



Das Cellulosom –
Eine Nano-Maschine
zum Abbau von Cellulose

Yucca Mountain –
Endlager für abgebrannten
Kernbrennstoff in Nevada

Blick ins Cockpit von *Cataglyphis* –
Hirnforschung en miniature

Rundschau

Lithium als Supraleiter · La Ola – Die
Mexikanische Welle · Wolkentropfen
im Laserlicht · Brennende Kohlenflöze
Zeitliche und versatzbestimmte Erd-

bebenvorhersagen · Ältester Eutherier
aus China · Molekularbiologie von Lernen
und Vergessen · Polyphänismus bei
Ameisen · Wassertrugnattern zerteilen
zu große Beute · Raupenspeichel hemmt
pflanzliche Abwehr · Ungewöhnliche
Antikörper-Moleküle · Trinkschokolade,
ein sehr altes Getränk

Buchbesprechungen

Personalia

Service Tipps und Hinweise
Nachrichten aus dem Internet
Veranstaltungen
Stichwort: Plasma

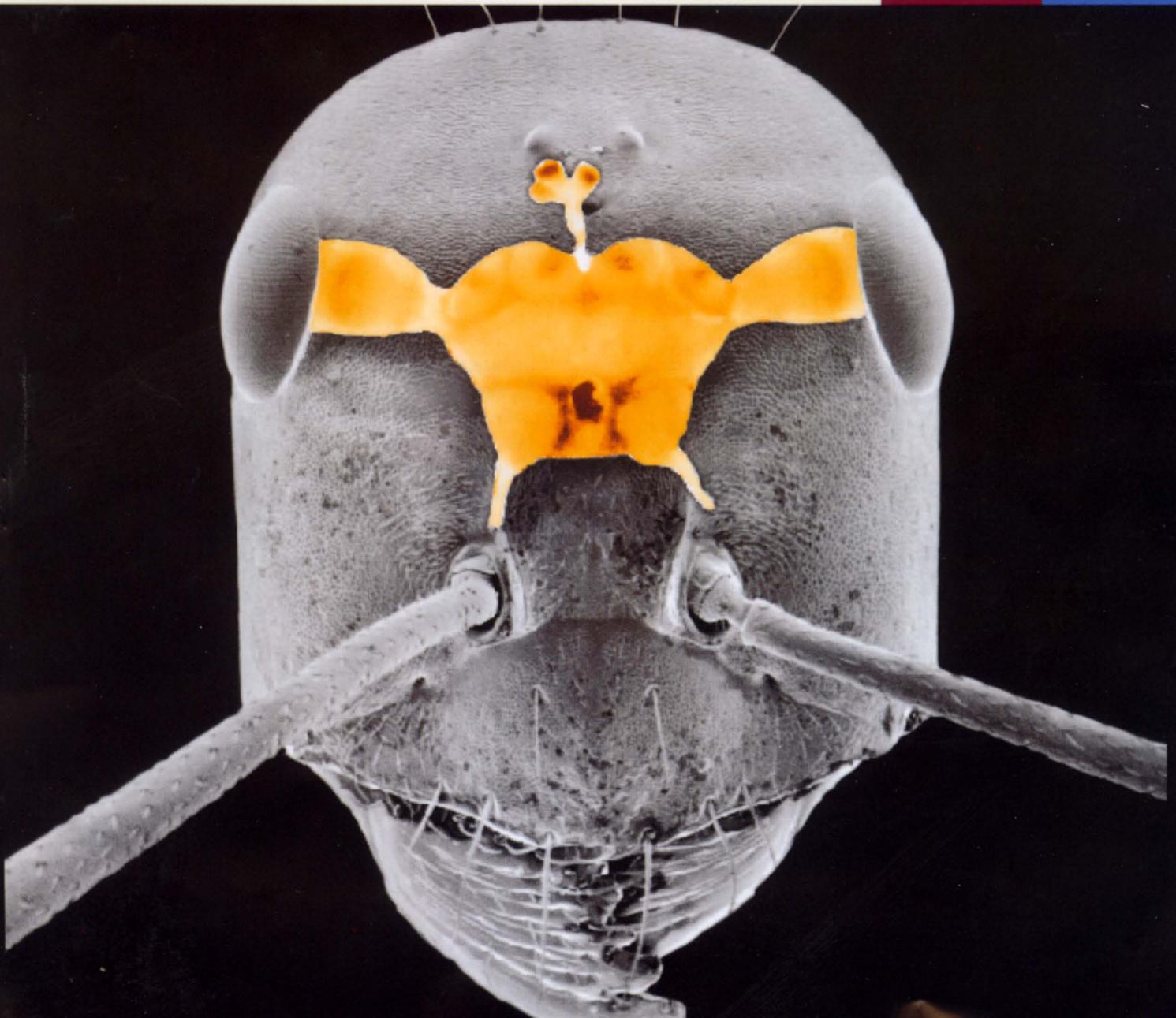
3

März 2003
56. Jahrgang
€ 9,-
E 9981

Naturwissenschaftliche Rundschau

NR

657



Blick ins Cockpit von *Cataglyphis*

Hirnforschung en miniature

Cataglyphis, die Rennameise der Sahara, vermag über Hunderte von Metern in strukturlosem Wüstengelände zu jagen und nach windungsreicher Wegstrecke geradlinig zum Ausgangspunkt zurückzukehren. Ein nur 0,1 mg leichtes Gehirn steuert diese Kurse mit einem reichhaltigen Navigationsinstrumentarium: einem Kompass, der für uns unsichtbare Lichtphänomene am Himmel auswertet; einem Entfernungsmesser, der auch mit der Steigung des Geländes rechnet; einem Bildkomparator, der Panoramabilder einspeichert und miteinander vergleicht; und einem Suchmechanismus, dessen Effizienz menschliche Navigatoren begeistert.

Unsere Kenntnisse über diese staunenswerten Orientierungsleistungen verdanken wir Rüdiger Wehner, der für seine interdisziplinär angelegten sinnes-, neuro- und verhaltensphysiologischen Arbeiten im November 2002 in Zürich den Marcel-Benoist-Preis entgegennahm.

