

Telemetrie bei frei fliegenden Insekten (Orthoptera: Saltatoria)

Kutsch, Wolfram

1. Einleitung

“Telemetrie” bedeutet Übertragung von Daten über einige Distanz hinweg. Im Zusammenhang mit Übertragung biologischer Daten wird dabei oft auch der Terminus “Biotelemetrie” gewählt. Der Einsatz telemetrischer Techniken bei freibeweglichen Tieren bezieht sich vor allem auf drei Aspekte:

- a) Positionsbestimmung bzw. -verfolgung
- b) Übertragung von physikalischen bzw. physiologischen Daten
- c) Stimulation

Dieses Forschungsgebiet mit seinen faszinierenden Möglichkeiten ist noch relativ jung. Im folgenden möchte ich den augenblicklichen Status darlegen und einige Beispiele zu diesen drei Aspekten bringen. Vorher aber sollte dargelegt werden, weshalb überhaupt Insekten für telemetrische Untersuchungen herangezogen werden. Datenübertragung ist an den Einsatz elektronischer Apparaturen gekoppelt. Zumindest braucht man (s. hierzu Paragraph B, C) einen Sender, der Daten aufnimmt und in übertragungsfähige Signale verschlüsselt, und es muß ein Empfängersystem vorhanden sein, mit dem die übertragenen Signale entschlüsselt werden. Während die Empfängerseite von Größe und Gewicht nicht so sehr begrenzt ist, können sich auf der Senderseite Probleme ergeben. Aus diesem Grund war die bisherige Telemetrie-Forschung weitgehend auf die Analyse von Daten von großen Tieren (Säuger, Vögel, Reptilien) beschränkt (s. AMLANER & MACDONALD, 1980). Inzwischen aber ist die Elektronik so weit fortgeschritten, daß entsprechende Informationen auch von kleinen freibeweglichen Tieren, wie Insekten, gewonnen werden können.

Warum nun wählt man Insekten für solche Forschungen aus? Diese Gruppe hat den Menschen schon immer interessiert, allein wegen ihrer immensen Zahl, ihrer Diversität, ihres evolutionären Erfolges. Um nur einige Aspekte und Beispiele zu nennen, die von Relevanz für telemetrische Forschungen sein könnten:

- 1) Große Vertreter der Heuschrecken sind bekannt für ihre ausdauernden Wanderflüge. Telemetrisch unterstützte Studien der Flugbewegungen und das diesen unterliegende motorische Muster können dazu führen, eine Verhaltensweise, den Flug, zu verstehen. Dies ist von besonderem Interesse, zumal der tierische Flug ein völlig anderes aerodynamisches Prinzip verwirklicht hat, als es der Mensch mit seinen Flugmaschinen realisiert hat.
- 2) Viele Insekten produzieren Töne. Telemetrische Studien könnten die inner- und interartliche Bedeutung dieser Lautproduktion aufklären.

- 3) Für Bienen sind erstaunliche Leistungen des optischen Systems bekannt, wir wissen von ihrem Farbsehen und ihrer Lernfähigkeit. Viele Erkenntnisse sind bisher auf An- bzw. Abflug begrenzt (s. hierzu auch entsprechende Probleme bei der Brieftaubenorientierung); Telemetrie könnte viele wichtige Daten im bisher nicht studierbaren Freiflug zwischen Start und Landung erbringen.
- 4) Viele Insekten sind direkte oder indirekte "Schädlinge" für (menschliche) Nahrung oder sind Krankheitsüberträger. Wir wissen noch viel zu wenig über deren Vorkommen, Strategien der Verbreitung, Gründe der Anlockung oder Abstossung. Hier könnten telemetrische Studien wichtige Daten liefern.

All diese Beispiele zeigen schon, wie wichtig es ist, Informationen von und mit freien "intakten Tieren" zu gewinnen. Denn nur sie bringen die Gewähr dafür, daß es sich um "natürliche" Prozesse/Bewegungsabläufe handelt; hiermit aber erhalten wir Kenntnisse über Lebensstrategien, die letztendlich die Grundlagen der Evolution darstellen.

2. Topologie

Es gibt viele Gründe, um die Position von Einzeltieren oder ganzer Gruppen festzustellen: Von ihrer allgemeinen Verteilung bis zur ökologischen Interaktion, von Bewegungsstrategien auf engstem Gebiet bis zu transkontinentalen Wanderungen. Traditionell, Art- und Positionsdetektion waren gebunden an visuelle, ggf. auch akustische Beobachtungen, Tiere wurden markiert, Fallen wurden aufgestellt. Telemetrie kann hier einen deutlichen Informationsgewinn schaffen, selbst die kontinuierliche Positionsbestimmung bei kleinen Insekten wird möglich, wobei die Störung des Verhaltens, allein aufgrund der Anwesenheit des Experimentators, minimiert wird.

