

**K**leine Gehirne, wie die von Fliegen, können große Gehirne, ganz zu schweigen von technischen Systemen, in manchen Leistungen bei weitem übertreffen. Ein Beispiel ist die Schnelligkeit der visuellen Bildverarbeitung. Dank eines breiten Spektrums von Forschungsansätzen beginnen wir die zu Grunde liegenden neuronalen Mechanismen zu verstehen.

Wer schon einmal zwei Fliegen bei ihren Verfolgungsjagden beobachtet hat, weiß um die rasanten Flugmanöver dieser kleinen Piloten. Während es menschlichen Beobachtern kaum möglich ist, den Flugkurs mit den Augen zu verfolgen, schafft es die verfolgende Fliege sogar, ihren schnell fliegenden Artgenossen zu fangen. Dabei verlässt sie sich weitgehend auf ihre großen Facettenaugen, die einen fast vollständigen Rundumblick ermöglichen. Diese übermitteln fortlaufend Bilder an das Gehirn, die dort in Bruchteilen von Sekunden ausgewertet und in Kurssteuersignale umgewandelt werden.

Um kennen zu lernen, was die Fliege bei ihren rasanten Manövern alles sieht, versetzen wir uns in Gedanken in das Cockpit des Tieres. Gleich nach dem Start beginnt sich die Umwelt vor beiden Augen von vorne nach hinten an uns vorbei zu bewegen. Plötzlich macht die Fliege eine ruckartige Drehung nach links: dabei bewegt sich die Umwelt in unserem Blickfeld kurzzeitig nach rechts. Unvermittelt nähern wir uns einem Hindernis: Dieses scheint immer größer zu werden und seine Konturen verschieben sich von der Mitte des Sehfelds zu dessen Randbereichen. Durch eine weitere ruckartige Drehung nach rechts, die mit großflächigen Bildverschiebungen nach links einhergeht, gelingt es der Fliege, dem Hindernis auszuweichen. Jetzt kommt das Zielobjekt, eine andere Fliege, in den Blick. Auch sie bewegt sich, jedoch mit einer anderen Geschwindigkeit als die Umwelt. Die dadurch auftretende Relativbewegung macht die verfolgte Fliege vor dem Hintergrund sichtbar. Die Verfolgung kann beginnen.

Ein derartiger Bildfluss tritt nicht nur auf den Augen von Fliegen auf,

# Im Cockpit der



# Fliege

*Kleine Gehirne können große Gehirne an Leistung bei weitem übertreffen. So hat sich die Fliege als hervorragendes Modellsystem für die Bildverarbeitung im Gehirn erwiesen*



Ihren kugelförmigen Facettenaugen verdankt die Fliege einen fast vollständigen Rundumblick. Dadurch ist es ihr auch möglich, fliegende Artgenossen bei hoher Geschwindigkeit zu verfolgen.

sondern auch auf unseren Augen, wenn wir uns zum Beispiel im Straßenverkehr bewegen. Allerdings sind die Veränderungen des Bildflusses während der Flugmanöver von Fliegen um ein Vielfaches schneller als die auf den Augen von Menschen. Dies gilt sogar für Formel 1-Rennfahrer oder Piloten von Düsenjets. So können Fliegen bis zu zehn ruckartige Drehungen pro Sekunde machen, bei denen sie Drehgeschwindigkeiten von bis zu 5000 Grad pro Sekunde erreichen. Derartige Drehgeschwindigkeiten könnten Menschen schon körperlich überhaupt nicht aushalten.

Die Fliege hat sich als hervorragendes Modellsystem erwiesen, um den Prozessen im Gehirn, die der Verarbeitung des Bildflusses auf den Augen dienen, auf die Spur zu kommen. Zum einen ist das Sehsystem der Fliege auf die Lösung dieser Aufgabe optimiert. Zum anderen ist hier die experimentelle Analyse mit einem breiten Methodenspektrum möglich. Alle Methoden zur Untersuchung der neuronalen Schaltkreise können im weitgehend intakten Tier eingesetzt werden. Deshalb ist es möglich, die Vorgänge im Gehirn zu untersuchen, während dieses seine natürlichen sensorischen Eingangssignale erhält.

