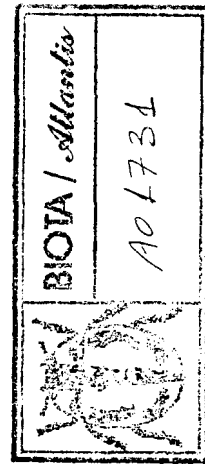


Rönt
3238



EGT Nr 969

III

Der Startsprung zum Flug bei der lanzarotinischen Odlandschrecke *Sphingonotus canariensis* (Orthoptera: Acrididae: Oedipodinae)*

WERNER NACHTIGALL

Eingang: 1985-05-08/ 1998-07-13

Annahme: 1998-07-11

NACHTIGALL W [Zool Inst, Univ Saarland, D-66041 Saarbrücken]: Starting jump for Take off in the Lanzarote locust Species *Sphingonotus canariensis* (Orthoptera: Acrididae: Oedipodinae).- Entomol Gener 23(3): 177-186, Stuttgart 1998-10. --- [Note]

The starting jump at take off of *Sphingonotus canariensis* (Saussure 1884) was analysed from video films recorded in a hot, flat sandy area near Costa Blanca, Lanzarote. Furthermore, a scaiiii study of body mass was made and the length of body and jumping ieigs was analysed. Distances s per frame ($1/50$ s), starting velocity v (mean $1,1-1,6$ m s^{-1}) and starting acceleration a (mean $25-55$ m s^{-2}) were calculated. Starting velocity is independent of body length. Dependencies of some length values l_1 of body length l_2 and body mass $m_{(1)}$ are given as potence functions $l_1 = a l_2^b$ and $l_1 = a m_{(1)}^b$; the theoretical and the calculated exponents b are compared and discussed. Compared to the jump of the desert iocust *Schistocerca gregaria* the mass specific jumping power of *S canariensis* is significantly smaller. This leads to the assumption, that starting jumps for take off are made with reduced power, which is just sufficient to provide the optimal air speed for the first wingbeats.

Key words: *Sphingonotus canariensis* (Saussure 1584) - flight start - jump - starting jump - insect flight - video analysis

NACHTIGALL W [Zool Inst, Univ Saarland, D-66041 Saarbrücken]: Der Startsprung zum Flug bei der lanzarotinischen Odlandschrecke *Sphingonotus canariensis* (Orthoptera: Acrididae: Oedipodinae).- Entomol Gener 23(3): 177-186, Stuttgart 1998-10. --- [Mitteilung]

Mit Videomethoden wurde im natürlichen Umfeld einer flachen, heißen Sandfiachenahe Costa Blanca, Lanzarote, bei der Odlandschrecke *Sphingonotus canariensis* (Saussure 1884) der Ablauf des Startsprungs zum Flug untersucht. Des weiteren wurden Massenmeßdaten des Rumpfes und Längenmeßdaten des Körpers und der Sprungbeine einer Skalierungsbetrachtung unterzogen.

*Series title: Insect Flight in a Natural Environment Nr 11. - In this series, calculations and conclusions are based essentially on observations and data collected in the field. - [Nr 1: Entomol Gener 17(1): 001-008; 1992. Nr 2: Entomol Gener 17(4): 241-254; 1993. Nr 3: Entomol Gener 19(1/2): 029-037; 1991. Nr 4: Entomol Gener 19(4): 267-279; 1995. Nr 5: Entomol Gener 20(4): 225-239; 1995. Nr 6: Entomol Gener 20(4): 241-248; 1996. Nr 7: Entomol Gener 20(4): 249-262; 1996. Nr 8: Entomol Gener 22(1): 001-012; 1997. Nr 9: Entomol Gener 22(2): 119-127; 1997. Nr 10: Entomol Gener 22(3/4): 177-198; 1998].

0171-8177/98-0023-0177 \$2.50

© 1998 E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, D-70176 Stuttgart

Berechnet wurden Absprungstrecken s pro Bild ($1/50$ s), Absprunggeschwindigkeiten v (Mittel $1,1$ - $1,6$ m s⁻¹) und Absprungbeschleunigungen a (Mittel 25 - 55 m s⁻²). Die Absprunggeschwindigkeit v ist nicht von der Körperlänge $l_{(2)}$ abhängig. Abhängigkeiten einer Anzahl von Längenmeßwerten l_i von der Körperlänge $l_{(2)}$ und Körpermasse $m_{(1)}$ werden als Potenzfunktionen $l_i = a l_{(2)}^b$ und $l_i = a m_{(1)}^b$ gegeben; die theoretisch zu erwartenden und die resultierenden Exponenten b werden verglichen und diskutiert.

Im Vergleich beispielsweise mit dem Sprung der Wüstenheuschrecke *Schistocerca gregaria* resultiert bei *S. canariensis* eine deutlich geringere massenbezogene Sprungleistung; es liegt die Annahme nahe, daß der Absprung zum Flug mit reduzierter Leistung bewerkstelligt wird, die gerade ausreicht, optimalen Fahrtwind für die ersten ablaufenden Flügelschläge einzustellen.