J. RILEY (1989) faßte die bekannten "Fernerkundungstechniken" (remote sensing) für den Bereich der Entomologie zusammen. Er schrieb "die einzigen entsprechenden Techniken für sinnvolle Feldbeobachtungen stellen Radar und spezielle optische Methoden dar". Ich möchte nur kurz auf einige Aspekte des Radareinsatzes eingehen.

Seit etwas mehr als 30 Jahren werden insbesondere wandernde Insektenschwärme (Heuschrecken, Falter) mit Hilfe der Radartechnik verfolgt (RAINEY, 1967; SCHAEFER, 1976; REYNOLDS, 1988). Da diese Technik vornehmlich bei Nacht oder für größere Entfernungen eingesetzt wird, ist erkennbar, daß Probleme bei der Artbestimmung auftreten. Zwar versuchte man, über die im Takt der Flügelschlagfrequenz zurückgesendeten Signale die Art zu bestimmen (RILEY, 1974), aber Flügelschlagfrequenzen verschiedener Arten können sich überlappen, abgesehen von temperaturabhängigen Verschiebungen (BELTON, 1986; FISCHER, 1998). Aber zumindest können Informationen gewonnen werden über: Durchschnittsgeschwindigkeit eines Schwarmes, seine Richtung, Größe, Dichte und Flughöhe (DRAKE & FARROW, 1988;

SMITH et al., 1993). Ein wesentliches Ziel telemetrischer Studien sollte sein, Bewegungen individueller Tiere darzustellen. Hierzu ist die konventionelle Radartechnik nur beschränkt in der Lage, sie fällt völlig aus bei der Verfolgung von Individuen nahe dem Boden oder der Vegetation, da diese selber den Radarstrahl reflektieren. Erst kürzlich wurde das "harmonic radar principle" entwickelt (RILEY et al., 1996, 1998), mit dem es gelingt, Flug- (und ggf. auch Lauf-) bahnen von kleinen Insekten (wie Bienen, Hummeln, Nachtfaltern) individuell auch nahe zum Boden zu verfolgen (s. Abb. 1). Es ist davon auszugehen, daß mit der stetigen technischen Entwicklung auch die Möglichkeiten der "telemetrischen Topologie" erweitert werden. Damit sollten die Interaktionen von Individuen untereinander (Paarfindung, Revierabgrenzung), wie auch zu andersartigen Spezies (Tier, Pflanze) besser verstanden werden und deren Anteil bei der Gestaltung eines Ökosystems.

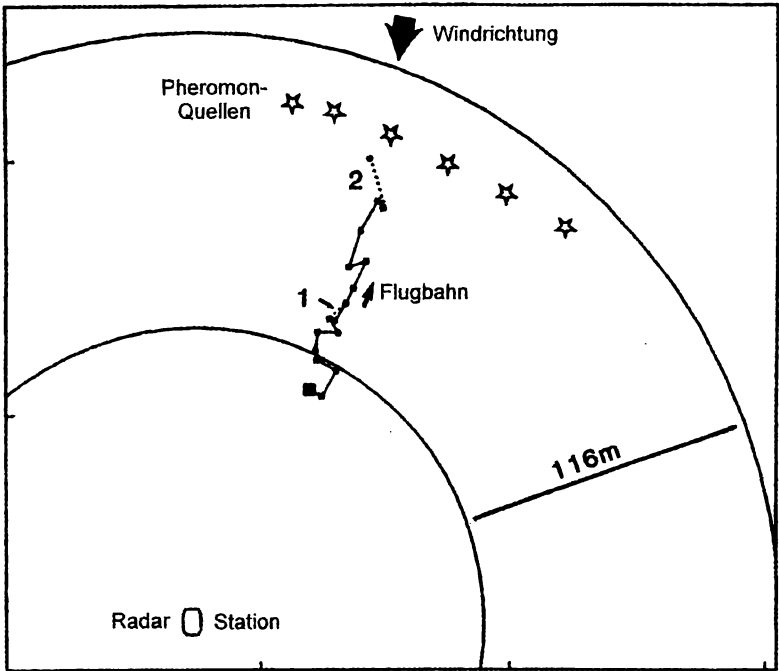


Abb. 1: Flug eines nachtaktiven Falters (*Agrotis segetum*). Zickzackförmige Bahn, die gegen den Wind auf eine Reihe von Pheromon-Quellen hin gerichtet ist. Position des Tieres im 3 s-Intervall aufgezeichnet mit Hilfe des "Harmonic Radar"; ■ erstes Erscheinen des Falters auf dem Radarschirm, 1, 2 kurze Unterbrechungen in der Aufzeichnung (Flugpausen?). Modifiziert n. RILEY et al., 1998.