**D**ie neuronalen Schaltkreise, die bewegte Bilder auf der Netzhaut der Fliege auswerten, konnten mittlerweile in ihren Grundzügen aufgeklärt werden. Die Bildbewegungen werden nicht unmittelbar vom Auge wahrgenommen. Vielmehr nimmt das Auge der Fliege lediglich eine sich ständig ändernde Helligkeitsverteilung wahr. Daraus muss das Gehirn in einer Reihe von Verarbeitungsschritten Informationen über die Bildbewegungen auswerten. Auf diese Weise wird die Flut an Informationen, die in den Netzhautbil-

dem enthalten ist, auf das Wesentliche reduziert.

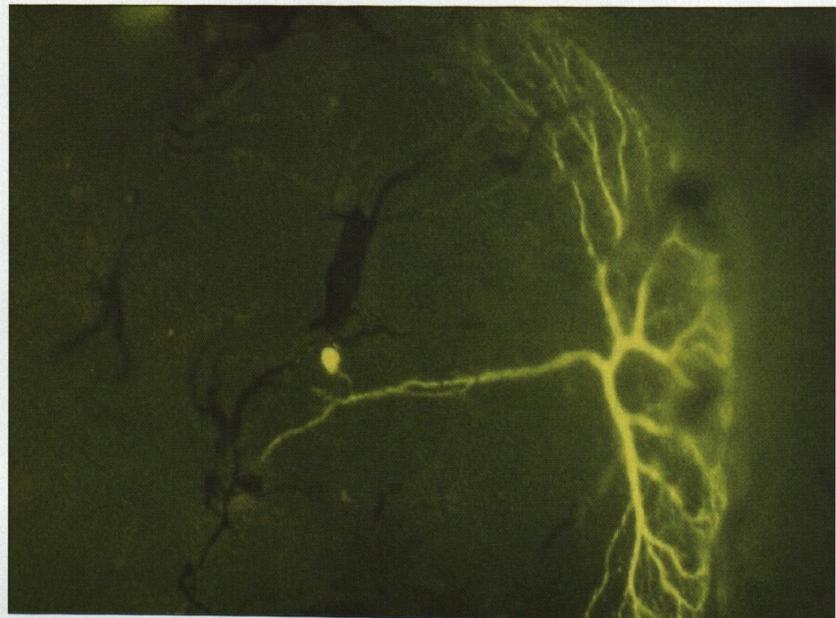
Die Lichtsinneszellen auf der Netzhaut einer Fliege registrieren von ihrer Umwelt nur die Helligkeitswerte. Die nächst höhere Gruppe von Nervenzellen, die lokalen Bewegungsdetektoren, vergleichen die Helligkeitsinformationen benachbarter Lichtsinneszellen und reagieren nur bei einer räumlichen oder zeitlichen Änderung der Helligkeit. Bewegung wird signalisiert, wenn zwei benachbarte Lichtsinneszellen kurz hintereinander denselben Helligkeitswert melden, zum Beispiel hell-hell. Dabei reagiert jeder Bewegungsdetektor am stärksten auf die Bewegung in eine bestimmte Richtung. Die Informationen vieler lokaler Bewegungsde-

diesen Versuchen wurden beispielsweise schwarze Balken vor den Augen der Fliege bewegt und die Nervenetze zur visuellen Bildverarbeitung elektrophysiologisch analysiert. Für die elektrophysiologische Analyse werden feine Messsonden in einzelne Nervenzellen eingeführt und deren elektrische Aktivität registriert. Mit diesen Experimenten kann man aber nicht herausfinden, wie Informationen über die Umwelt im normalen Kontext, zum Beispiel beim Umherfliegen, verarbeitet werden.

malige Präsentation eines Reizes. Zum anderen werden visuelle Reize in realen Verhaltenssituationen nicht wie in einem Experiment von außen vorgegeben sondern durch die Art und Weise bestimmt, in der sich das Tier bewegt.