Schlüsselbegriffe: *Sphingonotus canariensis* (Saussure 1884) - Flugstart - Sprung - Startsprung - Insektenflug - Videoauswertung

1 Einleitung

Feldheuschrecken können ausdauernd und weit springen; ihre Sprungdynamik, physikalisch unschwer zu formulieren, ist gut untersucht [z.B. BROWN 1967, BENNETT-CLARK 1975; einführende zusammenfassende Darstellung bei NACHTIGALL 1982]. Sie können aus dem Sprung in den Flug übergehen; manche Heuschrecken zeigen dieses Verhalten stereotyp und entfalten bereits mehr oder minder kurz nach dem Absprung ihre Flügel, z.B. Schnarr- und Odlandschrecken (Acrididae: Oedipodinae). Findet dieser Sprung-Flug-Übergang häufig statt, so sollten die dafür nötigen Energieausgaben minimiert werden. Zum Erreichen der optimalen Fluggeschwindigkeit, für die ja unterschiedliche Mechanismen vorstellbar sind - Abflug vom Boden, relativ langsamer Absprung mit anschließender Flügelaktivität, relativ rascher Absprung mit später einsetzender Flügelaktivität sowie alle Übergänge - sollte demnach der Mechanismus mit dem geringsten Gesamtenergieaufwand bevorzugt werden. Es kann erwartet werden, daß dieses Verhalten bei einem ungünstigen biologischen Ambiente (heiß, trocken, wenig Nahrung, damit hohe Ruheenergieausgabe und geringe Energieaufnahme) besonders deutlich zum Tragen kommt. Es wurde deshalb als Baustein für zukünftige Vergleiche eine geeignete Population von Heuschrecken in einem heißen, sandigen Areal auf Lanzarote untersucht.

2 Material und Methoden

Biotop: Auf einer etwa 150 m² großen, ebenen und mit schollig zemssenen, ausgetrockneten lehmigen Sanden bedeckten Flachstelle in Meeresnähe im südlichen Lanzarote (Abb 1A, B: Playa Blanca), umstanden von lockerem, niederstehendem Gebüsch, hielt sich im April 1996 eine Population von schätzungsweise **30-50** Exemplaren von *Sphingonotus canariensis* (Saussure 1884) auf. Kurze Sprungflüge von mehreren Metern Länge waren häufig, wobei die Tiere beim Absprung teils ein knarrendes, unmittelbar nach dem Aufsetzen ein singend-zirpendes Geräusch abgaben.

Aufnahmen und Fänge: Absprungvorgänge wurden aus der Hand videografiert (Bauer Camcorder VCC 602, $1/2000$ s, $f = 80$ mm, Vorsatzlinse 1 und Televorsatz 1,4x, Abstand etwa $1,4$ m, Bildbreite etwa 15 cm, Abb 1C); der Absprung erfolgte spontan oder wurde durch eine leichte Fußbewegung induziert; merkliche Unterschiede traten nach Vorversuchen nicht auf.

Aus mehreren hundert Aufnahmeversuchen zu vier Terminen an unterschiedlichen Tagen wurden $N = 41$ Sprünge zur Auswertung ausgewählt, die nach Protokoll den folgenden Bedingungen gehorchten: Bodentemperatur etwa 30°C , Windstille bis Windstärke 2, flacher Absprung unter etwa 30° , Aufnahme von oben oder leicht schrag von oben, Flügel unmittelbar nach Absprung entfaltet (Abb 1C).

Die Bildanalyse ist bei NACHTIGALL [1995, 1996] beschrieben. Als Streckenmaßstab wurde ein Lineal videografiert; der Haibbildabstand ist $1/50$ s. Der Absprungwinkel (Winkel der Sprungbahn zur Horizontalen) konnte auf $< \pm 10^\circ$ abgeschätzt werden. Projektive Verzerrungen durch nicht präzise Ausrichtung der Kameraachse zur Vertikalen sind für die gegebene Auswertegenauigkeit [vergl: NACHTIGALL 1995, 1996] bedeutungslos.