Seine Dankesrede vermittelt einen Eindruck, wie man die Navigationsleistungen eines faszinierenden Insekts mit dem kombinierten Einsatz von Neuro- und Verhaltensbiologie, Modellrechnung und Robotiksimulation interaktiv untersuchen kann. Statt einer umfassenden Gesamtlösung – *top-down* konzipiert – bedient sich *Cataglyphis* eines Arsenal von approximativen Teilstrategien, die in der Evolution *bottom-up* entstanden sind und sich erst im situationsgerechten ökologischen Kontext sinnvoll zum Ganzen fügen. Rüdiger Wehner zeigt darüber hinaus, dass sich die detektivische Aufklärung dieser Navigationsleistungen nur schwer in zentral konzipierte Forschungsprogramme mit vorgefertigten Forschungszielen fügt.

Als mich vor einigen Wochen Kurt Wüthrich – noch bevor er von seinem Nobelpreis erfahren hatte – zu abendlicher Stunde anrief und mir erzählte, er sei gerade im Tessin und habe soeben auf dem Monte San Salvatore an einer Kommissionssitzung teilgenommen, war mein erster Gedanke „My God, was ist das jetzt wieder für eine Kommission, der Du beitreten sollst“. Aber als er dann – nach wohlinszenierter Pause – den wahren Grund seines Anrufs nannte, war ich sprachlos; vor Überraschung sprachlos. Doch Sprachlosigkeit würden Sie mir jetzt wohl kaum verzeihen.

Mit meiner wieder gefundenen Sprache liegt es mir zunächst am Herzen, den Mitgliedern des Stiftungsrats, allen voran seiner Präsidentin, Frau Bundesrätin Dreifuss, zu danken, dass Sie mir diese Ehrung haben zuteil werden lassen: seit 20 Jahren wieder einem Biologen; zudem einem Biologen, dessen Forschungsgebiet nicht gerade die medienwirksamen drei Buchstaben „Gen“ oder „Öko“ im Namen trägt, ja das auf den ersten Blick vielleicht sogar etwas exotisch erscheinen mag – auf den ersten Blick. Daher möchte ich Sie heute zu einem zweiten Blick einladen; nicht zuletzt auch deshalb, weil er mir die Möglichkeit gibt, einmal in aller Öff-

fentlichkeit meinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für ihren Einsatz zu danken; für den gemeinsamen Weg, auf dem sie mich Etappe für Etappe über mehr als ein Vierteljahrhundert hinweg in immer wieder neuen Formationen begleitet haben und dabei durch eine begeisternd schöne Forschungslandschaft mit mir gewandert sind.



Abb. 1. *Cataglyphis bicolor* in vollem Lauf. Das bauchige, an der „Wespentaille“ ansitzende Hinterleibsende (Gaster) ist hoch aufgerichtet.

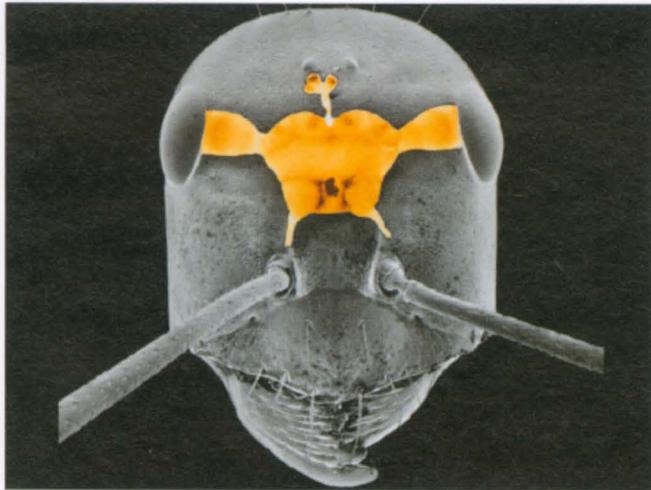


Abb. 2. Kopf von *Cataglyphis bicolor* (Vergr. 20fach). Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme. Das Gehirn ist als Photomontage gelb eingefügt. [Aufnahme E. Meyer]

Faszination *Cataglyphis*

Dankbar und noch immer ein wenig bewegt, schaue ich aber vor allem auf jenes Ereignis zurück, ohne das wir alle heute nicht hier beisammen säßen. Ich meine jenen Augenblick, als *Cataglyphis* erstmals meine Wege kreuzte und ich sofort der Eleganz dieser rasanten Wüstenameisen erlag (Abb. 1): Der Eleganz ihrer Erscheinung und der Faszination, die von ihrem schier unglaublichen Orientierungssinn ausging. Weiträumig jagen diese Tiere – die Rennpferde der Insektenwelt – mit Geschwindigkeiten von bis zu einem Meter pro Sekunde über die Sandböden Nordafrikas, um nach glücklichem Beutefund auf direktem Weg zum Ausgangspunkt zurückzukehren: windungsreich der Auslauf, oft mehr als 100 m weit; doch geradlinig und direkt der Rücklauf!

Schon Napoleon muss ihnen begegnet sein. Jedenfalls finden sie sich in dem 11-bändigen Prachtwerk porträtiert, das die wissenschaftlichen Ergebnisse seines Ägyptenfeldzugs beschreibt. Doch haben sie ihn offenbar nicht derart beeindruckt, dass er sein strategisches Augenmerk ihren Navigationsleistungen gewidmet hätte. Dabei wären diese Leistungen durchaus einer Strategiebetrachtung wert gewesen; denn in menschliche Dimensionen übersetzt, bedeuten sie, nach 50 km mäandrierendem Lauf durch strukturloses Wüstengelände in Sekundenschnelle die Luftlinienrichtung und Entfernung zurück zum Startpunkt berechnen zu können. Ein menschlicher Navigator würde dabei – hätte er keine Instrumente und fehlte ihm das nötige mathematische Rüstzeug – klar versagen. Doch *Cataglyphis* erbringt diese Leistung ohne GPS oder Inertial Navigation System an Bord und mit nur 0,1 mg Nervengewebe im Kopf (Abb. 2) routinemäßig mehrmals am Tag.