3. Übertragung von tier eigenen Daten

Bisher wurde dargestellt, wie Daten von Individuen oder Schwärmen **in toto** übertragbar sind. Welche Möglichkeiten existieren, Informationen von bestimmten Prozessen bei einem Tier zu gewinnen?

Mit wenigen Ausnahmen (s. z.B. optische oder akustische Aufzeichnungen) beruht die Bio-Telemetrie auf der Übertragung elektrischer Ereignisse. Hierzu eignen sich besonders einfache Signale, wie diejenigen von individuellen Nervenzellen, Muskeln, Sinnesorganen. Hinzu kommt die Möglichkeit, zusammengesetzte Signale zu übertragen (Muskel: EMG; Herz: EKG; Gehirn: EEG). Darüber hinaus können primär nicht-elektrische Prozesse in elektrische Aktivitäten transformiert werden. Damit lassen sich physikalische Daten (z.B. Flügelbewegung, Atemkontraktionen) erfassen, wie auch anderweitige Ereignisse (Kreislaufparameter, Temperatur, Druck, ionale/molekulare Konzentrationen, etc.).

Die bisher kleinsten radio-telemetrischen Einheiten im Bereich von Säugern wurden bisher für nektar-saugende Fledermäuse entwickelt (WINTER, 1998). In unserer Gruppe haben wir ein Sendersystem entwickelt, das eine Übertragung von physiologischen Daten bei frei-fliegenden Heuschrecken erlaubt (KUTSCH et al., 1993, 1999). Weibliche Wüstenheuschrecken (*Schistocerca gregaria*) haben eine Körpermasse bis zu 3 g; für das gesamte Sendersystem, inkl. die Batterie zur Stromversorgung, schlagen etwa 0.3 g zu Buche. Diese etwa 10 % Extralast kann so geschickt auf den Körper geklebt werden, daß das Tier problemlos herumfliegen kann (Abb. 2).

Warum nun versucht man mit einer aufwendigen Technik frei-fliegende Heuschrecken (ggf. auch andere Insekten) zu untersuchen? Wie oben schon erwähnt, basiert der Tierflug auf einem ganz anderen Prinzip als die vom Menschen entwickelten Lösungen des Problems des freien Flugs. Der Mensch hat das Antriebsaggregat von den eigentlichen Auftrieb-erzeugenden Strukturen (Flügel) getrennt. Im Tierflug sind Auftrieb und Antrieb an die gleiche Struktur, die Flügel, gebunden (dieser Kopplung am nächsten kommt noch das Hubschrauberprinzip). Schon seit langem beschäftigen sich Wissenschaftler mit den aerodynamischen und physiologischen Grundlagen des Insektenfluges (s. z.B. JENSEN, 1956; WEIS-FOGH, 1956 a, b; WILSON & WEIS-FOGH, 1962; BURROWS, 1996). Aber die bisherigen Studien wurden nahezu ausschließlich an im Windstrom fixierten Tieren durchgeführt; das entspricht in etwa der Bedingung eines Laufens auf einem Laufband. Es besteht kein Zweifel, daß eventuell wichtige Informationen, die für die eigentliche freie Bewegung genutzt werden müssen, unter solchen Bedingungen fehlen oder verfälscht sind. Im technisch-physiologischen Bereich spricht man von einer "closed-loop-situation" vs. einer "open-loop-situation", wobei letzteres die Reduktion/ Verlust von Sinnesinformation indiziert. Telemetrie wird damit zur wichtigen Technik, die es erlaubt, das unbehinderte Verhalten, wie den freien Flug, zu verstehen; dies gilt na-

türlich auch für den Vogel- oder Fledermausflug, bei denen allerdings Gewichtsprobleme des Senders eine etwas geringere Bedeutung haben.

