

Nr. 6
Juni
1986

D 6792 E

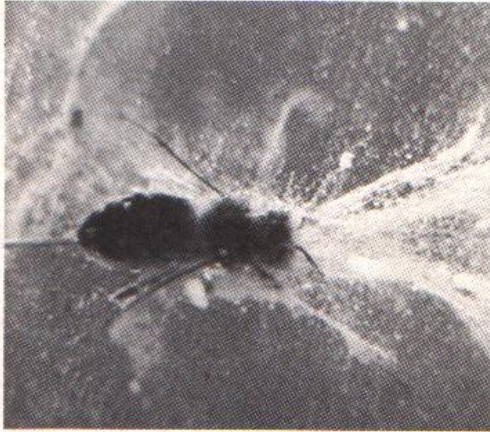
DIE UMSCHAU

FORSCHUNG · ENTWICKLUNG · TECHNOLOGIE



Elektromagnetische Felder bei Vögeln und Insekten
Challenger-Katastrophe · Mikromilieu bösartiger Tumoren
Propfan — neues Triebwerkskonzept für Flugzeuge
Umweltanalytik

Titelbild: Relevanz elektrischer Biofelder



Es gibt nicht nur „elektrische“ Fische – auch bei Landtieren treten elektrische Felder auf, die bei verschiedenen Insekten, Vögeln und Felltieren relativ hohe Amplituden erreichen (bis $> 1000 \text{ V/cm}$). Elektromagnetische Felder spielen z. B. beim Formationsflug der Vögel eine Rolle; sie dienen als Navigationshilfe und bestimmen die Position der Einzeltiere im Schwarm. Bienen werden unter Einwirkung relativ starker elektrischer Wechselfelder aggressiv und finden oft nicht mehr zum Stock zurück; andererseits benötigen sie zwingend eine eigene elektrostatische Ladung, um ihre Aktivitäten aufrechtzuerhalten (unser Titelbild zeigt die „Spitzenfeldwirkung“ an den Antennen einer Honigbiene). **Seite 336**

UMSCHAU 1986 · Heft 6

Copyright Dr.rer.nat. Ulrich Warnke

Relevanz elektrischer Biofelder

Elektromagnetische Felder spielen auch beim Formationsflug der Vögel eine wesentliche Rolle; sie dienen als Navigationshilfe und bestimmen die Position der Einzeltiere im Schwarm. Abhängig von Flügelbreite, Spannweite, Körperlänge usw. beeinflussen – so die Hypothese – die biophysikalischen Verhältnisse die arttypische V-Formation des Schwarmfluges. Computerberechnungen der „Flugordnung“ ergaben eine gute Übereinstimmung mit den in der Natur gemachten Beobachtungen.

Stark- und schwachelektrische Fische sind heute allgemein gut bekannt. Wenig bekannt ist aber die Erscheinung, daß alle Fische, also auch sogenannte nichtelektrische Fische, von einem dipolartigen Gleichstromfeld umgeben sind. Dieses Feld wird durch mechanische Atembewegungen moduliert. Es hat biologische Bedeutung und dient den phylogenetisch niedrig stehenden Arten wie Hai, Rochen und Stör als Beutesignal. So kann eine vom Sand überdeckte Scholle am Meeresboden passiv über ihr elektrisches Feld von vorbeischwimmenden Räubern geortet werden. Einige evolutiv höher stehende Fische im Süß- und Salzwasser spezialisierten die elektrische Felderzeugung und -perzeption sowohl zur Ortung aller Materie als auch zur interspezifischen Kommunikation. Fischwanderschwärme scheinen den Zusammenhalt durch das gemeinsame elektrische Feld zu finden, und sie verwenden wahrscheinlich bestimmte Potentialniveaus im Meer zur Navigation. Verblüffend dabei ist die äußerst geringe

Energie, die vereinzelt zur Auslösung eines Perzeptionsvorganges nötig ist ($\leq 5 \text{ nV/cm}$).

Aber auch bei Landtieren treten elektrische Felder auf, die besonders bei verschiedenen Insekten, Vögeln und Felltieren relativ hohe Amplituden erreichen (bis $> 1000 \text{ V/cm}$). Diese Biofelder sind auf dem Land ein physiologisch relevanter Faktor.

Die Frage, ob konvergente elektrische Erscheinungen des im Wasser bewährten Informationsaustausches auch auf dem Land entwickelt wurden, enthält faszinierende Forschungsaspekte.

Seit der Entstehung von Lebewesen auf dem Land sind atmosphärisch-elektrische und magnetische Felder, elektromagnetische Schwingungen und Luftionen feste meteorologisch oder extraterrestrisch korrelierte Größen im Lebensraum. Es erscheint eher unwahrscheinlich, daß die Informationsmöglichkeiten dieser Leitgrößen ungenutzt geblieben sind.

Die Verwendung exogener elektrischer oder magnetischer Energie als regulierende Informationsquelle könnte besonders dann eine Rolle spielen, wenn mehrere hochentwickelte Sinnesreizekanäle keine Signale mehr empfangen oder auch, wenn räumlich-zeitlich ungestörte Feldverhältnisse vorliegen, z. B. bei Vogelwanderungen in großer Höhe, nachts oder über ausgedehnten Meeresflächen.

Elektrische Aufladung der Tiere

Zieht man eine Vogelfeder durch die Luft, entsteht eine nachweisbare elektrostatische Aufladung, vorausgesetzt, in der Luft sind schwebende Ladungsträger vorhanden.

Wenn ein Vogel in der Luft fliegt oder auch nur auf einem Ast sitzt, werden die Vorgänge allerdings weit komplizierter. Unter natürlichen Verhältnissen spielen sehr viele voneinander abhängige und miteinander verknüpfte Variablen eine Rolle, die bei quantitativer Betrachtung einzeln in Größe und Zeitabhängigkeit registriert werden müßten.

Der Aufwand übersteigt die vorhandenen Meßkapazitäten. Aus diesem Grunde untersucht man Tiere und auch Modelle im Labor bei definiert veränderbaren Parametern, die physiologische Verhältnisse simulieren. Die Ergebnisse lassen Prinzip und Abhängigkeiten der elektrostatischen Aufladung von Insekten, Vögeln und Säugern erkennen, geben aber nur entfernte Werte der absoluten Größen.

Elektrische Felder mit größerer Amplitude lassen sich bei Tieren nur dann nachweisen, wenn unipolar getrennte Ladungen als Ursache der Felder nicht laufend wieder neutralisiert werden. Die Ladungsneutralisation ist vor allem eine Funktion der Ladungsbeweglichkeit auf der Körperoberfläche und zum Körperinneren.

Alle landlebenden Insekten mit Cuticula sowie Tierarten mit Schuppen, Schildern, Federn, Haaren haben mit diesen Hautorganen Flächen ausgebildet, die hervorragende elektrische Isolatoreigenschaften besitzen (10^{10} bis $10^{14} \Omega \text{ cm}$).

Im Rasterelektronenmikroskop lassen sich Areale der Leitfähigkeitsunterschiede bei unbehandelten weitgehend frischen Präparaten geeigneter Strukturen anhand des Probenstrombildes optisch wirkungsvoll darstellen (Bild 1).

