



Foto:  
Guido Westhoff

Neuronales Modell zum Infrarot-Sehen von Schlangen

## Jagdglück trotz schlechter Optik

**Herausragende Sinnesleistungen von Tieren versetzen immer wieder in Erstaunen. Auch an der TUM beschäftigen sich Forscher verschiedener Fachgebiete mit solchen oft sehr speziellen Sinnen und Fähigkeiten, die gerade an einer TU zur Umsetzung in technische Wirklichkeit einladen. Physiker um Prof. Leo van Hemmen vom Physik Department (T35) der TUM in Garching haben kürzlich ein neuronales Modell zum Infrarot-Sehen von Schlangen vorgestellt.**

Das neuronale Netz ist ein Paradebeispiel für ein biologisch inspiriertes theoretisches Konzept, das erfolgreich seinen Weg in die technische Anwendung gefunden hat. Das von den TUM-Physikern entwickelte neuronale Modell erklärt, wie manche Schlangen trotz der sehr geringen Qualität ihrer Infrarot-Optik ein äußerst präzises Abbild ihrer Umgebung erhalten.

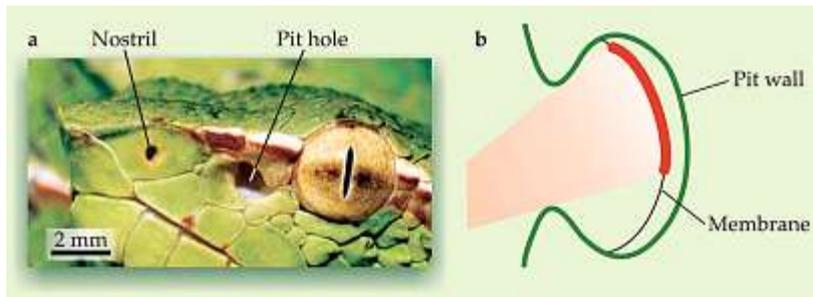
Zwei Schlangenfamilien, die Pitvipern (»pit vipers«) und die »boids«, besitzen ein infrarot-empfindliches Sinnessystem, das ihnen ermöglicht, ein zweidimensionales Abbild der Wärmeverteilung ihrer drei-

dimensionalen Umgebung wahrzunehmen. Die »pit viper« hat dazu links und rechts am Kopf nahe den Augen zwei Vertiefungen, die Grubenorgane oder »pit organs«. Darin befindet sich die freihängende, nur 15 Mikrometer dünne »Pitmembran« mit wärme-empfindlichen Zellen, die Temperaturänderungen von wenigen Milli-Kelvin registrieren können. Die Öffnung des Grubenorgans muss allerdings groß sein, damit die Schlange Beutetiere, also sich rasch bewegende Wärmequellen, schnell erkennen kann. Das bedingt die sehr schlechte optische Qualität des Grubenorgans als optisches Instrument. Dass die Schlangen trotz

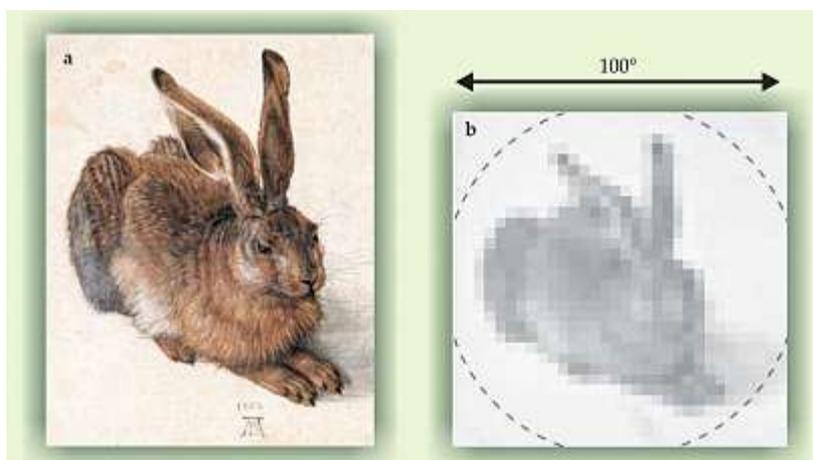
des absolut unscharfen Bildes auf der Pitmembran äußerst präzise Jäger sind, bezeichnet man als das Paradoxon des Infrarotsinns der Schlangen.

Die Physiker untersuchten, wie es trotz der schlechten optischen Qualität des Organs zu einem genauen neuronalen Abbild der Umgebung kommt. In ihrem Modell kompensierten sie die fehlende Linse durch eine neuronale Verarbeitung, gewissermaßen eine virtuelle Linse im Kopf der Schlange. Als »Beute« wurde Albrecht Dürers Aquarell »Junger Feldhase« gerastert und die Grauwerte als Wärmeverteilung in einem Inputvektor  $I$  gespeichert. Wichtig für die Berechnung der Wärmeverteilung  $S$  an der Pitmembran ist der lineare Zusammenhang zwischen  $I$  und  $S$ . Diese Herangehensweise ermöglicht die Definition einer Rekonstruktionsmatrix, die aus der Wärmeverteilung auf der Membran ein verwertbares Bild rekonstruiert. Jeder Punkt des rekonstruierten Bildes stellt sich also als eine Linearkombination aus allen Messpunkten der Wärmeverteilung auf der Pitmembran dar. Dies entspricht genau den Rechenoperationen, die ein neuronales Feed-Forward-Netz ausführen kann. Die einzelnen Einträge der Rekonstruktionsmatrix entsprechen dann den synaptischen Verbindungsstärken zwischen den Neuronen der Input- und der Outputschiicht des Netzes.