Die Navigationsleistung besteht darin, während des Laufs ständig Winkel und Distanzen zu messen und zum Rücklaufvektor zu verrechnen. Die Tiere sind dann wie mit einem straff gespannten virtuellen Ariadnefaden jederzeit mit dem Ausgangspunkt verbunden. Für diese Wegintegration benöti-

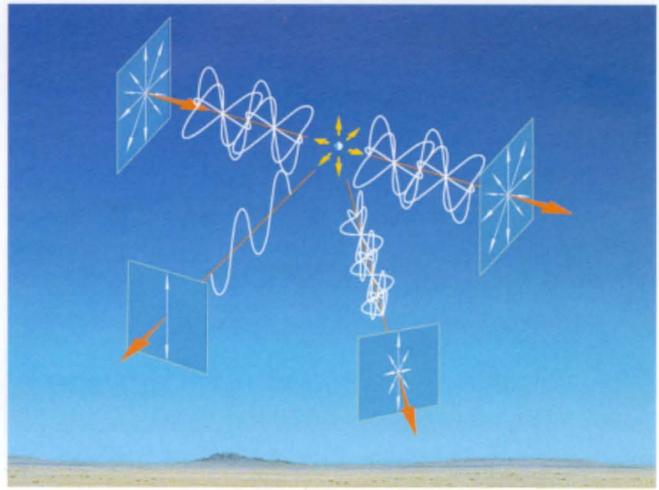


Abb. 3. Polarisation des Himmelslichts. Durch Streuung des unpolarisierten Sonnenlichts (Einschaltquadrat **links oben**) an den Luftmolekülen der Erdatmosphäre wird Himmelslicht polarisiert. Maximale (100%) Polarisation erfolgt bei einem Streuwinkel von 90° (**unten links**). Die Schwingungsebene des elektrischen Lichtvektors („Polarisationsrichtung“, siehe Doppelpfeil) steht jeweils senkrecht auf der Streu-Ebene, d. h. der Ebene, die vom ungestreuten und gestreuten Lichtstrahl gebildet wird. Direktes, d. h. ungestreutes Sonnenlicht (Streuungswinkel 0°) bleibt unpolarisiert (**rechts oben**): Alle Polarisationsrichtungen sind gleich häufig vertreten. Bei Streuwinkel zwischen 0° und 90° (**rechts unten**) erfolgt teilweise Polarisation: Eine Polarisationsrichtung dominiert. Aufgrund der genannten Gesetzmäßigkeiten verändert sich die Polarisationsrichtung von Himmelspunkt zu Himmelspunkt (siehe Abb. 4).

gen sie einen Kompass, um Richtungen, einen Entfernungsmesser, um Distanzen zu bestimmen, und einen Integrator, der beide Messergebnisse vereint.

Unser Blick ins Cockpit gelte hier vor allem dem ersten Instrument, dem Kompass: zum einen, weil dieser Kompass mit einem Muster am Himmel arbeitet, das für uns Menschen unsichtbar ist, und die Neugier daher groß war, herauszufinden, wie Auge und Gehirn von *Cataglyphis* mit diesem Muster umgehen; zum anderen, weil sich bei diesem Thema besonders anschaulich zeigen lässt, wie sich in unserer Arbeit verschiedene methodische Ansätze gemeinsam auf eine bestimmte Fragestellung fokussieren – Ansätze, die von der Verhaltensbiologie über die Neurophysiologie zur Informatik und schließlich zur Ökologie und Evolutionsbiologie reichen – ein multidisziplinäres Vorgehen, bei dem ich immer wieder mit Studentinnen und Studenten, Kolleginnen und Kollegen ganz unterschiedlicher Couleur zusammenarbeiten durfte.

Auf der Suche nach dem inneren Kompass

Uns erscheint der Himmel mehr oder weniger eintönig blau. Doch *Cataglyphis* sieht an ihm ein markantes Muster, das so genannte Polarisationsmuster, kurz Polaro-Muster. Es entsteht – nur soviel sei hier zur Physik gesagt – durch die Streuung des Sonnenlichts an den Luftmolekülen der Erdatmosphäre. Als Folge dieser Lichtstreuung schwingt in jedem Himmelspunkt der elektrische Vektor der elektromagnetischen Welle Licht in einer bestimmten Richtung, wie das die

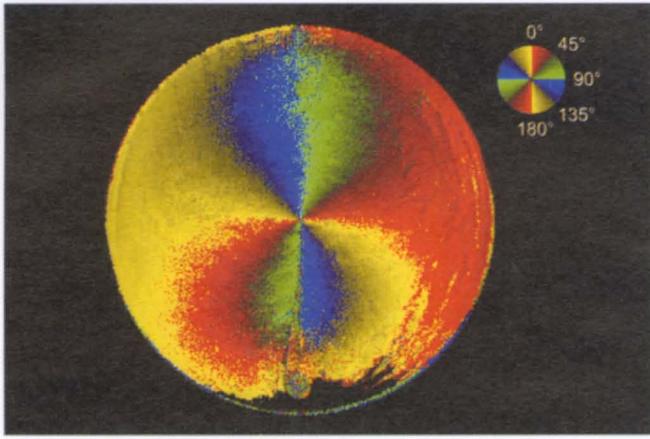


Abb. 4. Falschfarbenbild des Himmelpolarisationsmusters. Mit einem 180°-Fischaugenobjektiv und eingebauter Polarisationsoptik wurde das natürliche Polarisationsmuster aufgenommen und daraus die Verteilung der Polarisationsrichtungen am Himmel computermäßig rekonstruiert. Jede Farbe entspricht einer bestimmten Polarisationsrichtung (siehe Einschaltfigur). [Aufnahme zusammen mit G. Horvath]

Doppelpfeile in Abbildung 3 symbolisieren. Übersetzt man diese Richtungen in ein Falschfarbenbild, springt die Geometrie des Musters schlagartig ins Auge (Abb. 4). *Cataglyphis* ist in der Lage, anhand dieses Musters, ja sogar anhand nur winziger Teile des Musters (wenn der Rest z. B. durch Wolken oder durch experimentelle Eingriffe verdeckt ist) jede beliebige Himmelsrichtung zu bestimmen – auch dann, wenn das Muster im Laufe des Tages mit der Wanderung der Sonne seine Stellung am Himmel und seine innere Struktur verändert; – eine in der Tat beachtliche Leistung, die bereits Karl v. Frisch Mitte des letzten Jahrhunderts bei Bienen nachgewiesen hatte. Aber wie funktioniert der Polarisationskompass? Ein Physiker könnte die Aufgabe dadurch lösen, dass er am Himmel eine Reihe optischer Messungen vornimmt, sphärische Geometrie betreibt und Gleichungssysteme löst. Doch *Cataglyphis* wurde bisher nur selten beim Studium solcher Arbeiten beobachtet.