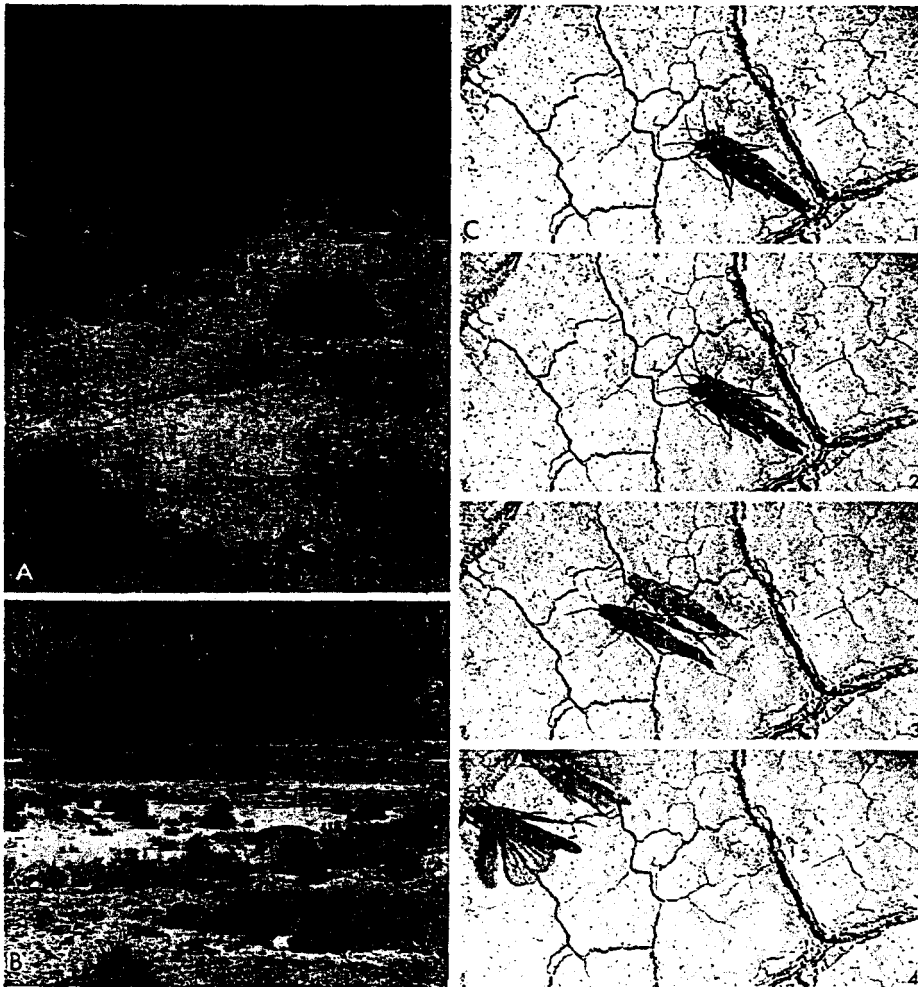


Abb 1: A, B Lebensraum der lanzarotinischen Odlandschrecke *Sphingonotus canariensis* (Saussure 1884) [Orthoptera: Acrididae: Oedipodinae]. C Typische Absprung-Sequenz beim Startsprung von *S. canariensis*. Bildabstand $1/50$ s. Einzelbild-Belichtungszeit $1/2000$ s. Absprungwinkel etwa 30° . 1 Sitzen. 2 Eindrehen zum Absprung, Hinterbein-Justierung. 3 Absprung, 70% der Körperlänge zurückgelegt, kein Beinkontakt mehr, Hinterbeine gestreckt. 4 Flügel entfaltet, rund 90% der Körperlänge zurückgelegt, Hinterbeine noch gestreckt. Zum Vergleich mit dem Text: Startgeschwindigkeit v_1 zu berechnen nach $A \frac{s_1}{(1/50 \text{ s})} = \frac{(s_{\text{Bild 3}} \cdot s_{\text{Bild 4}})}{(1/50 \text{ s})} = \frac{(\text{Abstand Frons}_{\text{Bild 3}} \text{ von Frons}_{\text{Bild 4}} \text{ in m})}{(1/50 \text{ s})}$. Für v_2 gilt analog Bild 2 und Bild 3.

Eine Auswahl von 13 Exemplaren aller Größen wurde gefangen und in 70% Alkohol fixiert. Damit sollte einerseits die Population nicht geschädigt, andererseits ein gerade ausreichendes Material für die Gewinnung der Meßwerte zum Zweck einer statistischen Analyse erhalten werden.

Meß- und Rechenkenngrößen: Die folgenden Daten wurden aus den Videoaufnahmen bestimmt: Aufnahme-Nr. ($N = 41$), erkennbare Länge l_1 (Frons bis Flügelspitze) auf Bild, Strecke $A s_1$ zwischen letztem Bild in Ruhe und erstem Bild in Sprungbewegung, Strecke $A s_2$ zwischen erstem und zweitem Bild in Sprungbewegung, Geschwindigkeit $v_1 = A s_1 / (1/50 \text{ s})$, Geschwindigkeit $v_2 = A s_2 / (1/50 \text{ s})$, mittlere Geschwindigkeit $v_d = (v_1 + v_2) / 2$. Berechnet wurden weiterhin die mittleren Geschwindigkeiten v_{1d} und v_{2d} für $N = 41$ und die mittleren Beschleunigungen $a_1 = v_{1d} / (1/50 \text{ s})$ und $a_2 = v_{2d} / (1/50 \text{ s})$ sowie die Ausgleichsgeraden $v_1(l_1)$ und $v_2(l_2)$ (Abb 2).

An den gefangenen Exemplaren wurden mit der Feinschublehre bzw einer Feinwaage die folgenden Kenngrößen auf 1/20 mm bzw 10 mg genau bestimmt: Länge l_1 (Frons-Flügelspitze), Länge l_2 (Frons-Abdomen-Spitze), Länge l_3 (Hinterbeine ohne Trochanter und (am Boden abgerolltem) Tarsus), l_T Tibia-Länge, b_F maximale Femur-Breite, h_F maximale Femur-Höhe ($h_F > b_F$), d_T mittlerer Tibia-Durchmesser m_1 Gesamtmasse nach 1,5 h Trocknung bei Raumtemperatur (entspricht am ehesten der wahren Masse), m_2 Gesamtmasse nach oberflächlichem Abtrocknen des Alkohols. Gerechnet wurden die Durchschnittswerte von l_1 , l_2 , l_3 , m_1 , m_2 , die Potenzfunktionen $l_1 = a l_2^b$, $l_3 = a l_2^b$, $l_1 = a m_1^b$, $l_2 = a m_1^b$, $l_3 = a m_1^b$ sowie die Femur-Länge $l_F = l_3 - l_T$ und eine Kennzahl $b_F \cdot h_F$ für den Femur-Querschnitt (Abb 3).

Für Überslagsbetrachtungen wurde mit folgenden Kenngrößen und Formeln gerechnet: Durchschnittliche Gesamtmasse m_{1d} , durchschnittliches Gesamtgewicht $f_{gd} = m_{1d} \cdot g$ ($g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$ Erdbeschleunigung), durchschnittlicher Absprungwinkel β_d , durchschnittliche Sprungweite $l_{\text{Sprung } d}$, durchschnittliche Absprunggeschwindigkeit $v_d = (v_{1d} + v_{2d}) / 2$, durchschnittliche Beschleunigungsstrecke s_{ad} , durchschnittliche Sprungbein-Länge l_{3d} , durchschnittliche Sprungmuskelmasse $m_3 = 0,05 \cdot m_{1d}$ [BENNETT-CLARK 1977].