Für jede Tierart ergibt sich auf der Körperoberfläche ein typisches Mosaik unterschiedlicher Leitfähigkeiten, mit spezifischen scharfen Begrenzungen. Dieses Mosaik deckt sich weitgehend mit dem Oberflächenladungsmuster; Änderungen dieser Muster sind entweder durch elektrisch aktive Sekretabsonderungen bedingt, durch Bewegungsmomente oder aber durch physikalische Umweltparameter. So bewirkt hohe relative Feuchte hohe Leitfähigkeit einzelner Körperoberflächenareale infolge eines adhäsiv angelagerten Flüssigkeitshäutchens. Zugeführte Wärme erhöht bei allen hier betrachteten Körperoberflächen drastisch die Leitfähigkeit, entsprechend den Verhältnissen bei Elektrolyten und Halbleitern. In geringerem Maße haben auch Lichtintensitätsverschiebung und Luftionenkonzentrationsunterschiede einen Einfluß.

Hinsichtlich der statischen Aufladung von Teilen des inneren Elektrolytmaterials von Tieren am Boden ist neben der allgemeinen Leitfähigkeit der Körperoberfläche vor allem wichtig, wie die Kontaktstellen zur Erde (= Elektronendonator) beschaffen sind. Tiere mit Schweiß-, Duft- und Haftdrüsen an den Laufflächen gewähren einen hervorragenden galvanischen Kontakt. Tiere dagegen, die auf Hufen, Zehen oder Krallen laufen, sind gegen Erde weitgehend isoliert. Eine interessante Beson-

Dr. Ulrich Warnke, Universität des Saarlandes, Fachrichtung Zoologie, 6600 Saarbrücken, Tel. (06 81) 3 02 24 11

derheit ist bei verschiedenen Insekten zu beobachten. Fliegen, Bienen u. a. besitzen an den Füßen zwischen zwei Krallen ein drüsiges Haftläppchen (Arolium). Dieses Haftläppchen kann beim Laufen beliebig ausgeklappt oder eingefaltet werden. Im gefalteten Zustand des Aroliums laufen die Tiere auf den Krallen; in diesem Fall sind sie gegenüber der Umwelt elektrisch isoliert und können ihre Elektrolyten statisch aufladen. Berührt aber das ausgeklappte Haftläppchen die Lauffläche, so nimmt das Insekt schlagartig das Potential der Lauffläche an. Dies geschieht bei Bienen kurz vor dem Start von einer Blüte, wobei bestimmte Teile des Tieres entladen oder umgeladen werden, zum Teil mit Polaritätswechsel. Da Blüten auf Erdpotential liegen, wird das Insekt über den „Aroliumschalter“ gewissermaßen nach Norm gepolt.

Basisladung durch Kontaktelektrizität

Die Basisladung erhalten Insekten und Vögel durch Kontaktelektrizität; dabei müssen zwei Vorgänge getrennt betrachtet werden: die Berührungsspannungen von dem Tieroberflächenmaterial (Keratin, Chitin, wachsartige Substanzen) mit den umgebenden Luftschichten und die Berührungsspannungen zwischen den einzelnen Körperstrukturen.

Bei der Berührung zweier Oberflächen bis auf molekularen Abstand (10^{-10} m) findet eine Trennung der positiven und negativen Ladungen statt, indem an den Berührungspunkten eine bestimmte Ladungsmenge übertritt. Die Größe des Ladungswechsels hängt gesetzmäßig von drei physikalischen Materialgrößen ab: der Ionisationsenergie, der thermischen Austrittsarbeit für Elektronen und der Elektronenaffinität. Bei Entfernung der Oberflächen voneinander bleibt die örtliche Überschußladung längere Zeit erhalten, wenn der Oberflächenwiderstand nicht kleiner $10^{10} \Omega$ wird.

Durch Reibung werden größere Teile der Oberflächen trotz ihrer unvermeidlichen mechanischen Unebenheiten in enge Berührung gebracht, wobei entsprechend höhere Aufladungen entstehen. Die „Reibungselektrizität“ gehört zu den ältesten Beobachtungen der Menschheit über elektrische Vorgänge und hat dem ganzen Bereich den Namen gegeben (elektron; griech. Wort für Bernstein). Es ist deshalb erstaunlich, daß sie bei Tieren im natürlichen Lebensraum bisher kaum Beachtung fand.



Bild 1: Elektrisches Strombild eines frisch excerptierten Insektenflügels (Biene) im Rasterelektronenmikroskop. Helle Strukturen entsprechen einer hohen Elektronenleitfähigkeit, dunkle Flächen einem hohen elektrischen Widerstand (nach [2]).

Betrachtet man vorerst nur die Kontaktelektrizität zwischen den einzelnen Körperstrukturen, so ergibt sich insgesamt folgendes Bild:

Die Struktur der Körperoberfläche mit größerer Dielektrizitätskonstante (DK) lädt sich positiv gegenüber der mit kleinerer DK auf. Behaarte Flächen laden sich positiv bei Kontakt mit unbehaarten oder beschuppten Flächen auf, die dann negativ geladen werden. Gleichartige Körperstrukturen laden sich

nur dann auf, wenn die Berührungsflächen in der Größe unterschiedlich sind. Die größere Fläche wird dabei positiv geladen.

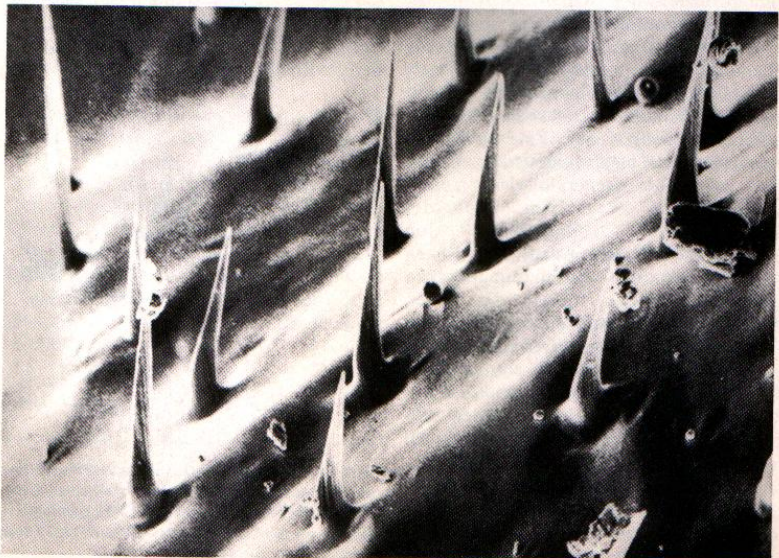
Als relevante Beispiele sollen einige meßbare Phänomene dargestellt werden:

Während des Fluges erhält das Deckgefieder bei Vögeln durch Reibung mit den Flaumfedern positive Ladung, die Flaumfedern dagegen negative ($Q \approx 10^{-9}$ As). Vögel haben die Angewohnheit, ihre Schwungfedern durch den Schnabel zu ziehen. Die Schwungfedern laden sich dabei positiv auf ($Q \approx 10^{-10}$ As). Bienen ziehen ihre Antennen regelmäßig durch eine „Putzscharte“ (Antennen-cleaner) an den vorderen Extremitäten. Die Antenne lädt sich dabei positiv auf ($P \approx 1,3$ V). Wenn sich Mäuse mit beiden Vorderextremitäten die Körperpartien putzen, erhalten diese Partien eine positive Überschußladung ($P \approx 1$ V).

Die Berührungsspannung hat nur dann eine reproduzierbare Größe, wenn die Vorgänge unter konstanten Bedingungen ablaufen. Ändern sich die Parameter, besonders der Wasserdampfgehalt der Luft, nehmen die Spannungen völlig andere Werte an und können sogar das Vorzeichen ändern.