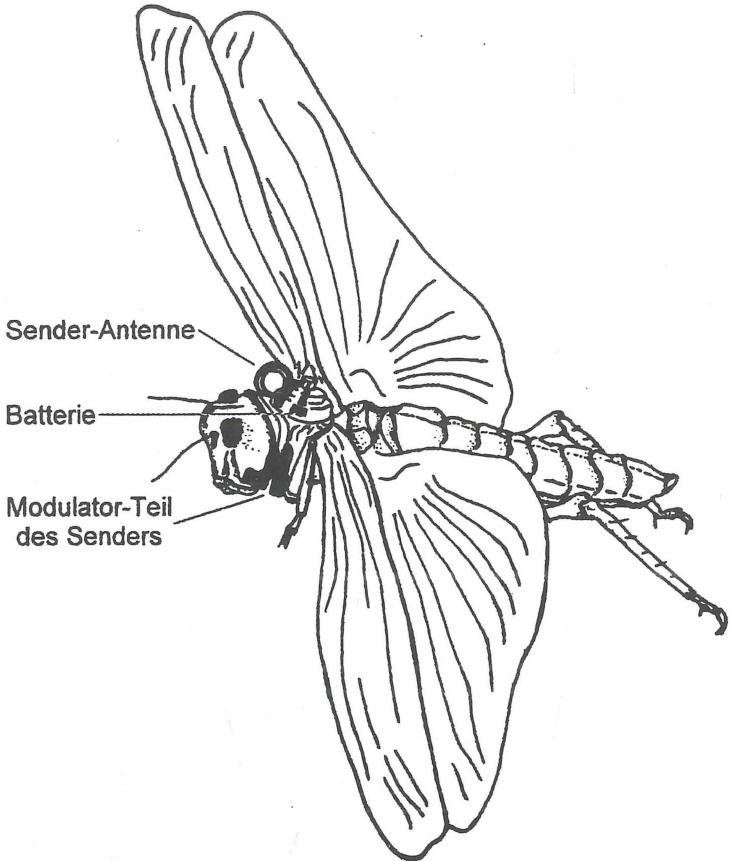


Abb. 2: Freifliegende Wüstenheuschrecke (*Schistocerca gregaria*, ♀), bestückt mit einem Sender zur telemetrischen Übertragung von Muskelpotentialen. (Zeichnung nach einem Originalphoto). Modifiziert n. KUTSCH, 1999.

Was kann man nun bei freifliegenden Heuschrecken bereits studieren und wie? Entsprechende Studien wurden - zunächst noch - in geschlossenen Räumen durchgeführt.

Wir analysieren auf der einen Seite (a) die Flugbewegungen und die Flugbahn, auf der anderen Seite (b) die übertragenen physiologischen Daten, und schließlich müssen beide Informationen miteinander korreliert werden (c) (s. Abb. 3).