Nach den Gesetzen des Schiefen Wurfs ergibt sich für die theoretische Minimal-Startgeschwindigkeit in erster Näherung (unter Vernachlässigung des Luftwiderstands)

$$v_d = \sqrt{l_{\text{Sprung } d} g (\sin 2\beta)^{-1}}$$

und damit für die mit der durchschnittlichen Startgeschwindigkeit erreichbare Sprungstrecke $l_{\text{Sprung } d} = v_d^2 \sin(2\beta_d) / g$. Die mittlere Startbeschleunigung ergibt sich zu $a_d = \frac{1}{2} v_d^2 s^{-1} a_d$, die mittlere Absprungkraft (der beiden Hinterbeine) beträgt $F_d = m_{1d} a_d$. Nach ALEXANDER [1968] berechnet sich die durchschnittliche relative Sprungmuskell-Leistung zu $P_{\text{rel } d} = c v_d^3 m_{1d} s_{ad}^{-1} m_3^{-1}$. Hierbei ist $c = 2,5 \cdot 10^{-4}$ ein dimensions-behafteter Koeffizient, mit dem sich unter Verwendung der Einheiten m s^{-1} für die Geschwindigkeit v , g für die Masse m , und m für die Strecke s_d , die Leistung in W/g (Watt pro Gramm Sprungmuskulatur) ergibt.

3 Ergebnisse

3.1 Videoauswertung

Die Absprung-Registrierungen verliefen im Durchschnitt entsprechend Abbildung 1C, deren Teilbilder in der Legende erläutert sind.

Die mittlere Körperlänge betrug $l_{1d} = 2,68 \pm 0,61 \text{ cm}$ (23 %); ihre Extremwerte waren $1,82 < l_1 < 3,87 \text{ cm}$. Das Mittel der Strecke $A s_1$ lag bei $0,43 \pm 0,22$ (51%) der Körperlänge l_1 . Das Mittel der Strecke $A s_2$ lag bei $1,47 \pm 0,55$ (37%) der Körperlänge l_1 .

Die mittlere Geschwindigkeit v_1 betrug $v_{1d} = 1,10 \pm 0,53 \text{ m s}^{-1}$ ($\pm 49\%$). Die mittlere Geschwindigkeit v_2 betrug $v_{2d} = 1,61 \pm 0,38 \text{ m s}^{-1}$ ($\pm 24\%$). Die mittleren Beschleunigungen a betragen $a_{1d} = 55 \text{ m s}^{-2}$ (entsprechend 5,6 g), $a_{2d} = 25,5 \text{ m s}^{-2}$ (entsprechend 2,5 g). Die gemessenen Extremwerte waren $0,16 < v_1 < 2,10 \text{ m s}^{-1}$ und $0,96 < v_2 < 2,36 \text{ m s}^{-1}$.

Die Geschwindigkeits-Körperlängen-Abhängigkeit ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Ausgleichsgeraden $v_1(l_1)$ und $v_2(l_2)$ berechneten sich zu $v_1 = 0,94 + 0,005 l_1$ und $v_2 = 1,52 + 0,003 l_1$ (v jeweils in m s^{-1} , l in mm). Die Steigungen der beiden Geraden sind nicht signifikant von Null unterschieden (t -Test $\alpha = 5\%$).

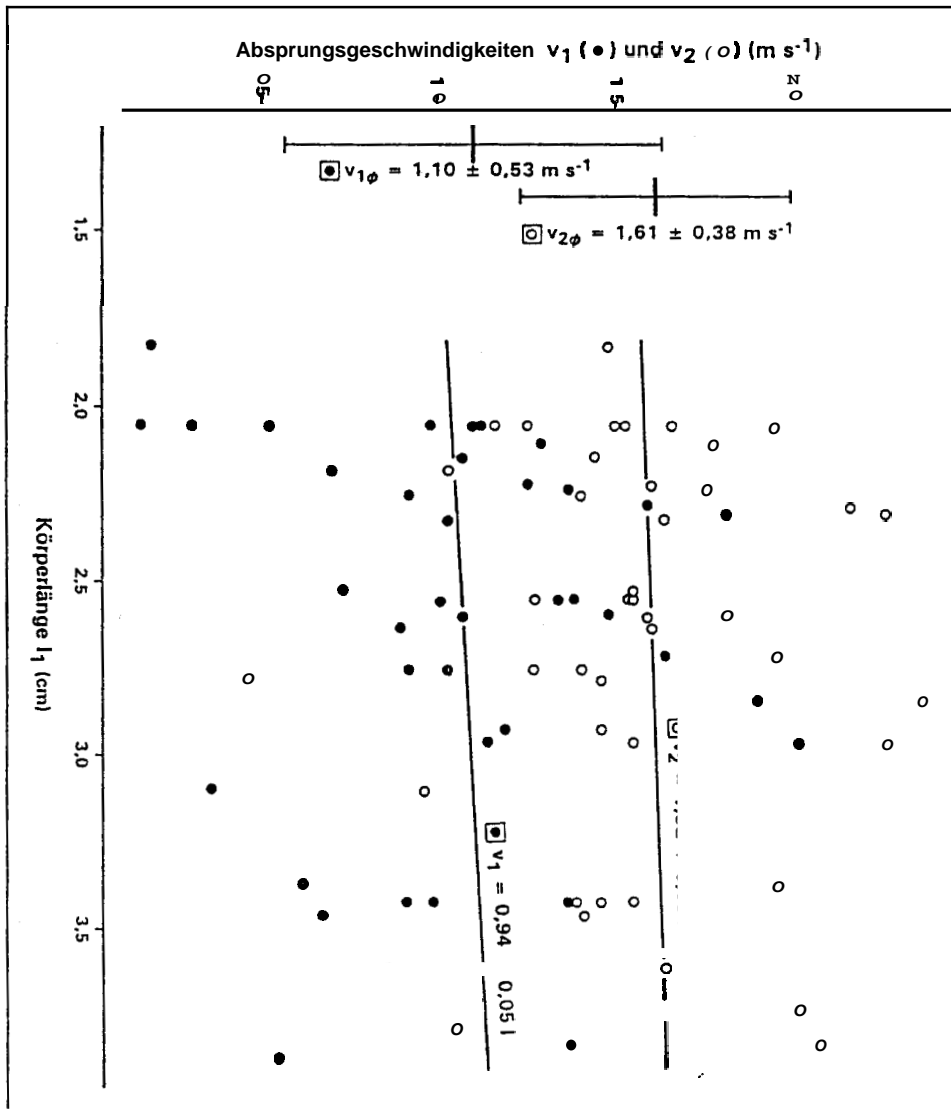


Abb 2: Startspaltung der lanzarotinischen Odlandschrecke *Sphingonotus canariensis* (Saussure 1884) [Orthoptera: Acrididae: Oedipodinae].- Auftragung der Startgeschwindigkeiten v_1 und v_2 (vgl. Methode und Legende zu Abbildung 1) über die Körperlänge l_1 . Eingetragen sind die beiden Ausgleichsgeraden $v(l_1)$, deren Steigung nicht signifikant von Null unterschieden ist; zudem sind Mittelwerte und (einfache) Standardabweichungen eingetragen.