Die Berührungsspannung erreicht bei elektrisch isolierten Tierkörpern oft hohe Werte. Sämtliche Ladungsträger in der Umgebungsluft, die in einer bestimmten Zeit angeliefert werden, können durch die hohen Coulombschen Kräfte, die unter den beschriebenen Umständen vom Tier ausgehen, in einem gleichen

Bild 2: Topographie eines Bienenflügels. Die hakenförmigen Auswüchse dienen als Vortex-Generatoren zur lokalen Turbulenzerzeugung während des Fluges. Dabei werden elektrische Doppelschichten auseinandergerissen und hohe Werte von Raumladungen freigesetzt. Gleichzeitig sind an den einzelnen Mikrospitzen hohe Feldstärken nachweisbar.



Zeitelement angezogen oder abgestoßen werden. Der Entladungsstrom kann in diesem Fall nicht mehr ansteigen und befindet sich auf einem Sättigungsniveau. Wird die Elektrizitätserzeugung in diesem Stadium nicht unterbunden, so treten erhöhte Überspannungen auf, die infolge der korrelierten sehr hohen Kräfteentwicklung auf kleinstem Raum (pro 1 cm^2 Größenordnung von Kilopond) mechanisch-physiologische Stimulierung hervorrufen können, z. B. zwischen Skleriten und Membranen an der Insekten cuticula oder zwischen Nasenelektrolyt und Fell bei Säugern.

Besonders wichtig ist derjenige Teil der Kontaktelektrizität, der von der Berührung zwischen Tier und Luft ausgeht. Zwei entscheidende Zustände sind auseinanderzuhalten: Tier in Ruhe und Tier im Flug.

Befindet sich das Tier in Ruhe, so erstreckt sich die Grenzschicht der Berührungsspannung bis zur Tiefe einiger Moleküldurchmesser in die atmosphärische Luft hinein; es bildet sich eine diffuse Raumladung um das Tier herum, die nach außen elektrische Neutralität vortäuscht.

Diese Situation ändert sich jedoch gravierend, wenn äußere Kräfte dieses Gleichgewichtssystem beeinflussen. Im Fall des fliegenden Tieres wirken gleichzeitig mehrere derartige Störkräfte massiv ein:

- eine Strömung der Luftphase relativ zur Grenzfläche
- ein elektrostatisches Feld, zusammengesetzt aus exogenen luftelektrischen Größen und Körperanhangselektrizität wie der beschriebene Gefieder-Generator
- Turbulenzen mit vollständigem Abriß der elektrischen Schichtung an diversen Unebenheiten der Oberflächen (z. B. Vortex-Generatoren, Bild 2).

In allen diesen Fällen werden die Ladungsträger besonders des diffusen Teiles der Doppelschicht abgerissen, und die Grenzfläche weist fortwährend ungesättigte Ladungen auf. Es entsteht ein kalkulierbares elektrokinetisches Potential mit hoher Generatorwirkung. Ein Gleichgewicht ist erreicht, wenn der zurücklaufende Leitungsstrom den erzeugten Konvektionsstrom zwischen den getrennten Raumladungswolken gerade ausgleicht. Infolge der hohen Widerstandsverhältnisse von Luft einerseits und Insektenoberfläche sowie Vogelgefieder andererseits sind Relaxationsprozesse äußerst träge, und dementsprechend werden die Feldstärken sehr hoch (Meßbeispiel Taube im Windkanal mit ionisierter Luft: $E > 1000 \text{ V/cm}$).

Da die beschriebenen Störkräfte der elektrischen Doppelschichten ihre maximale Entfaltung am Flügel der Tiere erreichen, sind die Flügel von fliegenden

Insekten und Vögeln mit ihrer Umgebung als elektrische Feldgeneratoren wirksam, die nach außen relativ starke Coulombsche Kräfte entwickeln.

Was bewirken die atmosphärisch-elektrischen Komponenten bei fliegenden Tieren?

Vögel haben ihr Nest meist in Baumhöhlen oder unter dem Blätterdach auf einem Ast. Beide Plätze sind über die Leitfähigkeit der Bäume galvanisch mit der Erde verbunden und beinahe ideal abgeschirmt gegen das elektrostatische atmosphärisch-elektrische Feld. Der spezifische Widerstand der Luft beträgt im Durchschnitt $10^{15} \Omega \text{ cm}$ gegenüber ca. $10^5 \Omega \text{ cm}$ bei Pflanzen oder relativ trockenem Erdbreich. Pflanzen stellen also, verglichen mit dem hochisolierenden Luftraum, praktisch Leiter dar, an denen ein luftelektrisches Feld restlos zusammenbricht.

Fliegen die Tiere aber in den freien Himmel, so begegnen sie exogenen elektrischen Strömen und elektrischen Kräften. Gleiches gilt für Insekten, die z. B. aus einer Wiese in den freien Himmel starten. Während des Fluges wird der Körper der Tiere in kompliziertem Zusammenspiel abhängiger und unabhängiger Komponenten beeinflusst: aufgeladen, umgeladen, entladen, dielektrisch polarisiert.

Die Polarisierung entsteht durch das atmosphärische Gleichspannungsfeld, indem die Ladungen im Tierkörper derart verschoben werden, daß schließlich ein Dipol induziert ist, dessen Moment in der Richtung des elektrischen Erregungsfeldes, also vertikal verläuft. Das Potential in der Umgebung des Tieres entspricht dem Potential des polarisierenden Feldes zuzüglich einem Potentialanteil durch den Tierdipol und dem Potential der Tiereigenladung. Der Ladungsausgleich erfolgt entsprechend der Ionendichte durch einen Leitungsstrom mit einer definierten Zeitkonstanten, die direkt wetterkorreliert ist und relativ einfach sowohl gemessen als auch berechnet werden kann. Dabei zeigt sich, daß bei „schönem Wetter“ das Tier relativ lange geladen bleibt, während es bei „Gewitteraufzug“ in kurzer Zeit entladen wird. Bis zu einem reduzierten Potentialgefälle von einem Prozent ergeben sich Werte von $t_s \approx 50$ Minuten zu $t_G \approx 5$ Minuten.

Bei Exposition eines Tieres am Boden zum elektrischen Feld wird der Körper – wie bei Tieren im Flug – beeinflusst. Geht die Influenz von positiven Ladungen aus, so werden negative vom Tier gebunden. Die positiven Konterladungen, die ehemals zusammen mit den negativen Ladungen eine Neutralisation des Körpers bewirkten, sind frei und können über die Extremitäten von der Erde her innerhalb einer bestimmten Zeit ausgeglichen werden (Bild 3). Gleichzeitig fließen laufend, entsprechend dem Potentialgefälle, positive Ionen in Form eines Leitungsstromes zum Tier. Diese Ströme sind mehrere Zehnerpotenzen geringer