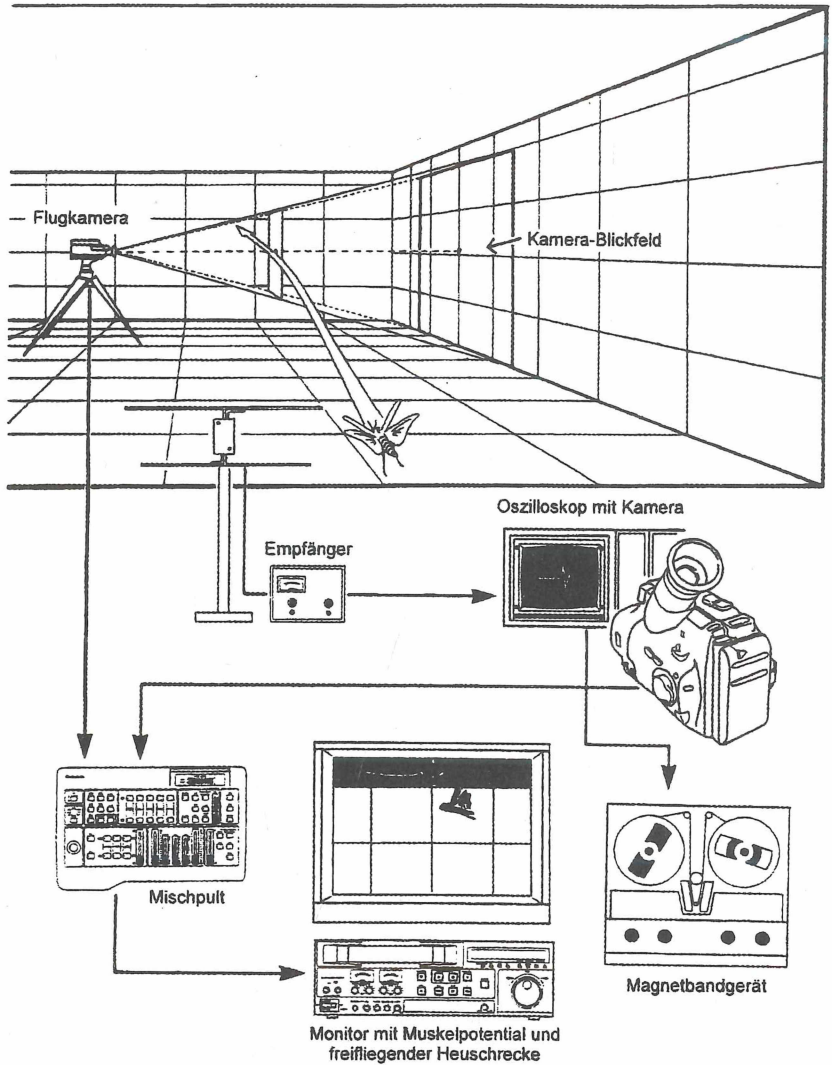


Abb. 3: Darstellung des Versuchsraumes und der Apparaturen zur Aufzeichnung der Flugbahn einer Heuschrecke und der korrelierten radiotelemetrisch übertragenen Muskelaktivität (EMG). Modifiziert n. KUTSCH et al., 1999.

- Zu a) Mit Hilfe von Videokameras läßt sich der Flug aufzeichnen und anschließend über einen Videomonitor analysieren. Beim normalen Videosystem folgen die Einzelbilder mit 20 ms (entsprechend der Wechselstromfrequenz von 50 Hz) aufeinander. Die großen schwärmenden Heuschrecken (*Schistocerca*, *Locusta*) haben Flügelschlagfrequenzen im Bereich von ca. 20 Hz, was einer Zykluszeit von 50 ms entspricht. Damit erhält man aber bei der Videoanalyse nur 2 - 3 Einzelbilder pro Flügelschlagzyklus. Um genauere Informationen und Details zur Flügelbewegung zu gewinnen, muß man eine höhere zeitliche Auflösung anstreben. Inzwischen gibt es solche Videosysteme, die mit Bildfrequenzen bis 1000 Bilder/s und mehr arbeiten.
- Zu b) Wie erwähnt, für ein Telemetrie-System benötigt man einen Sender, der an das Tier gebunden ist und von diesem Daten aufnimmt und überträgt (vergleichbar einer Radiostation) und ein Empfängersystem (vergleichbar dem Radio). Wesentlich ist, daß das Sender-System den Dimensionen (Platzprobleme, Gewicht) des Tieres angepaßt wird.
- Zu c) Die Korrelation beider Informationskanäle (a + b) gelingt über ein Videomischpult, bei dem die Aufnahmen der Freiflug-Videokamera und einer weiteren Kamera, die die elektrischen Signale auf einem Oszillographenbildschirm dokumentiert, zusammengeführt werden.

Es läßt sich absehen, daß mit weiteren Fortschritten in der Elektronik (z.B. leichte Chips mit mehrkanaligen Überträgerkapazitäten) eine sehr breite und diverse Anwendung, auch im Insektenflug, ermöglicht wird: Aufzeichnung von Muskelpotentialen, von Nervenaktivitäten, von Erregungen der Sinnesorgane, von Druckschwankungen (z.B. bei der Respiration), der Sauerstoffverteilung im Tier, detaillierter Analyse der Flügelbewegungen bei unterschiedlichsten Manövern (Start, Kurvenflug, Steig- und Senkflug, Landung). Vielleicht gelingt es damit, viele der Geheimnisse und noch unverstandenen aerodynamischen Ereignisse beim Tierflug aufzuklären.

Mit Blick auf den Insektenflug, insbesondere den der großen Heuschrecken, die sich problemlos in großen Zahlen züchten lassen, - in unserer Arbeitsgruppe konnte der Anfang zur obigen Vision gelegt werden, ermöglicht durch die gute Zusammenarbeit zwischen (physiologisch orientierten) Entomologen und der Elektronikabteilung unserer Universität (insbesondere Dipl. Ing.. G. Schwarz und H. Kautz). Wir können bereits die Aktivität individueller Flugmuskeln übertragen (Abb. 4) und diese Aktivität bestimmten Parametern des Fluges zuordnen (Geschwindigkeit, Flugwinkel). Es wäre von Vorteil, wenn sich die augenblickliche Einkanaltechnik auf eine Mehrkanalübertragung erweitern ließe (was bisher noch an Gewichtsproblemen scheitert). Mit einem Mehrkanalsystem wäre es möglich, die Aktivität synergistischer Muskeln, insbesondere deren zeitlichen Einsatz bei Flugmanövern, zu studieren, auch könnten andere Parameter (z.B. Stellung des

Flügels bei Manövern) zugleich mit der Muskelaktivität analysiert werden. Aber man kann natürlich auf einem Kanal zwei zeitlich versetzte Informationen gemeinsam übertragen. Das haben wir z.B. für den Einsatz alternierender Muskeln (Muskeln für den Flügelaufschlag bzw. -abschlag) genutzt (Abb. 5). Schon jetzt lassen sich einige Aussagen verifizieren, wie sie durch den bisherigen konventionellen Ansatz des fixierten Fluges gewonnen wurden. Aber viele neue Informationen liegen bereits vor, die eben wegen der Nachteile, die den bisherigen fixierten Flug charakterisieren, nicht gewonnen werden konnten. Wir hoffen somit, die Dynamik des freien Verhaltens zu verstehen (KUTSCH, 1999; KUTSCH et al., 1999; FISCHER & EBERT, 1999).