3.2 Gesammeltes Material

Die Durchschnitts- und Extremwerte der Längen- und Massenkenngrößen l und m waren: $l_d = 3,04 \pm 0,47$ cm ($\pm 16\%$); $2,42 < l_1 < 3,92$ cm. $l_{2d} = 2,49 \pm 0,46$ cm ($\pm 26\%$); $1,88 < l_2 < 3,32$ cm. $l_{3d} = 1,97 \pm 0,30$ cm ($\pm 15\%$); $1,62 < l_3 < 2,59$ cm. $m_{1d} = 0,33 \pm 0,22$ g ($\pm 67\%$); $m_2 = 0,39 \pm 0,27$ g ($\pm 69\%$); m_{2d} ist um 18% größer als m_{1d} ; $0,21 < m_1 < 0,84$ g.

Die Längen- und Massenabhängigkeiten sind in Abbildung 3 doppeltlogarithmisch aufgetragen. Die Potenzfunktionen der Längenabhängigkeiten waren $l_1 = 2,46 l_2^{0,78}$; $r^2 = 0,85$. $l_3 = 1,55 l_2^{0,791}$; $r^2 = 0,92$. $l_F = 1,45 \cdot l_2^{0,63}$; $r^2 = 0,76$. $l_T = 0,37 l_2^{0,99}$; $r^2 = 0,94$; $b_F = 0,06 \cdot l_2^{0,99}$; $r^2 = 0,75$. $h_F = 0,15 l_2^{0,93}$; $r^2 = 0,81$. $d_T = 0,08 l_T^{0,88}$; $r^2 = 0,74$. $(b_F \cdot h_F) = 0,01 l_F^{2,49}$; $r^2 = 0,73$ (Längen jeweils in mm).

Die Potenzfunktionen der Massenabhängigkeiten waren $l_1 = 40,16 \cdot m_1^{0,22}$; $r^2 = 0,82$. $l_2 = 35,61 m_1^{0,29}$; $r^2 = 0,96$. $l_3 = 26,37 m_1^{0,23}$; $r^2 = 0,93$ (l jeweils mm, m_1 in g).

4 Diskussion

4.1 Videoaufnahmen

Das Limit der für entomologische Feldforschung an sich idealen Videomethode [NACHTIGALL 1995, 1996] liegt in der für die Analyse rascher Bewegungsvorgänge vielfach zu geringen Frequenz von 50 (Halb)-bildern je Sekunde. (Eine Verdopplungsschaltung für 100 B/s, beschrieben bei NACHTIGALL 1995, führt bei strukturiertem, hellem Hintergrund zu Auswerteproblemen; sie wurde im vorliegenden Fall ohne Erfolg versucht.) Geschwindigkeitsmessungen führen damit bei raschem Absprung zu integrativen Mittelwerten, die kritisch zu werten sind.

Nach Abb 1 wurde v_1 zwischen der ersten bewegten (Bild 2) und der letzten statischen (Bild 1) Registrierung bestimmt. Die Standdauereines Halbbilds ist 1/50s, und drr Sprung kann irgendwann innerhalb der Standzeit von Bild 2 begonnen haben, im Idealfall sofort zu Beginn, aber auch später. Die Strecke s_1 und damit die Geschwindigkeit v_1 kann also \leq der Realstrecke bzw -geschwindigkeit bei Absprungbeginn sein. Dies gilt nicht für s_2 und v_2 .

Beschleunigung, also Geschwindigkeitszunahme, ist nur bis zum Ende des Beinkontakts zu erwarten; sofort anschließend findet luftwiderstand-bedingte Verzögerung statt. Der Vergleich der Strecken s_1 , $s_{1/2 \text{ Mitte}}$, l_1 und $s_2 \approx l_3$ läßt erkennen, daß das Ende der Beschleunigungsphase im Mittel etwa mit $s_{1/2}$ zusammenfällt oder leicht später liegt.

insgesamt kann man damit einerseits erwarten, daß v_1 im Mittel kleiner ist als v_2 und im Mittel stärker streut; die Daten zeigen, daß dies zutrifft. Andererseits spricht methodisch nichts dagegen, für weitere Rechnungen das Mittel v_d von v_{1d} und v_{2d} als wahrscheinlichstes Maß für die mittlere Startgeschwindigkeit zu nehmen. Es beträgt $1,36 \text{ m s}^{-1}$.

Die Größen l_i waren auf den Videobildern klar erkennbar und wurden deshalb als Referenzlängen benutzt. Sie variierten immerhin im Verhältnis 1 : 2,1. Legt man die Massenbestimmungen am mitgebrachten Material zugrunde, sollten die zugehörigen Massen etwa im Verhältnis 1 : 28 variieren. Die Absprunggeschwindigkeiten v_1 und v_2 waren, wie die Ausgleichsrechnungen zu Abb 2 zeigten, in diesem Variationsbereich nicht längenabhängig. Die Theorie [z.B BENNETT-CLARK 1977] sagt dies nicht zwingend voraus.