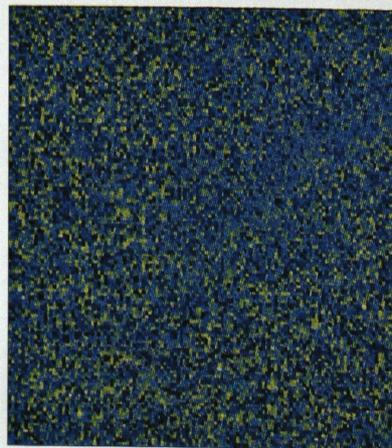
Um die neuronale Verarbeitung von natürlichen visuellen Reizen zu studieren, entwickelten wir eine Art Panoramakino für Fliegen ('Fli-MaxX'), das es erstmals erlaubt, den Bildfluss, den Fliegen im freien Flug gesehen haben, einer auf einer Halterung befestigten Fliege vorzu-

Mit einem fluoreszierenden Farbstoff wurde die Nervenzelle einer Fliege gefüllt. Sie reagiert am besten auf kleine bewegte Objekte. Unten: Ein bildgebendes Verfahren macht die neuronale Informationsverarbeitung deutlich. Links ist die verzweigte Ausgangsregion einer Nervenzelle zu sehen. Bewegt sich etwas im Sehfeld der Fliege, strömt Calcium in die Nervenzelle. Dies wird in der Bildfolge durch zunehmende Gelbfärbung deutlich.

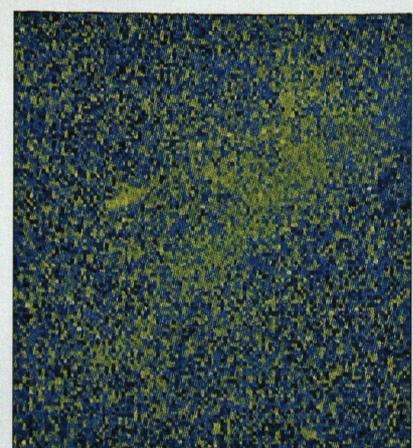


tektoren werden von integrierenden Neuronen zusammengefasst. Diese sind in der Lage, charakteristische Verhaltenssituationen, beispielsweise einen Kurvenflug zu erkennen.