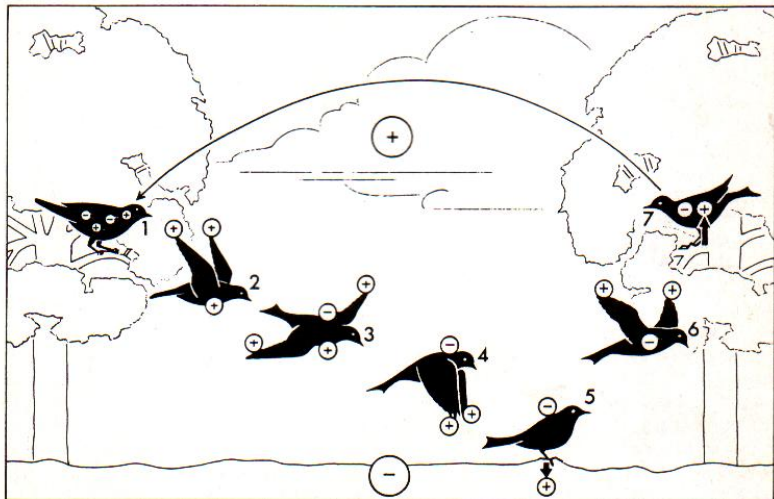
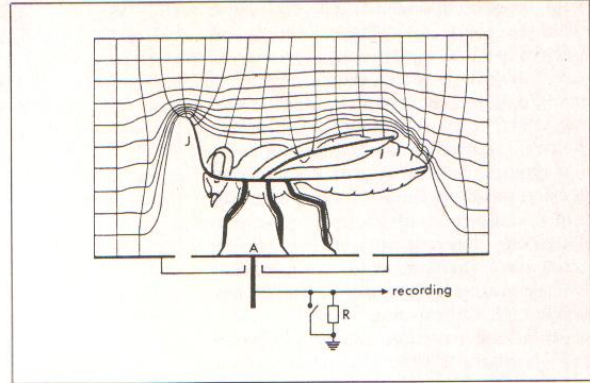
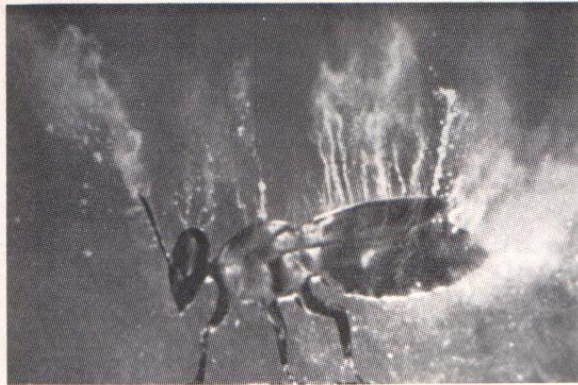


Bild 3: Elektrische Aufladung und Polarisation eines Vogels (analog zu einem fliegenden Insekt) durch Kontaktelektrizität und elektrostatische Dipolinduzierung im natürlichen atmosphärisch-elektrischen Kondensatorfeld. Freie Ladungen werden bei Erdkontakt neutralisiert (Vogel 1, 5, 7); Bäume wirken elektrisch abschirmend (1,7); hohe statische Ladung wird während des Fluges produziert (2, 3, 4, 6) (nach [2]).



als die physiologischen Ströme. Sie erscheinen somit biologisch wirkungslos. Aber die meisten Insekten haben innerierte Antennen, die über die Körperoberfläche ragen. An den Spitzen der Antennen können unter Umständen derart hohe Feldstärken auftreten – anschaulich dargestellt durch eine intensive Bündelung der Feldlinien (Bild 4) –, daß Ionen infolge starker Beschleunigung an diesen Stellen Spitzenströme erzeugen. Ein gemessener Summenstromwert von 10^{-8} A bei einem Kondensatorfeld von 5000 V/m lassen Stromdichten erwarten, die eine physiologische Erregung einleiten.

Mit Hilfe fein zerstäubter geladener C_s -Aerosole konnte röntgenmikroskopisch nachgewiesen werden, daß auch an den Mikrospitzen des Insektenkörpers prinzipiell ähnliche Vorgänge stattfinden. Erfolgt der Zustrom neuer Ladungen aus der Luft zur Körperoberfläche schneller als die Neutralisation von der Erde her, so lädt sich der Körper oder Teile des Körpers auf, bis das Potentialgefälle zur Umgebung Null wird. Die Zeit für einen vollständigen Potentialausgleich ist auch hier korreliert mit der Zeitkonstanten der bodennahen Atmosphäre und mit der Oberflächengröße des Versuchstieres (z. B. Maus $\tau > 30$ Minuten).

Neben der Elektrizitätserzeugung durch Influenz, Polarisation und sog. Reibung oder Berührung sind noch andere Mechanismen bei Lebewesen von Bedeutung wie der piezo- und pyroelektrische Effekt. An diversen organischen Geweben, wie Keratin-, Kollagen-, Cellulose- und Chitinstrukturen des Vertebrateninteguments sowie des Athropodeninteguments, sind bei Druck oder Dehnung in bestimmten Richtungen sowie bei Torsion Ladungen meßbar. Bei Vertauschung von Kompression und Dilatation ändert sich das Vorzeichen der Ladung. Die Größe der mechanischen Belastung ist proportional der Ladungserzeugung. Alle Gewebe, bei

Bild 4: Elektrische Kraftverhältnisse am Insektenkörper-Modell. Exponierte Teile des Körpers (Antennen, Flügelspitzen und Mikrospitzen) bewirken eine Feldfokussierung und hohe Spitzenströme. Flächen mit relativ niedrigem Widerstand zur Erde ergeben einen ähnlichen Effekt.

denen sich piezoelektrische Effekte nachweisen lassen, sind gleichzeitig pyroelektrisch wirksam, wobei durch Erwärmung und Abkühlung elektrische Ladungen mit entsprechender Umkehrung der Vorzeichen auftreten. Diesen Effekten liegen permanente Dipolmomente zugrunde, die in Ruhestellung des Gewebes durch Oberflächenladungen nach außen kompensiert werden. Erst wenn durch mechanische Einwirkung oder Temperaturveränderung das molekulare elektrische Moment der Gewebestrukturen verändert wird, reicht die Oberflächenladung, die dabei unverändert bleibt, nicht mehr aus, um die elektrische Wirkung völlig zu kompensieren.

Auf einen aktiv herbeigeführten piezoelektrischen Effekt führen wir z. B. das seltsame Phänomen einer plötzlichen Umpolung einer Antenne oder auch beider Antennen der Bienen zurück, oftmals kurz vor dem Abflug.

Viele biologische Abschlußgewebe sind mit einer wachsartigen Schutzschicht versehen. Diese Schutzschicht kann ebenfalls eine permanente elektrische Dipolstruktur aufweisen, die den physikalischen Gesetzmäßigkeiten eines Electretes folgt. Schließlich sei der Vollständigkeit halber noch ohne weitere Ausführungen ein nachweisbarer äußerer Fotoeffekt an der Insektencuticula erwähnt.

Biologische Relevanz elektrischer Felder

Fragt man nach dem Sinn einer aus verschiedenen physikalischen Komponenten zusammengesetzten elektrostati-

schen Aufladung der Körperoberfläche, so sind bei einigen Insekten einerseits und bei Vögeln und fellsbesetzten Säugern andererseits seit längerer Zeit zwei Effekte bekannt. Bei pollensuchenden Insekten wird der Sammelertrag und die Verbreitung des Pollens über die elektrischen Anziehungskräfte von positiv geladener Körperoberfläche und meistens negativ geladenem Pollen vergrößert.

Bei Vögeln und Säugern wird über elektrostatische Kräfte indirekt der Wärmehaushalt optimiert. Dies geschieht dadurch, daß die einzelnen Dunen bzw. Grannenhaare sich durch Reibung an den Deckfedern bzw. Wollhaaren elektrostatisch negativ aufladen und sich dann bei gleicher Ladungspolarität untereinander abstoßen. Sie füllen auf diese Weise die körpernahe Schicht so vollständig aus, daß die Luftkonvektion nahezu vollständig zum Erliegen kommt, wobei die Körperwärme erhalten bleibt. Verstärkt wird der Wärmeeffekt dadurch, daß sich das entgegengesetzt (d. h. positiv) geladene Deckgefieder bzw. Wollhaar mit Hilfe elektrischer Anziehungskräfte fest über die diffus aufgelockerte Unterschicht legt.