Abb. 5. *Cataglyphis*-Freilandforschung 1970: Reto Weiler und Res Burkhalter vor der Testfläche mit der Skyline des südtunesischen Ortes Maharah im Hintergrund.

Als ich dieses Problem vor vielen Jahren in einem Kreis von Physikern vortrug, gab mir am Ende einer meiner damaligen wissenschaftlichen Gurus den Rat, nun eben im Gehirn von *Cataglyphis* nach den neuronalen Instanzen zu suchen, die diese Rechenoperationen ausführten. Und er meinte das sogar ernst. Mir schien die Lage hoffnungslos. Was sollte ich tun, damals, als junger Assistent bei Ernst Hadorn, von dem und von dessen gerade blühenden entwicklungs-genetischen Arbeiten an der Modellfliege *Drosophila* ich ebenfalls begeistert war? Das Thema wechseln, zu *Drosophila* übergehen? Unmöglich für einen, der bereits so wie ich in *Cataglyphis* verliebt war.

Und so zog ich denn mit einigen studentischen Mitarbeitern – und durchaus gemischten Gefühlen – wieder nach Nordafrika, um zunächst einmal genauer hinzuschauen, wie sich die Tiere unter bestimmten experimentellen Bedingungen verhalten; um herauszufinden, ob man aus experimentell bedingten Verhaltensänderungen vielleicht etwas über den Kompass im Cockpit erfahren könne.

Zu meinen ersten Mitarbeitern zählten Reto Weiler und Res Burkhalter (Abb. 5), damals – wir schreiben das Jahr 1970 – engagierte Mitglieder des aktivistischen Kleinen Studentenrats der Universität Zürich. Ernst Hadorn hegte echte Zweifel, ob ausgerechnet diese beiden für mein Projekt die besten aller möglichen Kandidaten seien. Sie haben sich unter der Sonne Nordafrikas bestens bewährt. Heute – kann ich anfügen – sind beide gestandene Professoren der Neurobiologie, der eine in den USA, der andere in Deutschland.

Seit dieser Pionierzeit, der auch Irene Tobler, Immanuel Flatt, Peter Duelli und Paul Herrling angehörten – im Labor Thomas Labhart, Eric Meyer und wiederum Paul Herrling –, seit dieser Pionierzeit führen wir hier im südlichen Tunesien nahe des Ortes Maharah an einer inzwischen etablierten kleinen Feldstation alljährlich unsere Verhaltensanalysen durch. Mit Koordinatennetzen am Boden protokollieren wir die Lauftrajektorien der Tiere (z. B. direkt digital mit einem solarzellbetriebenen Laptop, Abb. 6). Gleichzeitig manipulieren wir den *Cataglyphen* die Himmelssicht: mit optischen Gerä-

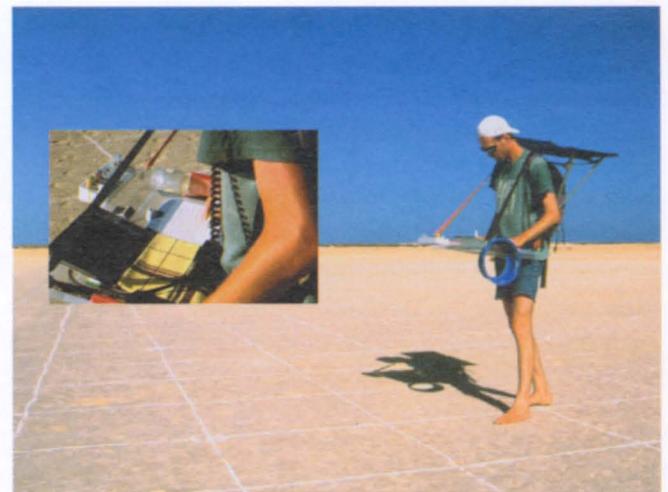


Abb. 6. *Cataglyphis*-Freilandforschung 2000: MD-PhD-Student David Andel protokolliert die Lauftrajektorien von *Cataglyphis fortis* mit einem solarbetriebenen Lap-Top samt Graphiktablett.

ten, die mit der Ameise mitrollen, oder mit Kontaktlinsen, die problemlos wieder abgenommen und durch neue ersetzt werden können. Wie lange spielen die Ameisen dabei noch mit? Wann bricht ihr Kompass zusammen, halb oder ganz und unter welchen Bedingungen?

Ein Beispiel: Bieten wir *Cataglyphis* beim Auslauf und Rücklauf verschiedene Himmelmuster, einmal das Gesamtmuster, das andere Mal nur ein Teilmuster – zum Beispiel einen Himmelsstreifen, dessen Stellung im Raum von Versuch zu Versuch verändert wird –, treten im Test systematische Navigationsfehler auf: Abweichungen nach links, Abweichungen nach rechts. Richtung und Größe dieser Fehler variieren mit der Stellung des Streifens am Himmel. Schon dieses eine Beispiel zeigt, dass *Cataglyphis* manipulierbar ist, dass sie das Kompassproblem offenbar nicht in allgemeingültiger, unter allen möglichen Umweltbedingungen korrekter Form löst, sondern irgendwie approximativ. Aber wie? Hier hilft nur ein Blick ins Cockpit weiter, ins Gehirn.