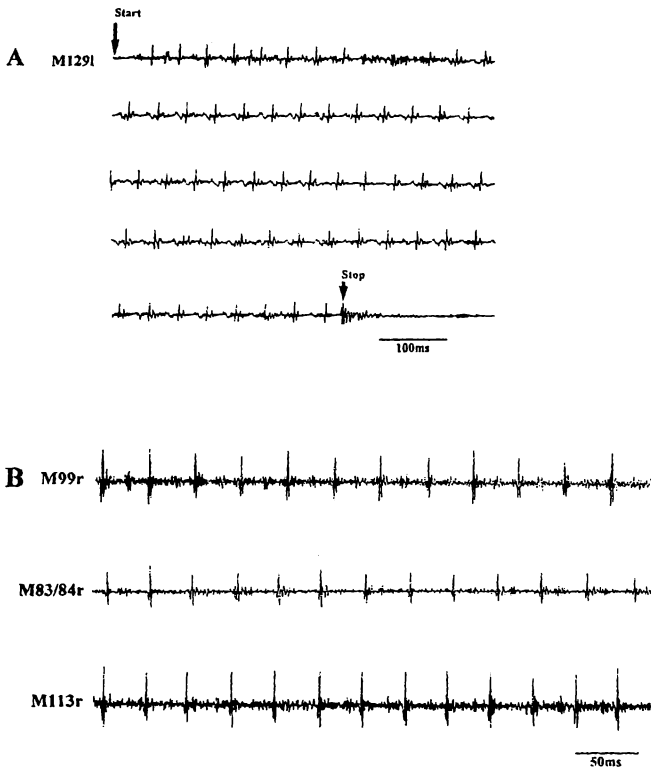


Abb. 4: Radiotelemetrisch übertragene Aktivitäten von verschiedenen Muskeln während des Freifluges von *Schistocerca gregaria* (♀). **A** Gesamtflug (ca. 2.5 s), Muskelpotentiale eines Abschlagmuskels (M129) des Hinterflügels; **B** Ausschnitte aus längeren Sequenzen von diversen Muskeln des Vorderflügels (M99; M83/84) und des Hinterflügels (M113).

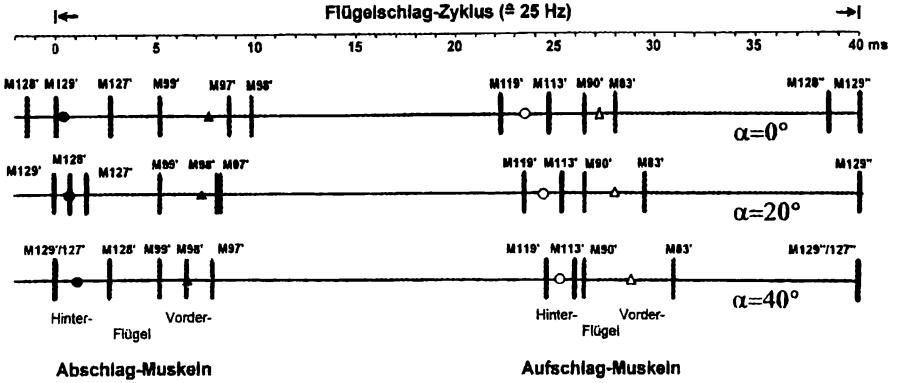


Abb. 5: Zeitlicher Einsatz identifizierter Muskeln (Flügelaufschlag- bzw. abschlagmuskeln) während eines Flügelschlagzyklus, jeweils in Bezug zu unterschiedlichen Steigwinkeln (α) des Tieres. U.a. zeigt sich: a) daß sich die zeitliche Aufeinanderfolge bestimmter Muskeln (s. z.B. M128 vs. M129) verschiebt und b) daß sich das Zeitintervall vom Einsatz der Abschlag- zum Einsatz der Aufschlagmuskeln mit steigendem Flugwinkel (α) verlängert, d.h. der Anteil des Abschlages im Gesamtzyklus verlängert sich auf Kosten des Aufschlages. ○ Kreise, Δ Dreiecke mittlerer zeitlicher Einsatz der Hinterflügel- bzw. Vorderflügel-muskeln. Modifiziert n. FISCHER, 1998.