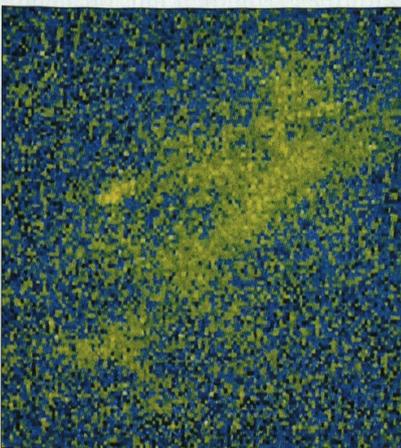
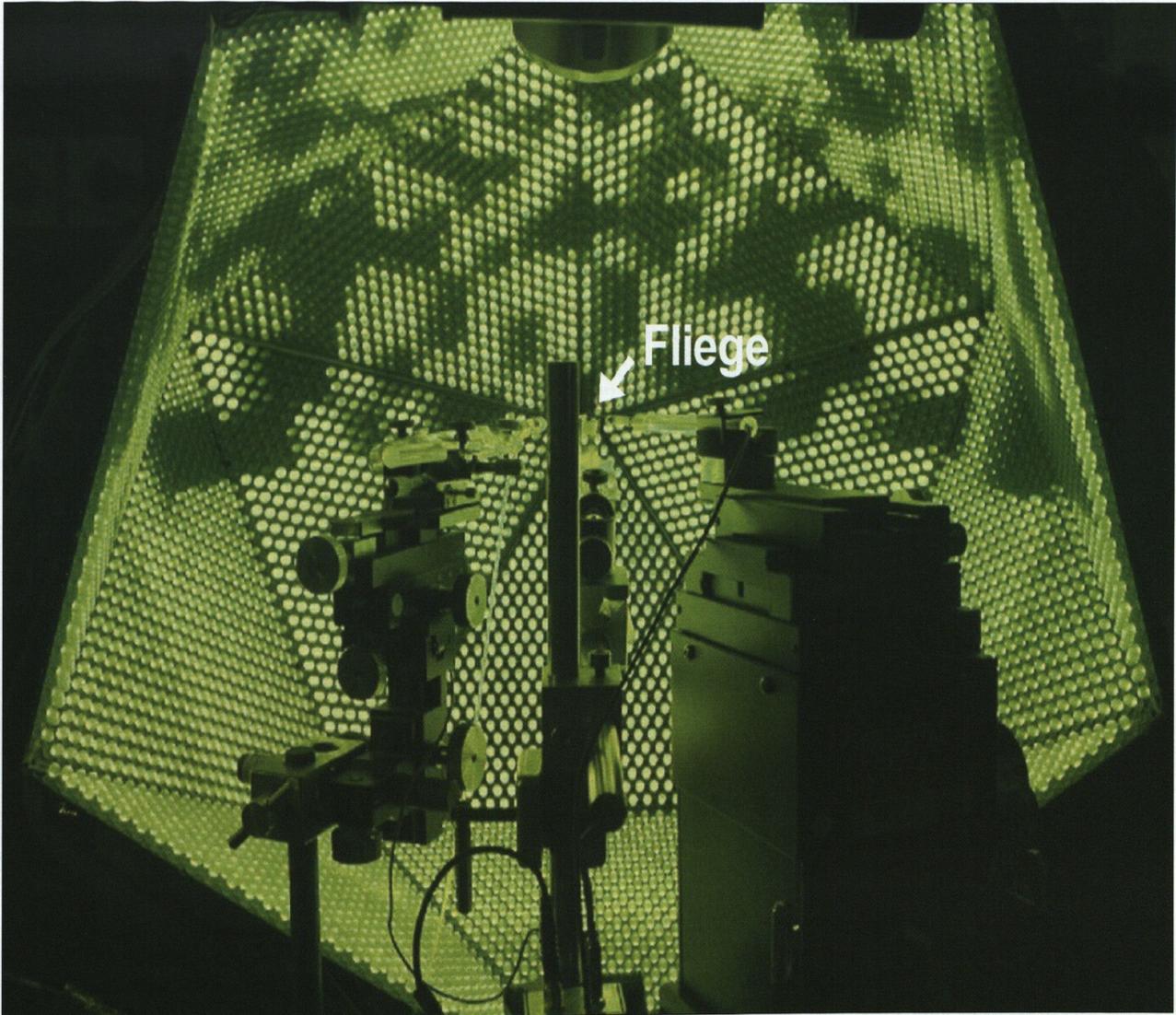
Diese Erkenntnisse wurden anhand von Untersuchungen mit relativ einfachen Reizen gewonnen. Bei



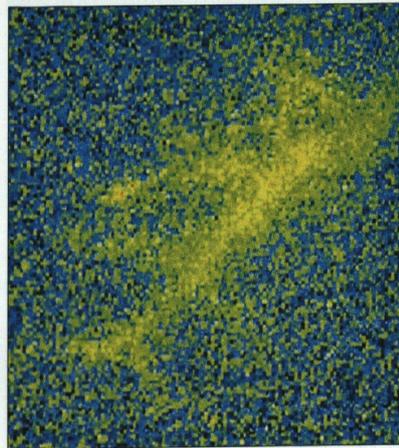
Wenn man untersuchen will, wie diese natürlichen visuellen Eindrücke verarbeitet werden, muss man zwei Aspekte beachten. Zum einen sind Neurone, zumindest verglichen mit technischen Schaltelementen, ausgesprochen unzuverlässig, das heißt, sie reagieren sehr unterschiedlich auf die mehr-



spielen und dabei gleichzeitig die Aktivität ihrer Nervenzellen zu registrieren. Beim Menschen beginnen aufeinander folgende Bilder eines Kinofilms schon bei 25 Bildern pro Sekunde zu einem natürlichen Eindruck zu verschmelzen. Das zeitliche Auflösungsvermögen des Sehsystems der Fliege ist jedoch



ungleich höher als das des Menschen. Der Film in unserem ‚FliMaxX‘ wird daher mit einer Geschwindigkeit von 370 Bildern pro Sekunde abgespielt. Bei dieser Geschwindigkeit verschmelzen die Bildsequenzen vor den Augen der Fliege zu einem natürlichen Eindruck, wie er während schneller