Stukturen und Funktionsweise des Himmelskompasses

In unserem Fall – beim Himmelskompass – beginnt das Gehirn im Auge. Dort besitzt *Cataglyphis* unter ihren Facettenlinsen Sensoren, die im Gegensatz zu unseren eigenen Sehzellen für polarisiertes Licht empfindlich sind. In den Membranen jedes Sensors, jeder Rezeptorzelle, sind die lichtsensitiven Rezeptormoleküle in einer bestimmten Richtung angeordnet und nicht wie bei uns zufällig verteilt. Vor mehr als zwei Jahrzehnten habe ich diese geordnete Ausrichtung der Rezeptormoleküle im Labor von Timothy Goldsmith an der Yale University spektroskopisch nachgewiesen. Aber bis jetzt ist immer noch nicht klar, wie diese Ausrichtung der Moleküle zellbiologisch zustande kommt: durch membraninterne Molekülkonfigurationen, mit Hilfe des Cytoskeletts in den Mikrovilli der Rhabdomere oder – wie auch vermutet wurde – allein aufgrund der Packungsdichte? Wie dem auch immer sei, als Folge dieser molekularen Spezialisierung werden die Sehzellen von *Cataglyphis* zu Polarsensoren. Jede Sehzelle ist für jeweils eine Polaro-Richtung maximal empfindlich (Abb. 7, oben).

Doch nicht alle Sehzellen des *Cataglyphis*-Auges reagieren auf das polarisierte Himmelslicht; nur jene, die für Ultraviolett empfindlich sind, das heißt eine zweite für uns unsichtbare Lichtqualität am Himmel wahrnehmen. Intrazelluläre Ableitungen zeigen, dass *Cataglyphis* UV- und Grünrezeptoren besitzt (also nur zwei Farbrezeptortypen und nicht drei wie wir). Die beiden Typen enden mit ihren Sehzellfasern in verschiedenen Nervenzellschichten des Gehirns. Trägt *Cataglyphis* Augenkappen, die nur die Grünrezeptoren stimulieren, ist sie völlig desorientiert. Mit UV-Brillen funktioniert der Kompass dagegen einwandfrei; allerdings nur, wenn die UV-Rezeptoren einer kleinen Region am oberen Augenrand gereizt werden (Abb. 8). Diese Region allein, die nur etwa fünf Prozent aller Sehzellen von *Cataglyphis* umfasst, liefert dem Kompass die nötigen Sinnesdaten.

Äußerlich lassen die Facetten dieser Region nichts Besonderes erkennen. Doch wie elektrophysiologische Ableitun-

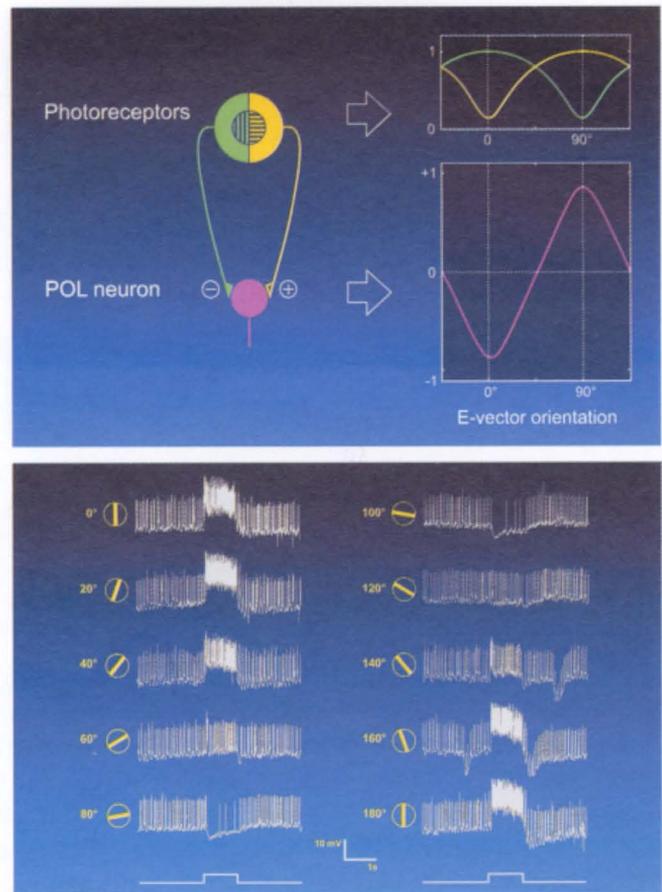


Abb. 7. – oben In jeder Seheinheit (Ommatidium), die auf einen bestimmten Himmelspunkt blickt, besitzt *Cataglyphis* Polaro-Sensoren („Photoreceptors“) mit senkrecht zueinander stehenden Analysator-(Mikrovilli-) Richtungen. Die beiden Rezeptortypen werden antagonistisch auf Folgeneuronen („POL neuron“) verschaltet. Rechts sind die Antwortkurven der beiden Sensorentypen sowie darunter die eines Folgeneurons angegeben. „E-vector orientation“ bezeichnet die Polarisationsrichtung. – **unten** Entladungsraten eines Folgeneurons, das erregenden Input von Sensoren für vertikal polarisiertes Licht erhält (intrazelluläre Ableitung aus der Medulla der Grille; ausgeführt von Thomas Labhart. *Cataglyphis* besitzt analoge Typen von Folgeneuronen).

gen zeigen, liegen unter ihnen Nervenzellen, die spezifisch auf die Polaro-Richtungen des Lichts reagieren. Dabei sind jeweils zwei Typen lokaler Polaro-Sensoren mit senkrecht zueinander angeordneten Mikrovillirichtungen (d. h. Richtungen maximaler Polarisationsempfindlichkeit) antagonistisch miteinander verschaltet (Abb. 7, oben). Diese Mikrovilli-Anordnung und Rezeptorverschaltung hat zur Folge, dass Informationen über die Lichtintensität schon im peripheren visuellen System eliminiert werden. Große Integrationsneurone bündeln die einlaufenden Informationen und transferieren sie von einer Hirnhälfte zur anderen. Jedes dieser große Himmelsbereiche überblickenden Integratorneurone empfängt seinen Input von einer bestimmten Population retinaler Polaro-Sensoren. Das alles folgt aus Resultaten, wie sie vor allem Thomas Labhart, Eric Meyer, Felix Rüber und Jürgen Petzold in unserem Labor gewonnen haben. Diese und viele andere Befunde lassen sich zu einer Hypothese verarbeiten, wie der Kompass funktionieren könnte: Jede Himmelsrichtung, jeder Punkt der Kompasskala, wird durch ei-