Wir konnten eine Reihe weiterer biologisch sinnvoller Effekte finden, die allerdings in einigen Fällen noch nicht frei von hypothetischen Konstruktionen sind.

Versuche mit Bienen

In Laborversuchen und im Freien wurde die Wirkung von elektrischen Feldern auf das Verhalten von Bienenvölkern untersucht. Bei ca. 110 V/cm, 50 Hz, sind die Bienen sehr unruhig; die Temperatur im Volk erhöht sich stark. Die Verteidigung des Sozialterritoriums wird derart gesteigert, daß Individuen eines Volkes sich gegenseitig abstechen. Nach einigen Tagen Feldeinfluß reißen die Bienen ihre Brut aus den Zellen, neue

Brut wird nicht mehr angelegt. Ebenso werden Honig und Pollen verbraucht und nicht mehr eingetragen. Bienen, die erst kurze Zeit vor Versuchsbeginn in ihre Kästen gesetzt wurden, ziehen während der Einwirkung des elektrischen Feldes regelmäßig wieder aus. Bienen, die dagegen schon längere Zeit an ihre Kästen gewöhnt sind, verkitten alle Ritzen und Löcher mit Propolis; auch das Flugloch. Sauerstoffmangel führt zu intensivem Fächeln, wobei stark erhöhte Temperaturen auftreten und die Bienen schließlich verbrausen.

Bei sehr reizempfindlichen Schwärmen ergeben bereits Feldstärken von ca. 1 V/cm bei Frequenzen zwischen 30 Hz bis 40 kHz ein meßbares Reaktionssignal: Die Tiere bewegen beim Einschalten des Feldes einheitlich schlagartig die Flügel mit 100 bis 150 Hz.

Wenn Bienen bei Einwirkung eines relativ starken elektrischen Wechselfeldes sich gegenseitig nicht mehr erkennen können, so ist möglich, daß die eigenen Informationskanäle gestört werden. Dafür spricht auch die Tatsache, daß Bienen bei verstärkter Atmospheric-Aktivität im 10- bis 20-kHz-Bereich besonders aggressiv werden. Auch fällt an diesen Tagen die Rückkehrrate zum Stock selbst bei sonst vollständig ruhigem Wetter rapide.

Das gleiche Phänomen trifft für einzelne Vogelarten zu. Brieftauben sind ebenfalls dann auffallend desorientiert, wenn eine hohe Atmospheric-Aktivität herrscht oder auch, wenn verschiedene Vogelarten in einen bestimmten Intensitätsbereich eines technischen Senders gelangen.

Man konnte beobachten, daß Zugvogelschwärme sich vor der Trafostation eines Energiewerkes wiederholt geteilt haben, um auf Distanzbahnen um ein unsichtbares Hindernis herumzufliegen und sich anschließend wieder zum Gemeinschaftsflug zu vereinen.

Einige Insektenarten, besonders die Honigbiene, sind als „wetterfühlig“ bekannt. Wetteränderung und Wolkenzug hängen eng zusammen mit Potentialänderungen des natürlichen elektrostatischen Feldes. Diese Potentialänderungen ziehen lokale Ladungsänderungen sowohl beim Einzeltier als auch beim Bienenvolk nach sich. Da Insekten Potentialänderungen der natürlichen Umgebung nachweislich perzipieren können, ist über diesen Kanal eine Information des dynamischen Witterungsverlaufs durchaus wahrscheinlich.

Die circadianen Aktivitätsrhythmen von Bienenvölkern zeigen einige überraschende Besonderheiten. Die Einwirkung hoher unipolarer Luftionenkonzentration sowie elektrischer Wechselfelder geringer Feldstärke (1 V/cm, 180 Hz)

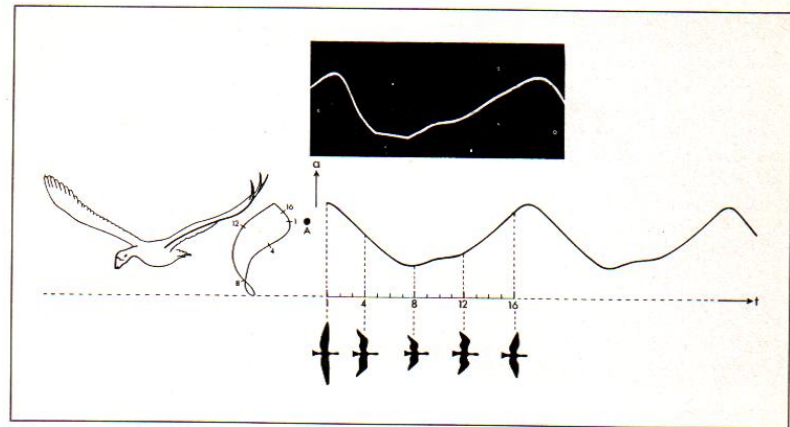


Bild 5: Elektrisches Wechselfeld eines Vogelflügelschlags als Oszillogramm und als geometrische Konstruktion. Die Kurven verlaufen weitgehend parallel (nach [2]).

verschieben innerhalb von drei Tagen die Rhythmik zeitlich gegenüber einer unbehandelten Kontrollgruppe. Aus diesem Grunde sind bestimmte elektrische Felder für Insekten als Zeitgeber denkbar.

Bienen benötigen zwingend eine eigene elektrostatische Ladung. Tiergruppen, die bei relativ hoher Luftfeuchtigkeit in geerdeten Metallkäfigen gehalten werden, verlieren ihre Ladung. Bei diesen Gruppen registriert man neben einer verminderten Laufaktivität eine abnorme gemeinsame Fächelaktivität. Beim Fächeln versuchen die Tiere, sich durch Reibung der Flügel mit der Luft laufend aufzuladen. Wird diesen Tieren eine hohe Konzentration unipolarer Ionenatmosphäre gegeben, die letztlich eine Aufladung der Individuen herbeiführt, so stoppt das Fächeln sofort, und die Laufaktivität steigt. Gleiche kompensierte Reaktion ist erkennbar, wenn Bienen Gruppen statt in geerdeten Metallkäfigen in elektrisch isolierenden PVC-Käfigen gehalten werden.

Auch bei Vögeln ist oft zu beobachten, daß nach einem Wasserbad, das einer weitgehenden Entladung gleichkommt, eine intensive Reibungsaktivität vom Schnabel an den Federn einsetzt, die einmal das Gefieder ordnet und zum anderen die elektrostatische Aufladung forciert.

Jeder elektrostatisch aufgeladene Körper erzeugt während seiner Bewegung bezüglich eines ruhenden Punktes ein definiertes elektrisches Wechselfeld. Ist dieses Wechselfeld über längere Zeit frequenzstabil, so läßt sich eine Informationsübertragung zu anderen Individuen durch einen elektrischen Code nicht ausschließen.

Dies gilt sowohl für den Flug von Insekten und Vögeln (Bild 5) als auch bei sozialen Insektenstaaten für Sterzeln und

Fächeln und für rhythmische Bewegungen von Teilen des Tierkörpers, wie bei allen Formen der Tänze und dem wechselseitigen Antennenbetrillern. Es ist physikalisch unvermeidbar, daß bei benachbarten Individuen eine Influenz bzw. Induktion stattfindet, und es ist auch unschwer nachzuweisen, daß diese Felder tatsächlich aufgenommen und als Signal verwendet werden. Eine besondere Information für Bienen scheint in der Frequenzmodulation 180 Hz bis 250 Hz zu stecken. Dieses Signal wird von alleinsitzenden ausgehungerten Bienen regelmäßig mit Heben der Antennen beantwortet, aber nur dann, wenn es die Feldstärke von 1 V/cm nicht überschreitet.