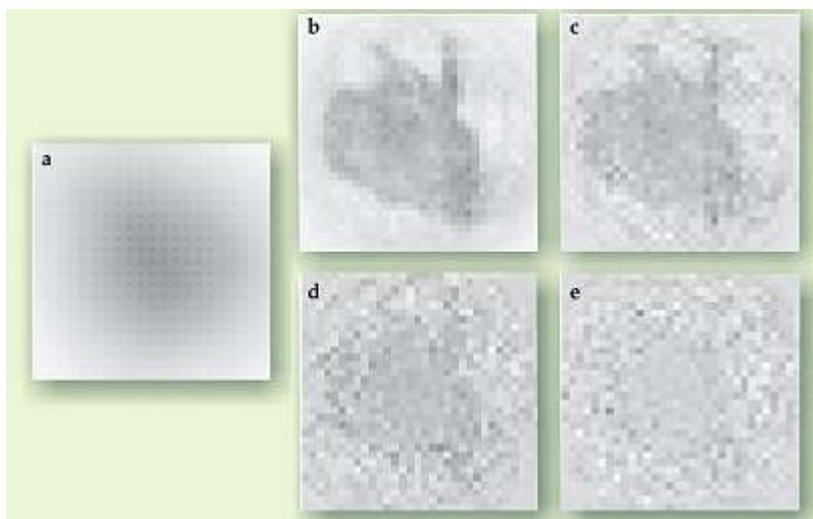
Um die richtigen Einträge der Rekonstruktionsmatrix zu erhalten, wurde ein quadratisches Fehlerfunktional zwischen dem echten und dem zu rekonstruierenden Input definiert. Es ergab sich, dass die Rekonstruktion sehr empfindlich auf Messfehler auf der Membran reagiert. Dies deckt sich mit der herausragenden Genauigkeit, mit der die Schlangen Wärmeunterschiede



Links: Das Profil einer Tempel-Viper mit der Öffnung des linken Grubenorgans (pit hole) zwischen Auge und Nasenöffnung (nostril). Rechts: Verhältnis beteiligter Größen. Die Öffnung des Grubenorgans ist etwa so groß wie der Abstand der Öffnung zur Pitmembran. Deshalb wird ein Punkt des Inputs als verschmierter Fleck abgebildet, ein Abbild der Umgebung ist nicht erkennbar (s. Abb. unten).



Die gerasterte (32x32 Pixel) Version (links) des Dürerschen Hasen dient beispielhaft als Wärmeverteilung. Die gestrichelte Linie zeigt das Sichtfeld des Grubenorgans mit etwa 100°.



Für die Aufgabe, den Hasen zu rekonstruieren, werden nur die Messwerte auf der Pitmembran (a) benutzt. b bis e: Rekonstruktion des hier vorgestellten Algorithmus bei unterschiedlichen Rauschpegeln (0.25, 1, 2 und 5 Prozent) auf der Membran und konstanten Modellparametern.

auf der Pitmembran messen können. Die rekonstruierte Wärmeverteilung hat auch eine neuronale Entsprechung: Biologen fanden im Schlangenhirn eine neuronale Karte des Infrarotsinns – eine Struktur im Zentralnervensystem, die eine Repräsentation der Umgebung darstellt, in der benachbarte Neuronen benachbarten Raumpunkten entsprechen. Davon ausgehend, können dann weitere Verarbeitungsschritte bis hin zur Bewegungssteuerung erfolgen.

Neuronale Karten findet man auch bei anderen sensorischen Systemen in der Tierwelt. Ihr Zustandekommen – also die neuronale Verschaltung der sensorischen Systeme sowie die Integration von Karten verschiedener sensorischer Systeme – kann weder genetisch exakt vorgegeben sein, noch führt ein unbekannter Teil des Nervensystems Matrixinversionen durch, um die genauen Synapsenstärken zu berechnen. Deshalb entwickelten die Physiker neuronal implementierbare Lernalgorithmen, mit denen sich zum Beispiel das Zustandekommen der neuronalen Karte des Oberflächen-Seitenliniensystems der Fische erklären lässt; damit können Fische Objekte allein aufgrund von Fluidbewegungen orten. Solche Erkenntnisse werden genutzt, um passive Ortungssysteme für Roboter zu entwickeln.

Leo van Hemmen

**Prof. Leo van Hemmen**  
**Fachgebiet Theoretische Physik (T35)**  
**Tel.: 089/289-12362**  
**lvh@ph.tum.de**