu gewinnen. Ein gut geputzter, sauberer Pinguin mit gut geordnetem Federkleid hat im Wasser sehr geringe Reibungsverluste. Sein stromlinienförmiger Körper und seine gewachsenen Federn bieten dem Wasser keine Angriffsfläche. Rudolf Bannasch stellte zum Beispiel fest, daß Zügelpinguine dem Wasser den gleichen Strömungswiderstand entgegenbringen wie ein aufrecht stehendes 2-Mark-Stück. Bei den etwas größeren Eselspinguinen erhöht sich der Strömungswiderstand und erreicht die Werte eines 5-Mark-Stückes. Dies erklärt, daß Pinguine mit so wenig Energieaufwand durch das Wasser gleiten. Aber schon ein kleiner Markierungsring, ein bißchen Schmutz, ein kleiner Ölfleck, der das Gefieder durcheinanderbringt, genügt, um die Reibungsverluste stark zu erhöhen und dem Pinguin das Leben zu erschweren. Flügelmarken, wie sie jährlich an tausenden von Pinguinen zu Markierungszwecken angebracht werden, erhöhen zum Beispiel den Energieverbrauch während des Schwimmens um 24% (Culik et al. 1993 b). Grund genug für alle Kollegen, sich im einzelnen Gedanken über die Notwendigkeit der Beringung zu machen.

Im Gegensatz zu fliegenden Vögeln haben Pinguine auf See überhaupt keine Chance, einem Ölfleck auf dem Wasser auszuweichen. Sie müssen täglich von ihren Brutkolonien zu ihren Fanggründen schwimmen und dabei immer wieder auftauchen, um Luft zu ho-

len. Eine Verschmutzung durch Öl wirkt sich in zweifacher Weise auf Seevögel aus: Zum einen werden die Tiere durch aufgenommenes Öl vergiftet, und zum anderen ist das verölte Gefieder nicht mehr wasserdicht. Die Pinguine versuchen zunächst, das Öl durch Putzen wieder zu entfernen. Sie haben dabei meist keinen Erfolg. Dem zusammengeklebten Gefieder fehlt die isolierende Luftschicht, und das Wasser wird ihnen nun zum Schwimmen zu kalt. Wer jemals mit einem undichten Taucheranzug geschwommen ist, kann das nachempfinden. Die Pinguine stehen also am Strand herum, gehen aber früher oder später, vom Hunger getrieben, doch wieder ins Wasser. Der Preis dafür ist hoch: Ihr ungeordnetes Gefieder bewirkt, daß sie beim Schwimmen 50% mehr Energie aufbieten müssen, um den erhöhten Wasserwiderstand auszugleichen. Darüber hinaus verlieren sie mehr Wärme als sie erzeugen können (Culik et al. 1991).

Viele Pinguine sterben auf See, ohne je von irgendwelchen Menschen am Strand aufgefunden zu werden. Die genaue Zahl der Opfer ist daher bei allen Ölunfällen, egal, welche Pinguinarten sie betreffen, unbekannt. Leider sind auch in der Antarktis bei der Betankung der Stationen kleine Ölunfälle an der Tagesordnung. Der schlimmste Ölunfall ereignete sich jedoch im Januar 1991, als vor der amerikanischen Station Palmer das argentinische Versorgungsschiff „Bahía Paraíso“ sank. Dabei flossen 1 Million Liter Öl in die von Pinguinkolonien umgebene Bucht. Von allen Beteiligten werden jetzt große Anstrengungen unternommen, um die Sicherheitsstandards zu verbessern und Ölverschmutzungen zu vermeiden.

### Schlußwort

In diesem kurzen Kapitel konnten wir nur einige Ergebnisse, die sich aus der Untersuchung der Tauchphysiologie von Pinguinen ergeben, anführen. So ist das eben in der Wissenschaft: Man kommt

vom Hundertsten ins Tausendste, und auf jede Antwort folgen 10 neue, mindestens ebenso interessante Fragen. Wir haben vor, den Pinguinen weitere Fragen zu stellen und erwarten mit Spannung die Antworten.

Wir möchten uns ganz besonders bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft bedanken, welche die Pinguinforschung in Kiel systematisch seit 1984 finanziell unterstützt und somit die beschriebenen Entwicklungen und Expeditionen ermöglichte. Unser Dank gilt ebenfalls dem Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, dem Centre d'Ecologie et Physiologie Energétiques, CNRS, Strasbourg, den Besatzungen der Schiffe sowie jenen der argentinischen, russischen, französischen und chilenischen Antarktisstationen, welche uns in vielfacher Weise unterstützten. Für die kritische Durchsicht des Manuskriptes danken wir G. Hempel und R. Bannasch.

### Literatur

- Anderson C (1991) Penguins losing the struggle? *Nature* 350: 294
- Bannasch R, Wilson RP, Culik B (1994) Hydrodynamic aspects of design and attachment of a back-mounted device in penguins. *J exp Biol* 194: 83–97
- Baudinette RV, Gill PJ (1985) The energetics of „flying“ and „paddling“ in water: locomotion in penguins and ducks. *J Comp Physiol B* 155: 373–380
- Culik B (1994) Energy requirements of pygoscelid penguins: a synopsis. *Ber Polarforsch* 150, 76 pp
- Culik BM, Bannasch R, Wilson RP (1993 a) External devices on penguins: how important is shape? *Mar Biol* 118: 353–357
- Culik BM, Wilson RP, Woakes AJ, Sanudo FW (1991) Oil pollution of Antarctic penguins: effects on energy metabolism and physiology. *Mar Poll Bull* 22: 388–391

- Culik B, Wilson RP, Bannasch R (1993b) Flipper bands on penguins: the cost of a life-long commitment. *Mar Ecol Prog Ser* 98: 209–214
- Culik BM, Wilson RP, Bannasch R (1994) Under-water swimming at low energetic cost by Pygoscelid penguins. *J exp Biol* 197: 65–78
- Hui CA (1988) Penguin swimming II: Energetics and behavior. *Physiol Zool* 61: 344–350
- Pütz K (1994) Untersuchungen zur Ernährungsökologie von Kaiserpinguinen (*Aptenodytes forsteri*) und Königspinguinen (*Aptenodytes patagonicus*). *Ber Polarforsch* 136, 139 pp
- Wilson RP, Bain CAR (1984) An inexpensive speed meter for penguins at sea. *J Wildl Manage* 48: 1360–1364
- Wilson RP, Culik BM, Bannasch R, Driesen HH (1993 a) Monitoring penguins at sea using data loggers. *Biotelemetry* 12: 205–214.
- Wilson RP, Hustler K, Ryan PG, Noeldeke C, Burger AE (1992). Diving birds in cold water: do Archimedes and Boyle determine energy costs. *Am Nat* 140: 179–200
- Wilson RP, Pütz K, Bost C, Culik B, Bannasch R, Reins T, Adelung D (1993 b) Diel dive depth in penguins in relation to vertical migration of prey: whose dinner by candlelight? *Mar Ecol Prog Ser* 94: 101–104