Bienen, die ihren Stock anfliegen, verändern in typischer Weise das Summenpotential ihres Stockes und adsorbieren rückgekoppelt einen Teil des Potentials einer „Ladungswolke“ vor dem Flugloch. Werden diese Tiere vor ihrer Rückkehr – z. B. durch aufgeladenes Zuckerwasser, das sie trinken – unphysiologisch in Polarität und Größe aufgeladen, so werden sie direkt vor und nach der Landung auf dem Flugbrett von ihren Volksangehörigen stark beachtet.

Die kommunikative Form des Antennenbetrillerns bei Bienen und Ameisen kann oszillographisch registriert werden. Jede kurzfristige Antennenberührung erzeugt im Elektrolytsystem der Empfängerin ein impulsförmiges Signal. Individuelle Aufladungshöhe, Kontaktspannung und vor allem auch Kapazitätseffekte geben die Höhe des Impulses an. Das Signal ist frequenzcodiert. Im Falle der Berührung der Antennen oder des Körpers fließt ein Ausgleichsstrom. Die inneren Widerstände der Tiere bestimmen neben dem Laufflächenwiderstand die Höhe des jeweilig fließenden Stromes. Folgt man den Arbeiten, wonach

verschiedene Bienenvölker verschiedene innere Widerstände aufweisen, so ist für Bienenvölker mit Hilfe des inneren Spannungsabfalls evtl. eine Erkennung von „Freund und Feind“ gegeben. Auch Termiten scheinen mit Hilfe elektrischer Kanäle zu kommunizieren.

Vogelschwärme

Bereits seit längerer Zeit machte man sich Gedanken darüber, wie Vogelschwärme zusammenhalten (gleiches gilt für Insekten- und Fischschwärme). Es fällt vor allem auf, daß sehr große Starenschwärme von geschätzt mehr als 500 m² enger Verbreitungsfläche gelegentlich innerhalb 5 ms komplexe Flugmanöver durchführen können. Die Frage ist, wie die Tiere im Schwarm an jeder Stelle innerhalb kürzester Zeit Signale perzipieren und effektiv umsetzen. Die Luftschallübertragung würde errechneterweise längere Zeit beanspruchen, die optische Sicht zu einem Leittier ist durch diverse fliegende Körper überdeckt. So wurde die Hypothese einer Koordination von Flugmanövern durch elektromagnetische Signale formuliert. Ein derartiges sich ungefähr mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitendes Signal würde alle Individuen „gleichzeitig“ und unabhängig von ihrer Position erreichen. Durch den Faktor einer elektrostatischen Aufladung fliegender Tiere gewinnt diese Hypothese an Bedeutung. Wir können oszillographisch messen, daß die Zusammenballung einzelner fliegender Tiere ein meist positives elektrisches Summenfeld erzeugt, mit einer im Amplitu-

denverhältnis sehr kleinen Flügelschlagmodulation. Diese Modulation ist als Schwebung aller Einzelflügelschläge anzusehen, wobei die Entfernung des Signalaufnehmers zum jeweiligen Signal-sender entscheidend ist. Die Schwebungsfrequenz ist immer kleiner als die Schlagfrequenz des Individuums; dagegen ist die maximale Schwebungsamplitude immer größer als die individuelle Schlagamplitude. Die Meßwerte schwanken mit den meteorologischen Verhältnissen und den geometrischen Meßbeziehungen. Aus den bisher vorliegenden Daten ist zu schließen, daß Kleinvogelschwärme in einer Höhe von ca. 40 m auf einem Potential von mehr als 6000 Volt liegen. Über die Art des codierten Signals für Wendemanöver sind bisher nur Spekulationen möglich, wobei ein Istwert für Schwebungsfrequenz und -amplitude bei jedem einzelnen Vogel eingestellt ist, der bei Abschwächung durch entsprechende Flugrichtungsänderung sofort wieder korrigiert wird.

Der Keil-Formationsflug größerer Vögel wird heute bezüglich der Anordnung der Formationsmitglieder mit zwei Theorien diskutiert:

1. Es besteht optisch ungestörter Kontakt bei gleichzeitig geringster Kollisionsgefahr.

2. Es gibt einen aerodynamischen Vorteil bei gekoppelter Leistungersparnis.

Die erste Theorie greift zurück auf die Erfahrungen beim Staffelflug militärischer Flugzeuge. Die zweite Theorie erscheint einleuchtend durch Berechnungen einzelner Autoren.

Einige Fragen sind jedoch noch nicht geklärt:

● Wie empfindlich ist das System gegen Seitenwinde; müßte bei Überschreitung einer kritischen Windgeschwindigkeit sich nicht durch Wirbelströmung hinter den Flügeln eine Verzerrung der Formationskonfiguration oder sogar Auflösung des Verbandes einstellen?

● Warum halten sich im Verband die Mitglieder nicht permanent in der energiemäßig jeweils optimalen Zone; warum ergibt sich nicht auch einmal die vorwärts geöffnete Formation?

● Lassen sich die erkennbaren geometrischen Besonderheiten der Gesamtformation unter Berücksichtigung der artspezifischen Vogelgrößen in Verbindung mit Positionsverhältnissen der Einzeltiere hinreichend mit flügelinduzierten Aufwinden erklären?

In den folgenden Ausführungen soll ein völlig neues System zur biologisch sinnvollen Formationsbildung vorgestellt werden. Dieses System ergibt sich natürlicherweise und kann durch meteorologische Parameter störunanfällig sein. Physikalisch definiert legt es, abhängig von der Art, die Positionen der einzelnen Mitglieder unter Berücksichtigung der vorausfliegenden Tiere fest. Die Verifizierung einer hierzu formulierten Hypothese erscheint innerhalb des derzeit überschaubaren Rahmens möglich.

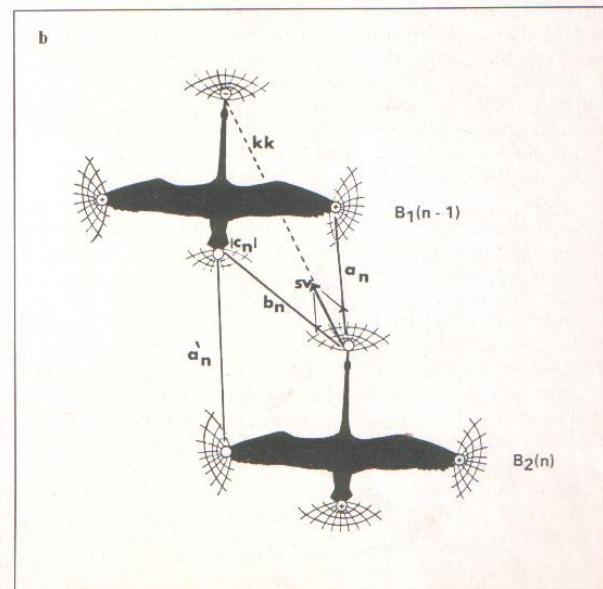
Vogelarten, die in Formation fliegen, halten meist bereits bei zwei Tieren eine typische Ordnung ein: Der zweite Vogel fliegt seitlich versetzt hinter dem ersten.

Die elektrischen Kräfteverhältnisse im Luftraum ergeben sich simultan zu den in Bild 6 modellmäßig experimentell dargestellten elektrischen Kräften. Schnabelregion, Schwanzteil und Flügelspitzen sind Orte höchster Feldstärke.