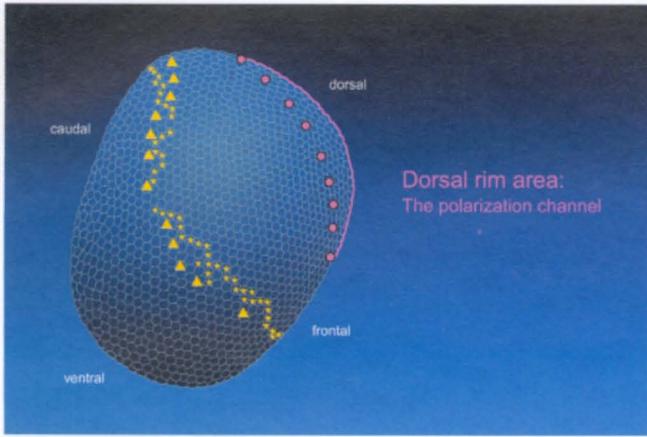


Abb. 8. Blick auf das Facettenauge von *Cataglyphis bicolor* mit der dorsalen Randregion für die Wahrnehmung des polarisierten Himmelslichts (ventral begrenzt durch die Linie roter Punkte). Die Region mit der höchsten Sehschärfe, die dem Bildkomparator die nötigen Daten liefert, verläuft dem Äquator entlang (gelbe Stern- und Dreieckssignaturen).

ne bestimmte Erregungsverteilung von möglicherweise nur drei binokularen Großfeld-Integratorneuronen codiert. Die Information über die lokalen Polaro-Richtungen in den einzelnen Himmelspunkten geht dabei verloren; zum Leidwesen vielleicht des menschlichen Theoretikers. Doch *Cataglyphis* dürfte an diesen physikalischen Details wenig interessiert sein. Für sie ist allein die Kompassinformation entscheidend; und die kann sie den globalen Erregungsverteilungen ihrer Integratorneurone, heruntergeschaltet auf einen Satz von Kompassneuronen, mit hinreichender Genauigkeit entnehmen.

Natürlich hat diese Lösung ihre Grenzen. Ändert sich das Himmelmuster, verändern sich auch die Erregungen der Integratoren. Offenbar dienen die grazilen Drehbewegungen, die kleinen Menuette, die *Cataglyphis* vor ihren Ausläufen vollführt, der Anpassung des Kompasses an die jeweilige Himmelsituation. Wird das Himmelmuster nach dieser Kalibrierung – zum Beispiel zwischen Hin- und Rücklauf – experimentell verändert, sind Navigationsfehler zu erwarten. Sie stimmen mit der theoretischen Erwartungsfunktion gut überein. Bleibt das Muster dagegen, wie das normalerweise der Fall ist, beim ganzen Auslauf konstant (können die Tiere zum Beispiel im Experiment bei Hin- und Rücklauf denselben Himmelsausschnitt sehen), funktioniert der Kompass fehlerfrei.

Näherungsverfahren statt globale Lösungen

Wenn dem so ist, müsste man die neuronalen Schaltpläne im Cockpit von *Cataglyphis* in elektronische Schaltungen übersetzen und in einen Roboter implementieren können. Wir haben das in Zusammenarbeit mit Rolf Pfeifer vom Institut für Informatik der Universität Zürich getan. Der 10 kg schwere „Sahabot“ (Sahara-Roboter, Abb. 9), ausgestattet mit Polaro-Sensoren und einer *Cataglyphis*-nachempfundenen Software, kann wie die 10 mg leichte Ameise nach dem Pola-



Abb. 9. Sahabot, ein Roboter, der wie die *Cataglyphis* nach dem polarisierten Himmelslicht Kompasskurse steuert und einen Bildkomparator zur Zielfindung nach künstlichen Geländemarken einsetzt. Im Vordergrund ist der konische Spiegel zu erkennen, über den das Landmarkenpanorama auf eine digitale 360°-CCD-Kamera projiziert wird.

ro-Muster des Himmels navigieren – wenn auch etwas schwerfälliger.

Quintessenz: *Cataglyphis* besitzt keine allumfassenden Himmelskenntnisse. Sie verwendet ein Näherungsverfahren, das immer wieder neu an die jeweils herrschenden Außenweltbedingungen angepasst wird – nach dem Prinzip: *just in time and on demand*. Mit diesem Prinzip kommt *Cataglyphis* dem Denken der *New Artificial Intelligence* sehr gelegen. Maßgeschneiderte, von der Evolution auf eine bestimmte Situation zugeschnittene Lösungen statt allgemeingültige Problemrepräsentationen heißt die Maxime: *Embodied Intelligence*, in ein gegebenes Umfeld eingebettete Intelligenz.

Doch die „Embodied *Cataglyphis* Intelligenz“ wird noch stärker gefordert, denn neben Winkeln muss *Cataglyphis* ja auch noch Distanzen messen und aus beiden Messgrößen den Rücklaufvektor bestimmen. Wie diese Vektorberechnung („Wegintegration“) erfolgt, haben wir in umfangreichen Experimenten, wie sie vor allem Martin Müller in seiner Doktorarbeit systematisch durchgeführt hat, geprüft. Dabei werden die Tiere in Kanalapparaturen mit gegeneinander abgewinkelten Laufsegmenten trainiert (Abb. 10) und dann im offenen Gelände auf ihre Richtungswahl getestet. Auch hier unterlaufen den Tieren systematische Fehler, die Aufschlüsse über den der Wegintegration zugrunde liegenden Algorithmus liefern. Doch *Cataglyphis* ist genial genug, ihre Futtersuchläufe geometrisch so zu gestalten, dass sich im normalen Verhalten die im einseitigen Experiment beobachteten Fehler ausmitteln.