Die relativ geringe Größe der Startgeschwindigkeit müßte zu nur kurzen Sprungstrecken im Bereich von etwa 20 cm führen. Die Beschleunigungen halten sich mit 2,6 bis 5,6 g ebenfalls in Grenzen; bei Sprungvorgängen von Insekten können weitaus höhere Werte auftreten. All dies läßt vermuten, daß *S. canariensis* unter den gegebenen Umständen - aus welchen Gründen auch immer - mit einer eher kleinen Sprungleistung arbeitet (s.u).

Die mittleren Längen l_{1d} der Videoaufnahmen und des gesammelten Materials unterscheiden sich nicht signifikant (t-Test, $\alpha = 5\%$); bei der Videoanalyse wurden günstigerweise auch noch kleinere Exemplare erfaßt.

Die Längenabhängigkeiten der Längen l_1 (l_2) und d_T (l_T) sollten mit dem Exponenten 1,00 skalieren, die Längenabhängigkeiten der Fläche ($b_F \cdot h_F$) (l_F) mit dem Exponenten 2,00, die Massenabhängigkeiten der Längen l_i (m_1) mit dem Exponenten 0,33, die Massenabhängigkeiten der Fläche ($b_F \cdot h_F$) (m_1) mit dem Exponenten 0,66 (Abb 3).

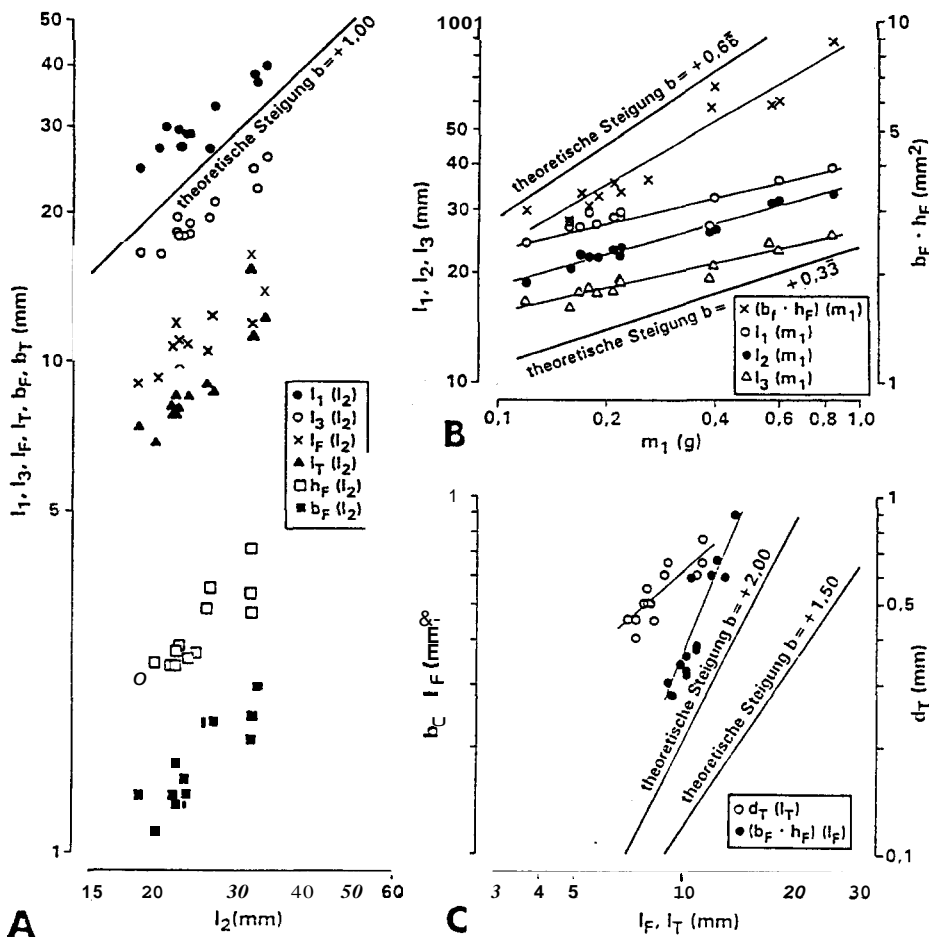


Abb 3: Startsprung der lanzarotinischen Ödlandschrecke *Sphingonotus canariensis* (Saussure 1884) [Orthoptera: Acrididae: Oedipodinae]. - Doppeltlogarithmische Auftragung der Längen- und Massenkenngrößen des gesammelten Materials. N=13. Koordinatenbezeichnungen s. "Methode", Potenzfunktionen s. "Ergebnisse".

Die tatsächlich bestimmten Exponenten 0,78 - 0,79 für $l_i(l_2)$ sowie 0,22 - 0,23 - 0,29 für $l_i(m_1)$ liegen in der Nahe der theoretischen Erwartungswerte. Ein statistischer Diskriminanztest ($\alpha = 5\%$) brachte bereits für den geringen Meßumfang ($N = 13$) signifikante Unterschiede zwischen jedem Wert und seinem Erwartungswert; alle Werte sind signifikant kleiner als die Erwartungswerte. Mit größerer Körperlänge bleiben die Tiere nicht exakt geometrisch ähnlich, sondern werden etwas gedrungener. Dies gilt auch für die Messungen am Sprungbein (Exponenten $b \approx 1$ für $b_f(l_2)$ und $h_f(l_2)$), die zudem noch folgendes gezeigt haben. Während die Tibia-Länge erwartungsgemäß mit l_2^1 skaliert, skaliert die Femur-Länge nur mit $l_2^{2/3}$. Die gedrungene Sprungbeinform bei größeren Exemplaren ist also im wesentlichen auf eine Reduktion der relativen Femur-Längen zurückzuführen, die aber von der Zunahme des Flächenquerschnitts 'überkompensiert' wird: Das Produkt $b_f \cdot h_f$ sollte mit $l_2^{2,00}$ skalieren, skaliert aber mit dem signifikant höheren Exponenten 2,49. Größere Tiere setzen also offensichtlich auf überproportional größere Sprungmuskel-Kraft (die dem Sprungmuskel-Querschnitt und damit der Kennzahl $b_f \cdot h_f$ proportional sein sollte), die über eine längenmäßig nicht reduzierte 'Sprungstange' (Tibia-) wirkt.