Bild 6: Flugformation von Gänsen:

a) Experimentelle Modelldarstellung der elektrischen Feldverhältnisse und Coulomb-Kräfte.

b) Die Feldverteilung zwischen den Vögeln ergibt ein Kraftvektor-Parallelogramm.



Ein betrachteter Vogel empfängt mit der Schnabel-Kopf-Region eine influenzierte wechselnde Ladungsmenge vom Flügel des vorfliegenden Tieres, wobei sich ein erhöhtes Kraftfeld ausbildet. Gleichzeitig influenziert der betrachtete Vogel über seinen Flügelschlag Ladungen in die Schwanzregion bzw. in die nach hinten an den Körper angelegten Extremitäten des vorderen Vogels. Auch zwischen diesen Körperteilen befindet sich ein Kraftfeld. Die jeweils influenzierten Ladungen sind – wie im Modell sichtbar – durch die elektrischen Feldbrücke gebunden. Dagegen sind die Konterladungen, d. h. die aus dem ehemaligen Gleichgewicht nunmehr freigegebenen und verschiebbaren Ladungen mit entgegengesetztem Vorzeichen, Erreger eines neuen zusätzlichen Feldes. Dieses Feld ist im vorgestellten Modell nicht ausgebildet, aber meßbar. Somit erhält der betrachtete Vogel nicht nur Influenzladungen vom vorfliegenden Tier, sondern indirekt, d. h. über das Körperende des ersten Vogels, auch von sich selber.

Die Feldstärke nimmt angenähert mit dem Quadrat der Entfernung vom erzeugenden Ladungskomplex ab. Die Größe der angreifenden Kräfte ist also eine Funktion der Abstände.

Jeder Vogel ist mit jedem weiteren über elektrische Felder bestimmter Stärke und Richtung verbunden, wobei berücksichtigt ist, daß der Vogelkörper in seiner Längenausdehnung während der Influenz Dipolform annimmt. Dabei

sind, entsprechend den physikalischen Gesetzmäßigkeiten, folgende Beziehungen ausgebildet: Die rhythmische Bewegung der Flügel vorfliegender Tiere resultiert in einem superponierten Wechselfeld in Form einer Schwebung. Das bedeutet, daß alle relativen Kraftgrößen zeitlich optimiert sind. Das Kraftmaximum hängt ab von dem kürzesten Abstand zwischen dem Kopf eines betrachteten Vogels und den Flügelspitzen bzw. Hinterteils eines vorfliegenden Tieres bei größter Spannweite.

Es ist auffällig, daß besonders langhalsige Vögel Formationen im Flug anstreben. Ein langer Hals hat den Vorteil, daß in der Kopfregion gelegene Detektoren, wie die extrem empfindlichen Mechanorezeptoren, die unter Umständen auch auf die Kräfte der elektrischen Felder ansprechen, weitgehend stabilisiert und losgelöst von Störungen des eigenen Körpers im Flug Signale empfangen können. Beobachtungen zum Flugverhalten lassen erkennen, daß die Kopfregion bei allen Bewegungen des übrigen Körpers kompensatorisch ausbalanciert wird, also keine Eigenbewe-

gungen senkrecht zur Flugrichtung durchführt, wobei der lange Hals offensichtlich von Vorteil ist.

Hypothese

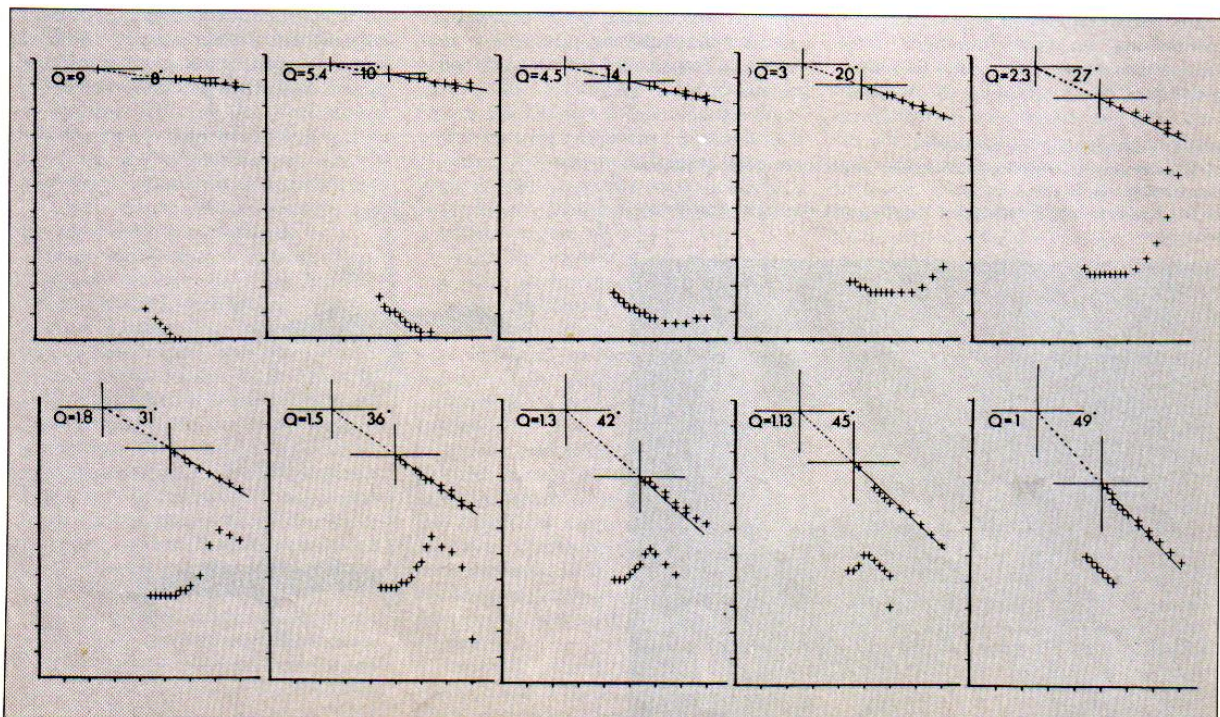
Es wird postuliert, daß die Verarbeitung von perzipierbaren Größen des Magnetfeldes und elektrischen Feldes der Erde als Navigationshilfe durch ziehende Vögel möglich ist.

Der Perzeptionsmechanismus für schwache magnetische Energie ist bei Vögeln noch nicht geklärt. Es ist denkbar, daß die magnetische Größe über eine transferierende Spannungskomponente (Hall-Spannung, Induktionsspannung bei Feldschwankungen) meßbar wird.

In einem Vogelschwarm wäre eine Messung der magnetischen Erdfeldgröße mit Hilfe derartiger Mechanismen nicht störfrei möglich. Der Grund dafür sind die bewegten elektrischen Flügelladungen, die als ein Konvektionsstrom nicht nur ihrerseits eine schwache Magnetfeldkomponente erzeugen ($B \approx 10^{-14}$ Tesla), sondern auch als elektrischer Wechselfeldgenerator Influenzspannungen u. a. in benachbarter Materie erzeugen.

Nur der jeweils an der Spitze des Pulks fliegende Vogel würde bei genügendem Abstand von seinen nachfolgenden Artgenossen eine von wechselnden Überlagerungen befreite, also weitge-

Bild 7: Plotter-Diagramm einer sukzessiven Optimierung der elektrisch bestimmten Vogelpositionen in Abhängigkeit des Verhältnisses Körperlänge – Flügelspannweite. Das erste große Kreuz bezeichnet den führenden Vogel, das zweite große Kreuz zeigt die direkte optimale Position hinter dem Führer. Alle kleinen Kreuze kennzeichnen weitere Optimalpositionen (nach [3]).



hend störfreie Erdmagnetkomponente zur Navigation perzipieren können. Die übrigen Tiere müßten demnach auf eigene Navigationsmechanismen verzichten und sich über einen entsprechenden evtl. elektromechanischen Empfangskanal mit Hilfe einer im folgenden beschriebenen Methode an den vorfliegenden Genossen ankoppeln.