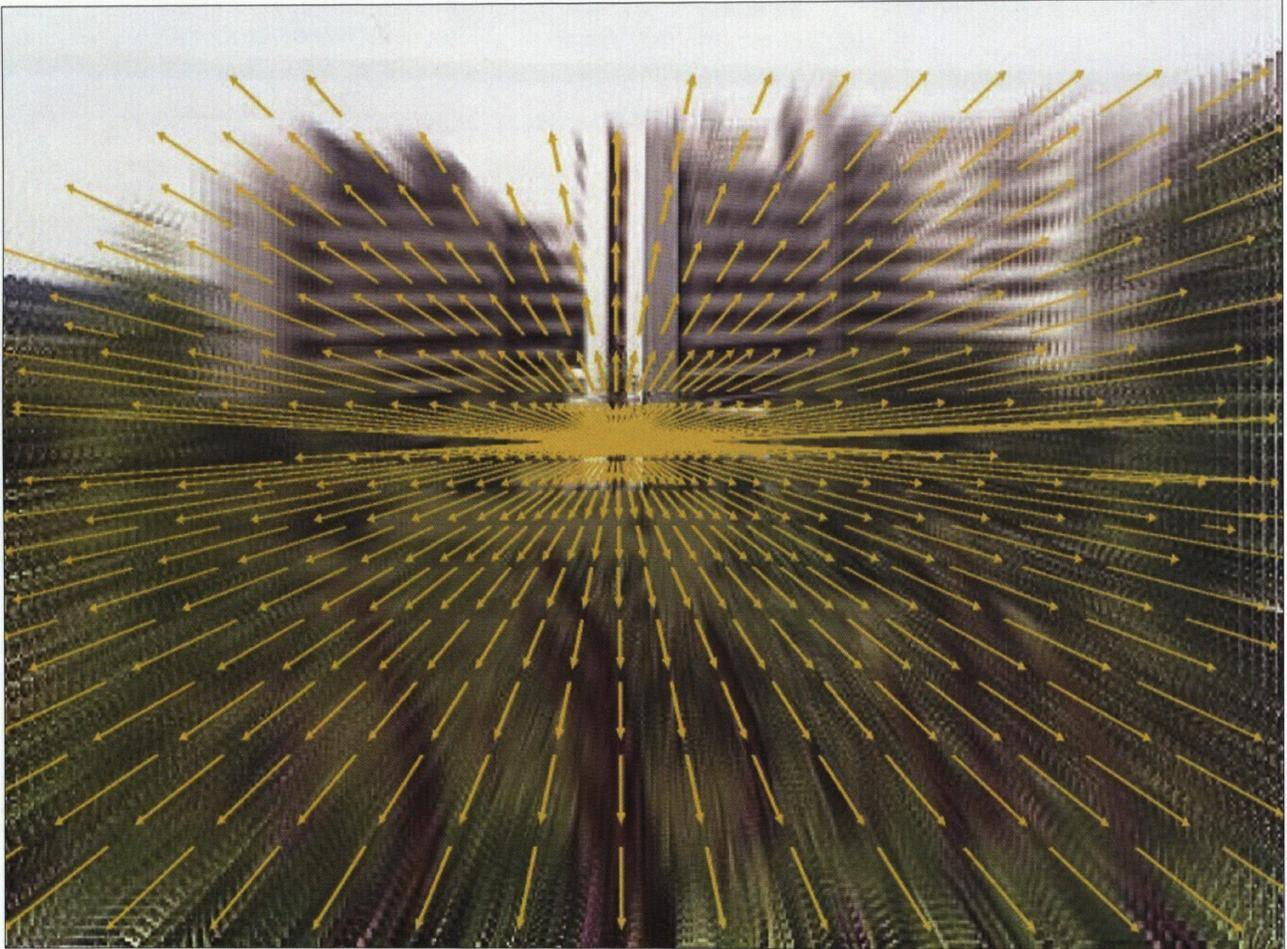


Flugmanöver auf den Augen auftritt.