Die Sprungmuskel-Fläche sollte in Abhängigkeit von der Körpermasse mit dem Exponenten 0,66 skalieren und tut dies auch; 0,59 ist nicht signifikant unterschiedlich von 0,66. Die "Sprungstange" selbst wird seltsamerweise mit größerer Länge nicht relativ dicker; als "Körper gleicher Festigkeit" sollte sie aber mit 1,50 skalieren. Hier sind noch Fragen offen, die das Konstruktionsprinzip des Sprungbeins betreffen. Die Überlappungen fügen sich in den Problembereich statischer Effekte ein, der aus der Betrachtung unterschiedlich großer Pflanzen- und Tierkonstruktionen ebenso resultiert wie aus dem technischen Hochbau; er ist beispielsweise in NACHTIGALL 1971 erklärt. Dasselbe gilt für Massen-Extremwerte des gefangenen Materials, die sich immerhin wie 1:7 verhalten. Das Material lieferte auch den Durchschnittswert m_{1d} , der für weiterführende Überschlagsrechnungen benötigt wird.

4.2 Überschlagsrechnungen

Überschlagsbetrachtungen können in grober Näherung mit folgenden Durchschnittswerten gemacht werden: $m_{1d} = 0,33 \cdot 10^{-3}$ kg; $f_{gd} = 3,24 \cdot 10^{-3}$ N; $\beta_d = 30^\circ$; l_{Sprungd} ergibt sich in m; $v_d = 1,36$ m s⁻¹; $s_{ad} \approx l_{3d} = 1,97 \cdot 10^{-2}$ m; $m_{3d} = 1,65 \cdot 10^{-5}$ kg.

Damit ergibt sich die mittlere Startbeschleunigung zu $a_d = 47$ m s⁻² (entsprechend der 4,8fachen Erdbeschleunigung). Die mittlere Absprungkraft mit beiden Beinen beträgt $f_d = 1,6 \cdot 10^{-2}$ N; sie ist 5 mal größer als das Körpergewicht. Die mittlere Sprungmuskel-Leistung beträgt $P_{rel,d} = 0,64$ W g⁻¹.

Diese Daten können mit denen einer gut springenden großen Heuschrecke verglichen werden, die ihre Sprungfähigkeit regelmäßig zu Lokomotionszweckeneinsatz. Die Wüstenheuschrecke *Schistocerca gregaria* (Körperlänge bis 10 cm) springt nach BENNETT-CLARK [1975] bei einer Körpermasse von $3 \cdot 10^{-3}$ kg und $\beta = 55^\circ$ im Durchschnitt $l = 0,8$ m weit; ihre Mindest-Startgeschwindigkeit v muß nach den obigen Angaben $2,81$ m s⁻¹ betragen; sie beschleunigt über $s = 4$ cm, und ihre Startbeschleunigung beträgt demnach $98,7$ m s⁻² (entsprechend 10,8 g). Ihre Absprungkraft beträgt $3 \cdot 10^{-1}$ N, und sie ist damit mehr als 10 mal größer als das Körpergewicht. Die spezifische Sprungmuskel-Leistung berechnet sich mit der oben genannten Formel zu $P_{rel} = 2,7$ W g⁻¹. (Zum Vergleich: die Einzelmuskel-Zuckung beim Froschsprung bedarf etwa der Leistung von $0,4$ W g⁻¹).

Im Vergleich fällt für *S canariensis* insbesondere die geringe Startgeschwindigkeit auf, die wegen der quadratischen Abhängigkeit zu vergleichsweise nur kleinen Sprungweiten von rund 20 cm führen müßte, würde nicht dem Absprung sofort der Übergang in den Flug folgen. Auch Startbeschleunigung (mehr als 2mal kleiner) und Absprungkraft sind geringer. Am aussagekräftigsten ist die auf das Körpergewicht bezogene Absprungkraft und die (größenunabhängige) relative Sprungmuskel-Leistung (bei *S canariensis* 4,4mal kleiner). Es ist nicht anzunehmen, daß die Sprungmuskeln von *S canariensis* und *Schistocerca* histologisch und biomechanisch sehr unterschiedlich sind. Die im Vergleich geringen P_{rel} -Werte von *S canariensis* lassen sich zusammen mit den anderen Daten am ehesten so interpretieren, daß beim Startsprung zum Flug eine deutlich geringe Leistung einsetzt als sie für einen reinen Weitsprung maximal einsetzen würde.

Somit kann man hypothetisieren, daß der Startsprung weniger lokomotorischen Sinn hat (das heißt, in einer Zeiteinheit eine möglichst große Strecke zurückzulegen) als den Zweck, die Flügel von der Beschleunigung auf Flug-Nenngeschwindigkeit (bei der sie erst optimal arbeiten) zu entlasten. Die Hinterbeine könnten die Beschleunigung energetisch effektiver ausführen, nach **Plausibilitätsüberlegungen** deutlich günstiger, als es Flügel konnten. Die berechnete spezifische Sprungmuskel-Leistung ist eher niedrig, wenn man mit *Schistocerca* vergleicht. Diese erreicht den für den Sprung-Lokomotion nötigen hohen Wert unter Einschaltung einer **Art** Katapultmechanismus, den *S canariensis* hätte sie ihn, für den Ansprung zum Flug nicht einsetzen müßte.