An der Kopfregion eines beliebigen Vogels aus der Formation greifen entsprechend den elektrophysikalisch relevanten Verhältnissen zwei Kraftkomponenten aus unterschiedlichen Richtungen an. Daraus resultiert ein Summenvektor mit definierter Größe und Richtung.

Die Hypothese besagt, daß Größe und Richtung derartiger Kräfte perzipierbar sind und neurophysiologisch verrechnet werden können. Die Vögel fliegen dann geradeaus, d. h. in gewünschter Zugrichtung, wenn die Richtung der elektrischen Summenkraft mit der Richtung der Verbindung zum Kopf des vorfliegenden Vogels übereinstimmt. Die Verbindungslinie zwischen den Köpfen ist tagsüber visuell oder nachts durch Ruflaute lokalisierbar. Die Erkennung von Richtung und Größe des elektrischen Summenkraftvektors könnte über hochempfindliche Mechanorezeptoren im Schnabel möglich sein.

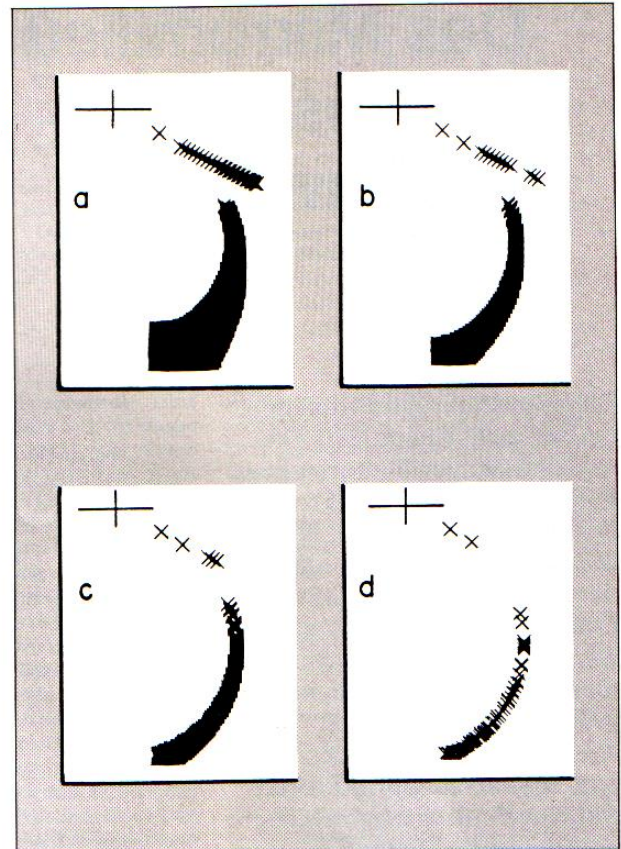
Die Übereinstimmung der Kraftrichtung mit der Kopf-Kopf-Linie bedeutet für jeden Vogel innerhalb eines Verbandes eine vorgeschriebene Positionsausrichtung, die mathematisch exakt formulierbar und kalkulierbar ist.

Die mathematische Beschreibung der Formationsformel läßt erkennen, daß die Formationsgeometrie sich in vertretbaren Grenzen unabhängig von der absoluten Größe aller Ladungen einstellt und lediglich abhängt von der Länge des Vogels, der Spannweite, dem Abstand Schnabel-Flügelansatz und den Abständen zu vor- und nachfliegenden Vögeln.

Eine aufgrund von Beobachtungen formulierte Theorie besagt, daß der Keilwinkel im Formationsflug abhängig von dem Verhältnis der Flügelspannweite zur Halslänge ist, und zwar ist der Keilwinkel bei Vögeln, deren Flügelspannweite etwa gleich der zweifachen Halslänge (Gesamtkörperlänge) ist, am spitzesten; d. h. die Formationsgeometrie ist artspezifisch.

Diese Beobachtung stimmt überein mit dem Ergebnis der rechnerischen Behandlung der hier vorgestellten Hypothese. Das Verhältnis von Flügelspannweite und Körperlänge bestimmt grundlegend die Formationsgeometrie. Bild 7 zeigt die errechnete Abhängigkeit des Keilformationswinkels von dem Quotienten Flügelspannweite/Körperlänge. Demnach fliegen kurzhalsige Vögel (z. B. Lachmöven, Goldregenpfeifer oder Au-

Bild 8: Plotter-Diagramm der sukzessiven Optimierung der Position für einen nachfliegenden Vogel. Winkelabweichungen zwischen Kopf-Kopf-Linie und Summenvektor: 5°, 1°, 0,5°, 0,1° von a) nach d) (nach [3]).



sternfischer) in flachen Keilwinkelformationen, während die Formation langhalsiger Vögel (z. B. Kraniche, Gänse) durch spitze Keilwinkel charakterisiert sind.

Ein weiteres Rechenergebnis aus der Formationsformel besagt, daß ein Vogel bis zu einem kritischen Umkehrpunkt desto weiter hinten fliegen muß, je größer der seitliche Abstand ist (Bild 8). Dieses Ergebnis stimmt ebenfalls mit den natürlichen Verhältnissen überein.

Das dritte Ergebnis schließlich verdeutlicht, daß die Formationsgeometrie maßgeblich davon abhängt, wie dicht mehrere Tiere hintereinander fliegen. Die exakt festgelegte Position der nachfolgend fliegenden Vögel wird bereits von den Abstandsverhältnissen besonders der zwei jeweils vorfliegenden Tiere bestimmt.

Interessant ist, daß der Platz hinter zwei bereits dicht aufeinander fliegenden Vögeln ebenfalls in unmittelbarer Nähe zum Vordermann liegt. Fliegen dagegen die vorderen Vögel mit größerer Distanz, so sind für die nachfolgenden Tiere die Besetzung mehrerer Plätze unter gleichen Bedingungen möglich.

Schließlich erlaubt die hier vorgestellte Formationsformel auch den Son-

derfall des Hintereinanderfluges, den Rottenflug z. B. der Enten, eine Flugformation, die nach bisherigen energetischen Prinzipien flugtechnisch ohne Vorteil und deshalb unerklärlich war.

Alle Ergebnisse von den bisher 22 untersuchten Formationen verifizieren die Hypothese. Die durchschnittliche Abweichung der Vögelposition in der Formation von der errechneten Idealposition liegt bei 5,8°. Vögel, die sich nicht in die Formation einfügen, haben sehr große Abweichungen von 50 bis 70 Prozent gegenüber der Idealposition.

Aus dieser Kalkulation kann geschlossen werden, daß die elektrischen Größen der Vögel wahrscheinlich eine wichtige biologische Bedeutung in der Informationsübertragung haben.

Literatur:

- [1] U. Warnke: Effects of Electric Charges on Honeybees. *Bee Res. Ass.* 57,2, 50-56 (1976)
- [2] U. Warnke: Information Transmission by Means of Electrical Biofields. In Popp u. a. Hrsg.: *Electromagnetic Bio-Information*, Urban & Schwarzenberg (1979)
- [3] U. Warnke: Avian Flight Formation with the Aid of Electromagnetic Forces: A New Theory for the Formation Alignment of Migrating Birds. *J. Biomagnetism* 3,3 493-508 (1984)