Aber wie genial diese Lösungen auch immer sein mögen: Wegintegration ist generell eine gefährliche Strategie; denn der Navigator hat keine Karte im Kopf, sondern nur einen Vektor, nur den Ariadnefaden, der ihn mit dem Ausgangspunkt verbindet. Wird er verdriftet, verweht oder vom Experimentator versetzt, spult er den Vektor parallelverschoben ab und landet am falschen Ort. Alle Richtungen und Entfernungen sind nur auf ihn selbst bezogen. Er navigiert egozentrisch, nicht geozentrisch.

Egozentrische und geozentrische Navigation

Zur gleichen Zeit, als die Helden Homers nach dem Kampf um Troja kreuz und quer durchs Mittelmeer verschlagen wurden, war auf der anderen Seite der Welt das wohl größte ozeanische Kolonisationsunternehmen im Gang: Mikronesier und Polynesier hatten begonnen, die Weite des pazifischen Raumes zu besiedeln. Wie wir heute anhand intensiver linguistischer Studien wissen, steuerten die ozeanischen Navigatoren ihre Auslegerboote nach dem Prinzip der egozentrischen Wegintegration und benutzten dazu einen Himmelskompass, der aus 16 Sternenbahnen bestand. James Cook hatte 1770 in Tahiti einen polynesischen Navigator namens Tupaia an Bord seiner *Endeavour* genommen. Wie er in seinem Tagebuch vermerkte, war Tupaia während 6000 Meilen Fahrt niemals verlegen, die Richtung zu seiner Heimatinsel zu weisen, wenn auch mit zunehmender Entfernung immer ungenauer. Aber mit einer Karte, die man ihm vorlegte und auf der Tahiti sowie andere Inseln und Landmarken verzeichnet waren, konnte er nicht das Geringste anfangen. Die egozentrische und die geozentrische Sicht der Welt sind offenbar nicht miteinander vereinbar.

Doch auch einem egozentrischen Wegintegrator können Landmarken als Orientierungshilfe dienen. Die Navigatoren des Mittelalters „pilotierten“, das heißt verwendeten Landmarken, um ihre Vektoren, ihre *rhumb-lines*, an Küstenorten zu befestigen; und auch *Cataglyphis* verknüpft Landmarken in Form von Erinnerungsbildern mit ihren Laufvektoren. Experimentell lassen sich diese Leistungen mit künstlichen Markenkonfigurationen (vgl. S. 118) testen: *landscape art* à la Richard Long. Persistent sucht *Cataglyphis* dann am richtigen Ort, das heißt an jenem Ort, an der ihr eingespeichertes Panoramabild mit dem aktuellen Netzhautbild übereinstimmt. Der Suchdichte-Peak liegt genau dort, wo er nach dem Bildvergleich zu erwarten wäre. Verändert man die Markenkonfiguration im Test, verschwindet der Suchdichte-Peak oder erscheint in anderer Form oder verlagert seinen Ort oder spaltet sich in mehrere kleine Gipfel auf. Mit



Abb. 10. Sibylle Wehner, die Frau des Verfassers, 1974 bei den ersten Kanalversuchen zur Wegintegration von *Cataglyphis bicolor*. Die Tiere werden aus einem künstlichen Gipsnest auf dem Dach eines Hauses in Maharès in die Kanalapparatur mit gegeneinander abgewinkelten Laufstrecken dressiert.

Modellrechnungen können wir dann überprüfen, welche Bildvergleichsalgorithmen dem Verhalten von *Cataglyphis* am besten entsprechen, und simulieren, wie die Tiere dem Ziel von verschiedenen Ausgangspunkten her Schritt für Schritt näher kommen: nicht immer auf dem direkten Weg.

Implementieren wir dieses Modell wiederum in einen Roboter, bei dem das Bild eines künstlichen Landmarkenpanoramas über einen konischen Spiegel (siehe Abb. 9) auf eine digitale Weitwinkelkamera projiziert wird. Ein entsprechend gewählter Algorithmus lässt dann das Marsmobil-ähnliche Gefährt in einer künstlichen Säulenlandschaft genauso rollen, wie *Cataglyphis* in derselben Landschaft läuft: nicht immer auf direktem Weg zum Ziel, aber immer so, dass das aktuelle Panoramabild dem gespeicherten Sollbild zunehmend ähnlicher wird, bis es am Ziel mit ihm zur Deckung kommt.

Noch wissen wir wenig darüber, wo und wie im *Cataglyphis*-Gehirn dieser Bildvergleich erfolgt. Bekannt ist aber, dass auch er wie der Polaro-Kompass auf eine bestimmte Augen- und Hirnregion beschränkt ist, in diesem Fall auf ein schmales Band höchster Sehschärfe, das sich dem Äquator entlang zieht (Abb. 8).

Wie dieser kurze Blick ins Cockpit von *Cataglyphis* zeigt, sind mehrere Teilsysteme für die Langstreckennavigation dieser Tiere verantwortlich. Nur zwei, den Polaro-Kompass und den Bildkomparator, habe ich hier gestreift. Hinzu kommt ein parallel geschalteter Farbkompass, der Farbgradienten am Himmel misst, die für uns ebenfalls unsichtbar sind, und der mit dieser Farbinformation den Polaro-Kompass ergänzt und vor Doppeldeutigkeiten bewahrt. Hinzu kommen ferner ein Steigungsmesser, ein Distanzmesser, ein Integrator und ein systematisches Suchprogramm – um nur jene Instrumentarien zu erwähnen, mit denen wir uns befasst haben oder zur Zeit befassen. Situationsspezifisch, kontextbezogen kommen alle diese Systeme simultan oder sukzessiv zum Einsatz.