S canariensis kann aber auch alle Übergänge ausführen vom Ansprung zum Flug bis zum reinen Lokomotionssprung. Dies zeigten Einzelbetrachtungen. So sprang das in Abb 2 mit Pfeilsymbol angegebene Exemplar nach Protokollnotiz mit folgenden Daten: rasche Fußbewegung, Absprung unter etwa 45° , Weitsprung knapp 1 m, Flügelentfaltung in beiden ersten Dritteln der Flugbahn. Mit einer (rechnerischen) Länge von $l_1 = 2,96$ cm und mit $v_d = 2,14$ m s⁻¹ berechnet sich $l_{Sprung} = 0,47$ m, $m_1 = 0,25$ g und $f_g = 2,5 \cdot 10^3$ N, $l_3 \equiv s_a = 1,93$ cm, $a = 119,3$ m s⁻², F gleich $3 \cdot 10^3$ N (gleich dem 12-fachen Körpergewicht), $P_{rel} = 2,6$ W g⁻¹.

Wie erkenntlich, kommt *S canariensis* unter Einbeziehung der Größendifferenz in diesem Fall der Sprungdynamik von *Schistocerca* nahe; das Vielfache des Körpergewichts und die spezifische Sprungmuskel-Leistung sind gleich groß.

S canariensis zeigt also ein relativ breites Sprung-Repertoire. Die Ergebnisse unterstützen die folgende Hypothese: Beim Ansprung zum Flug wird eine reduzierte Leistung eingesetzt, die nur so groß ist, daß die Nenngeschwindigkeit für optimale Flügelbewegung so bald wie möglich, dabei aber so energiesparend wie möglich, erreicht wird.

5 Literatur

- ALEXANDER R Mc N [1968]: Animal Mechanics.- Sidwick and Jackson, London / Bntain.
 BROWN R H J [1967]: Mechanism of locust jumping.- Nature **214**: 939; London / Britain.
 BENETT-CLARK H C [1975]: The energetics of the jump of the locust, *Schistocerca gregaria*.- J exp Biol **63**: 53-82; Cambridge / Britain.
 BENETT-CLARK H C [1977]: Scale effects in jumping animals, in: BEADLEY T J: Scale effects in animal locomotion.- Academic Press, London / Britaiiii.
 NACHTIGALL W [1982]: Biomechanik des Sprungs. Lehrbuchabschnitt. in: HOPPE et al (Hrsg): Biophysik.- Springer, Berlin / Deutschland

Danksagung: Der Autor dankt der Akademie der Wissenschaften und der Literatur zu Mainz für die Zurverfügungstellung der Geräte und des Materials, seiner Frau Dr M Nachtigall, für essentielle Hilfe im Gelände, Herrn Dr K Schönitzer, Zoologische Staatssammlung, München, für die Artbestimmung, Frau Dipl. Biol M Junge für das Ausführen der Signifikanztests, Frau A Gardezi für die Zeichnungen und Frau I Stein für das Schreiben des Manuskripts.

Anschrift des Verfassers: Univ. Professor Dr Werner Nachtigall, Zoologisches Institut der Universität des Saarlandes, D-66041 Saarbrücken, Bundesrepublik Deutschland • FR Germany.

* * *

NACHTIGALL W Vorbild Natur. **Bionik-Design für funktionelles Gestalten.**- [XII+161 Seiten, 108 Abbildungen, davon 40 in Farbe].- Publ: Springer Verlag, Berlin 1997; ISBN: 3-540-63245-X; P R DM 39,80 / OS 291,- / sFr 37,-.

--- [EGR-Nr 26471
Entomol Gener 23(3): 186; Stuttgart 1998-10.

Im Spätherbst letzten Jahres ist das neue Buch von Professor Dr Werner Nachtigall zum Thema **Bionik-Design** erschienen. Das Werk richtet sich an Biologen, Ingenieure und Designer, aber auch an den interessierten Laien. Sehr treffend gibt der Klappentext des Buches die Problemstellung des Inhaltes wieder:

- 1 Was bedeutet Bionik ?
 - 2 Naturanalyse und -übertragung haben lange Tradition-
 - 3 Am Anfang steht der analoge Vergleich-
 - 4 Zehn Grundprinzipien natürlicher Konstruktionen- „10 Gebote“ bionischen Designs-
 - 5 Zur Praxis bionischen Übertragens von Naturerkenntnissen in die Technik-
 - 6 Bionikdesign in Stichworten-
 - 7 Form und Funktion-
 - 8 Einige Grundaspekte bionischen Designs etwas detaillierter erläutert-
 - 9 Selbst die Prinzipien der biologischen Evolution und Ontogenese lassen sich auf die Technik übertragen-
 - 10 Bionikdesign in Ausbildung und Öffentlichkeit-
 - 11 Zusammenarbeit von Forschung und Anwendung-
- Literatur, **Anhang** (Abbildungsnachweise, Anmerkungen), Sachverzeichnis, Farbtafeln und Kurzerläuterungen zu den Farbtafeln.

Der Tenor des Buches lautet: „Von der Natur für die Technik lernen.“ Dies ist für unsere Zeit eine gebieterische Forderung. Denn technische Lösungen mit natürlichen Vorbildern helfen Material und Energie zu sparen und Umweltressourcen zu schonen.

WERNER NACHTIGALL zeigt, wie man Grundkonzepte der Natur als Biodesign übernehmen und eigenständig weiterentwickeln kann. Vom Staunen über die „Wunder der Natur“ führt er die Leser zum Verständnis der biologischen Prozesse und Konstruktionsprinzipien.

Viele Beispiele geben eine Vorstellung davon, wie sich diese Prinzipien in die Welt der Technik übertragen lassen. Daneben wird die Philosophie herausgearbeitet, die hinter dem Bionik-Design steht. Biologie und Technik treffen sich zum Wohle des Menschen und der Umwelt.

A WISSER [Saarbrücken]