4. Stimulation

Im Prinzip kann jeder elektronische Datentransfer auch in der Gegenrichtung ablaufen; d.h. vom Sender aufgefangene und zum Empfänger übertragene Signale könnten auch wieder in die Gegenrichtung zurückgesendet werden. Ein solches System könnte eine ferngesteuerte Stimulation des Tieres erlauben.

Stimulationen bei Insekten, die zu spezifischem Verhalten führten, lassen sich vor allem auf die Arbeiten von HUBER (1960) bei Grillen zurückführen, die dann für große Heuschrecken von ROWELL (1963) weitergeführt wurden. Alle diese Studien bis in die letzte Zeit (s. z.B. HEDWIG & HEINRICH, 1997) waren aber dadurch begrenzt, daß die Tiere in ihren Bewegungsmöglichkeiten eingengt waren. Im biomedizinischen Bereich sind bereits viele und wichtige Entwicklungen auf dem Sektor der Stimulation vorangetrieben worden (HEIDUSCHKA & THANOS, 1998). Für Tiere, insbesondere die Gruppe der Insekten, fehlt dieser Ansatz aber weitgehend. Gerade zum Verständnis neuronaler Interaktionen wäre es von großem Interesse, das Nervensystem lokalisiert zu stimulieren und dabei unterschiedlichste Reizmuster einzusetzen. Läßt sich die Laufbahn, die Flugbahn eines Insektes beeinflussen? Welche Zentren sind dabei involviert? Wie reagiert ein solches Tier auf seine Art-

genossen, und wie diese? Welche Reize sind wichtig bei der Arterkennung/Partnerfindung, welche bei der Räubermeidung? Welche Bedeutung haben modulatorische Substanzen, die mengen- und zeitmäßig gezielt in den Kreislauf (bzw. die Hämolymphe) oder in spezifische Abschnitte des Nervensystems appliziert werden können? Hier steht noch ein großes Feld offen. Es sollten aber vermehrt Anstrengungen, auch unter stimulatorischen Aspekten, getätigt werden, um die Bedeutung bestimmter Verhaltenssequenzen aufzuklären.

5. Schlußgedanken

In einem Essay zu "Aufgaben und Zukunft der Biologie" schrieb FLOREY (1972): "Der Systemcharakter des Organismus und insbesondere die Eigenheiten des Individuums und der Art sind das eigentliche Objekt der Biologie". Um Biologie zu erfassen, zu verstehen, um das Phänomen des "Lebens" in seinen Grundlagen und seiner ganzen Breite zu begreifen, müssen intakte Systeme studiert werden und deren Modifizierbarkeit anhand spezifischer (insbes. externer) Gegebenheiten. All das erfordert den "intakten Ansatz". Um physiko-chemische Prozesse zu analysieren, kann man/muß man isolierte Organsysteme, Zellen, Zellkompartimente studieren. Die Evolution aber ist nur möglich durch eine Gestaltung des lebenden Gesamtorganismus durch seine Umgebung. Telemetrie mit ihrem ganzheitlichen Konzept ist demnach eine der wesentlichen Ansätze um "das Leben" mit all seinen Facetten zu verstehen.

Danksagung

All diese Erkundungen in ein neues Gebiet der Biologie wären undenkbar ohne die ständige Diskussion mit und tatkräftige Unterstützung durch meine Mitarbeiter und Kollegen. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft sei Dank für Ihre kontinuierliche Förderung. Danken möchte ich auch Frau R. Gimmi für die Erstellung dieses Manuskriptes.

6. Literatur

- AMLANER, C.J. & MACDONALD, D.W. (eds.) (1980) A Handbook on Biotelemetry and Radio Tracking. Pergamon, Oxford.
- BELTON, P. (1986) Sounds of insects in flight. In: "Insect Flight" (Danthanarayana, W., ed.), pp. 60-70. Springer, Berlin.
- BURROWS, M. (1996) The Neurobiology of an Insect Brain. Univ. Press, Oxford.
- DRAKE, V.A. & FARROW, R.A. (1988) The influence of atmospheric structure and motions on insect migration. *Ann. Rev. Entom.* 33, 183-210.
- FISCHER, H. (1998) Untersuchungen zur Verhaltensphysiologie frei fliegender Heuschrecken unter Einsatz von Telemetrie. Doktorarbeit, Universität Konstanz. UFO-Atelier, Allensbach.
- FISCHER, H. & EBERT, E. (1999) Tegula function during free locust flight in relation to motor pattern, flight speed and aerodynamic output. *J. exp. Biol.* 202, 711-721.
- FLOREY, E. (1972) Aufgaben und Zukunft der Biologie. Univ. Verlag, Konstanz.