Lessons from *Cataglyphis*

Es ist dieses modulare Prinzip, nach dem nicht nur das Minihirn von *Cataglyphis* funktioniert, sondern nach dem Gehirne generell – auch die der Primaten und damit unser eigenes – im Lauf der Evolution gestaltet worden sind. Es ist das Prinzip des *component-based design*, im Grund das einzige Prinzip, das der Entwicklung komplexer Systeme zur Verfügung steht, seien es nun neuronale oder elektronische. Das spiegelt sich schon in der Evolution der Nervensysteme aus modularen Grundbausteinen wider. Noch heute wird die frühembryonale Gliederung des Gehirns in verschiedene Neuomere bei Insekten und Säugetieren von den gleichen oder eng verwandten Genen nach dem gleichen Zeitplan organisiert. Mit gleichen oder eng verwandten Genen meine ich solche, die von der Fliege in die Maus oder von der Maus in die Fliege transferiert werden können und dann im jeweiligen Wirtsorganismus orts- und zeitgerecht die normale Neuomerengliederung auslösen.

Über dieses modulare Konstruktions- und Funktionsprinzip könnten wir uns noch stundenlang unterhalten, wenn

mir nicht eine letzte „Lesson from *Cataglyphis*“ noch am Herzen läge. So facettenreich die Augen dieser Tiere, so facettenreich die Mechanismen im Gehirn, so facettenreich sind auch die Wege, auf denen wir uns dem Navigator *Cataglyphis* genähert haben. Blicke ich zurück ins Jahr 1970, als ich mich entschied, das Wagnis mit *Cataglyphis* einzugehen (einer bis dahin verborgenen orientalischen Schönheit), war dieser Reichtum an Themen kaum zu erahnen. Doch inzwischen hat uns *Cataglyphis* so viele Türen geöffnet, bis hin zu den Kognitionswissenschaften; hat sie mir Jahr für Jahr so viele engagierte Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter beschert (immer wieder neue Diplomierende und Doktorierende im Feld wie im Labor); hat *Cataglyphis* – ein besonders liebenswerter Zug an ihr – auch meine Frau sofort begeistert und erobert; hat *Cataglyphis* inzwischen weltweit so viele Freunde gewonnen und Kollegen stimuliert, ja sogar den Marcel-Benoist-Stiftungsrat in ihren Bann gezogen, dass ich mich immer wieder frage, wie sie das alles fertig gebracht hat.

Eine ihrer Fähigkeiten scheint mir dabei besonders hervorstechen: ihr absoluter Unwillen, sich in zentral organisierte Forschungsprogramme einbinden zu lassen, in Forschungsprogramme mit vorgegebenen Forschungszielen und standardisierten Forschungsmethoden. *Cataglyphis* ist eitel genug, ihre Geheimnisse nur zögernd und nur von ihr faszinierten Individualisten preiszugeben. Ich bin glücklich, über die Jahre hinweg immer wieder solche jungen unabhängigen Denker als Schüler gefunden zu haben: Neugierige, Wunderfitze; bereit, sich auf den schwankenden Boden der *Cataglyphologie* zu begeben. Auch wenn die Sieben von ihnen, die heute Professuren bekleiden, inzwischen längst mit anderen Organismen arbeiten, trägt ihnen *Cataglyphis* das nicht nach. Auch sie war explorativ und ist mittlerweile als international begehrtes Versuchsobjekt in mehrere andere Forschungsgruppen eingedrungen.

Damit hat sie mich – über die Biologie hinaus – vor allem eines gelehrt: Nachhaltige Forschungspolitik für unseren akademischen Nachwuchs muss in erster Linie heißen, den Rahmen abzustecken, innerhalb dessen sich kreatives Denken so frei wie nur möglich entfalten kann; muss heißen:

MARCEL-BENOIST-PREIS

Der Marcel-Benoist-Preis ist der älteste Wissenschaftspreis der Schweiz und der einzige, der direkt dem Bund unterstellt ist. Neben dem Louis-Jeantet- und dem Otto-Naegeli-Preis für Medizin ist er der bedeutendste Wissenschaftspreis in der Schweiz. 1914 wurde er vom französischen Anwalt Marcel Louis Benoist gestiftet. Benoist lebte während des Ersten Weltkriegs in Lausanne. Der Benoist-Preis ist mit 100 000 Franken dotiert und wird seit 1920 jährlich an Schweizer Wissenschaftler verliehen – sowohl für außerordentliche Leistungen in naturwissenschaftlichen als auch (seit 1997) in geistes- und sozialwissenschaftlichen Disziplinen. Nicht nur werden damit Forschungsarbeiten von höchster Qualität ausgezeichnet, sondern ebenso „la découverte ou l'étude la plus utile dans les sciences, particulièrement celles qui intéressent la vie humaine“ (Zitat aus dem Testament des Stiftungsgründers). (bri.)

hochkarätige Leistung zu fördern, wo immer sie sich zeigt. Die Besten unter den Jungen und nicht Wissenschaftsorganisationen werden entscheiden, wie sich die Forschungsfelder von morgen formieren. In diesem Sinne lassen Sie mich schließen mit einem Wunsch, mit einem Wunsch für die jungen Nachwuchsforscherinnen und -forscher, die ich hier zu meiner Freude so zahlreich vor mir sehe. Ich wünsche Ihnen, dass Sie alle Ihre *Cataglyphis* finden.

Leicht geänderte Fassung des Vortrags, den der Preisträger am 8. November 2002 in Zürich im neuen Chigon-Guyer-Auditorium der Universität Zürich gehalten hat.

Prof. Dr. **Rüdiger Wehner** (geb. 6. Feb. 1940 in Nürnberg) studierte Biologie in Frankfurt a. M., wo er bei Prof. Martin Lindauer (Schüler von Karl v. Frisch) promovierte. 1967 wurde er Assistent, 1974 Ordinarius für Zoologie und 1986 Direktor des Zoologischen Instituts der Universität Zürich. Seit 1969 Forschungen an *Cataglyphis*. R. Wehner wurde durch seine Arbeiten zur Himmelsnavigation bei Insekten – und bei Studenten insbesondere durch das mit Walter Gehring verfasste Lehrbuch „Zoologie“ – bekannt. Er ist Mitglied mehrerer Akademien, u. a. der Akademie Deutscher Naturforscher Leopoldina und der American Philosophical Society.

Universität Zürich, Zoologisches Institut, Winterthurerstrasse 190, CH-8057 Zürich