Laufende Untersuchungen im ‚FliMaxX‘ legen nahe, dass die Mechanismen der visuellen Bildauswertung bei Fliegen nur deshalb so schnell und effizient in der Lage sind, dem Gehirn die notwendige Information über die Umwelt zur

Für die Untersuchung der Hirnleistung von Fliegen wurde eigens das Panoramakino „FliMaxX“ entwickelt. Die Fliege befindet sich in dessen Zentrum und blickt auf den Schirm. Von hinten werden feine Messsonden in ihr Gehirn eingeführt.

Verfügung zu stellen, weil sie nur relativ wenige Schaltelemente benötigen. Diese einfachen Mechanismen funktionieren zwar nicht unter allen erdenklichen Bedingungen, dafür aber besonders gut, wenn sich das Tier in seinem normalen Verhaltenskontext befindet. Die Verarbeitung der visuellen Eindrücke ist also optimal an die spezifischen Gegebenheiten des Fliegenlebens angepasst. Ob diese Überlegungen zutreffen, muss durch eine detaillierte Modellierung getestet werden. Dazu entwickelte unsere Ar-



Kurs Bielefeld: Wer sich auf einem geradlinigen Weg der Universität nähert, dem wird ein solcher Bildfluss auf die Augen projiziert. Die Pfeile deuten schematisch die unterschiedlichen Richtungen und Geschwindigkeiten des Bildflusses in den verschiedenen Sehfeldbereichen an.

beitsgruppe ein Computerprogramm, das die neuronale Verarbeitung der Netzhautbilder der freifliegenden Tiere simuliert. Dabei berücksichtigten wir die bisherigen Erkenntnisse über die neuronale Verarbeitung der Bilder und die Tatsache, dass Nervenzellen auf denselben Reiz nicht immer gleich reagieren. Schon mit der ersten Version einer ‚Virtuellen Fliege‘ konnten wir wesentliche Aspekte der visuellen Bildverarbeitung auch unter den Bedingungen normaler Verhaltenssituationen erklären. Derzeit sind wir dabei, die ‚Virtuelle Fliege‘ zu einem autonom agierenden Agenten weiter zu entwickeln,

der in komplexen Umwelten ähnlich effizient und virtuos navigieren kann wie die reale Fliege.

Auch wenn die Entwicklung der ‚Virtuellen Fliege‘ vor allem aus wissenschaftlichem Interesse verfolgt wird, könnten die Mechanismen biologischer Informationsverarbeitung wertvolle Anregungen für die Entwicklung technischer Systeme liefern. Tatsächlich ist dies bereits in verschiedenen Arbeitsgruppen in Europa und den USA gelungen. Sie nutzten Modelle, die für Teile des Bewegungssehensystems der Fliege entwickelt wurden, zur Entwicklung von Computerchips, die bei der Steuerung von Robotern eingesetzt werden. Trotzdem gibt es derzeit noch kein technisches System, das die Aufgaben der Flugsteuerung so schnell lösen kann wie die Fliege.

Mechanismen zur autonomen Navigation, zur Vermeidung von Hindernissen und zur Verfolgung bewegter Ziele sind im technischen Bereich von zentraler Bedeutung, insbesondere wenn sie relativ einfach und effizient sind.

Dies ist bei der Fliege gegeben, denn sie erbringt ihre Leistungen mit einem Gehirn, das nicht mehr als 1 Milligramm (!) wiegt. Möglich wird dies sicherlich nur, da neuronale Schaltkreise in biologischen Systemen einer sehr viel längeren Testphase unterliegen, als dies für irgendein technisches System möglich ist. Oder sollten 200 Millionen Jahre Evolution nicht ausgereicht haben, um im Wechselspiel von Mutation und Selektion zu möglichst sparsamen und hinreichend ausgefeilten Lösungen für die Ausstattung des Cockpits der Fliege geführt zu haben?

*Prof. Dr. Martin Egelhaaf  
Dr. Roland Kern,  
Dr. Rafael Kurtz,  
PD Dr. Anne-Kathrin Warzecha  
Universität Bielefeld*

Das Projekt wurde von der DFG im Normalverfahren sowie im Rahmen des Graduiertenkollegs „Verhaltensstrategien und Verhaltensoptimierung“ gefördert.