- HEDWIG, B. & HEINRICH, R. (1997) Identified descending brain neurons control different stridulatory motor patterns in an acridid grasshopper. *J. comp. Physiol.* **180**, 285-294.
- HEIDUSCHKA, P. & THANOS, S. (1998) Implantable bioelectronic interfaces for lost nerve functions. *Progr. Neurobiol.* **55**, 433-461.
- HUBER, F. (1960) Untersuchungen über die Funktion des Zentralnervensystems und insbesondere des Gehirnes bei der Fortbewegung und der Lauterzeugung der Grillen. *Z. vergl. Physiol.* **44**, 60-132.
- JENSEN, M. (1956) Biology and physics of locust flight. III. The aerodynamics of locust flight. *Phil. Trans. R. Soc. London B* **239**, 511-552.
- KUTSCH, W. (1999) Telemetry in insects: the "intact animal approach". *Theory Biosci.* **118**, 29-53.
- KUTSCH, W., SCHWARZ, G., FISCHER, H. & KAUTZ, H. (1993) Wireless transmission of muscle potentials during free flight of a locust. *J. exp. Biol.* **185**, 367-373.
- KUTSCH, W., VAN DER WALL, M. & FISCHER, H. (1999) Analysis of free forward flight of *Schistocerca gregaria* employing telemetric transmission of muscle potentials. *J. exp. Zool.* **284**, 119-129.
- RAINEY, R.C. (1967) Radar observation of locust swarms. *Science* **157**, 98-99.
- REYNOLDS, D. (1988) Twenty years of radar entomology. *Antenna* **12**, 44-49.
- RILEY, J.R. (1974) Radar observations of individual desert locust (*Schistocerca gregaria*)(Forsk.)(Orthoptera, Locustidae). *Bull. Entom. Res.* **64**, 19-32.
- RILEY, J.R. (1989) Remote sensing in entomology. *Ann. Rev. Entom.* **34**, 247-271.
- RILEY, J.R., VALEUR, P., SMITH, A.D., REYNOLDS, D.R., POPPY, G.M. & LÖFSTEDT, C. (1998) Harmonic radar as a means of tracking the pheromone-finding and pheromone-following flight of male moths. *J. Insect Behav.* **11**, 287-296.
- RILEY, J.R., SMITH, A.D., REYNOLDS, D.R., EDWARDS, A.S., OSBORNE, J.V., WILLIAMS, I.H., CARRECK, N.I. & POPPY, G.M. (1996) Tracking bees with harmonic radar. *Nature* **379**, 29-30.
- ROWELL, C.H.F. (1963) A method for chronically implanting stimulating electrodes into the brains of locusts, and some results of stimulation. *J. exp. Biol.* **40**, 271-284.
- SCHAEFER, G.W. (1976) Radar observation in insect flight. In: "Insect Flight" (RAINEY, R.C., ed.), pp. 157-197, Blackwell, Oxford.
- SMITH, A.D., RILEY, J.R. & GREGORY, P.D. (1993) A method for routine monitoring of the aerial migration of insects by using a vertical-looking radar. *Phil. Trans. R. Soc. London B* **340**, 393-404.
- WEIS-FOGH, T. (1956a) Biology and physics of locust flight. II. Flight performance of the desert locust (*Schistocerca gregaria*). *Phil. Trans. R. Soc. London B* **239**, 459-510.
- WEIS-FOGH, T. (1956b) Biology and physics of locust flight. IV. Notes on sensory mechanisms in locust flight. *Phil. Trans. R. Soc. London B* **239**, 553-584.

- WILSON, D.M. & WEIS-FOGH, T. (1962) Patterned activity of co-ordinated motor units, studied in flying locusts. *J. exp. Biol.* 39, 643-667.
- WINTER, Y. (1998) Construction of electronic hybrid microcircuits: a 350 mg ECG transmitter. In: "Biotelemetry XIV" (PENZEL, T., SALMONS, S. & NEUMANN, M., eds.), pp. 65-70. Tectum, Marburg.

Prof. Dr. Wolfram Kutsch
Fakultät für Biologie, Universität
Postfach 5560<M624>
D 78457 Konstanz
e-mail: Wolfram.Kutsch@uni-konstanz.de

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Verhandlungen des Westdeutschen Entomologentag Düsseldorf](#)

Jahr/Year: 2000

Band/Volume: [1998](#)

Autor(en)/Author(s): Kutsch Wolfram

Artikel/Article: [Telemetrie bei frei fliegenden Insekten \(Orthoptera: Saltatoria\) 33-44](#)