

Können theoretische Methoden der Naturwissenschaften, der Mathematik und der Informatik zum Verständnis von »Gehirn« oder »Geist« beitragen? Können sie das Verständnis der Zusammenhänge zwischen »Gehirn« und »Geist« vertiefen? Wir wollen uns im Folgenden auf naturwissenschaftliche Zugänge zu diesen Fragen konzentrieren und philosophische Aspekte des Themas dabei im Wesentlichen ausklammern. Unter »Geist« verstehen wir mentale Aktivitäten wie Erinnern, Lernen und Verallgemeinern, Aufmerksamkeit, Angst, Kreativität oder Selbstbewusstsein, während wir als »Gehirn« das biologische Substrat bezeichnen, in dem diese Aktivitäten sich vollziehen. Bei allen Arbeiten, auf die wir uns beziehen werden, besteht weitgehende Einigkeit darüber, dass Gehirnaktivitäten Bedeutung erst in der Wechselwirkung mit einer »Umwelt« gewinnen. Für ein Gehirn ist »Umwelt« die Gesamtheit aller einlau-

»Geist« eine Software und »Gehirn« eine Hardware ist, Geist und Gehirn sich also zueinander verhalten wie ein Computerprogramm zu den Chips oder Transistoren eines Computers. Normalerweise lernt man durch das Studium von Transistoren nichts über Software, und es ist, ganz

so im Laufe der Evolution, könnte aber auch ganz anders sein). Dabei ist der entscheidende Aspekt, dass ein Gehirn aus sehr stark miteinander vernetzten, ziemlich gleichartigen Einzelbauelementen, den Nervenzellen (Neuronen), besteht. Die Besonderheiten mentaler Fähigkeiten entstehen

Schwarze Kästen, Moleküle und Gedanken

Die Balance zwischen Theorie und Experiment

Reiner Kree

vorsichtig gesagt, mehr als schwierig, aus hin- und herlaufenden elektrischen Impulsen in einem Computer herauszulesen, welche raffinierten Programme gerade ablaufen oder gar, auf welchen cleveren Algorithmen

als kollektive Eigenschaften dieses neuronalen Netzwerks. Für das theoretische Verständnis solcher Eigenschaften, die in den einzelnen Bausteinen noch nicht vermutet werden können, stellt die Statistische Physik leistungsfähige

fenden und auslaufenden Aktivitäten, nicht nur von und in die Außenwelt, sondern auch von und in die Innenwelt des Organismus.

Drei ganz verschiedene Ansätze zum Studium des Problems werden in neueren wissenschaftlichen Arbeiten verwendet: der funktionalistische, der konnektionistische und der neurobiologische Ansatz. Wir wollen sie zunächst einmal kennen lernen. Der funktionalistische Ansatz geht von der Hypothese aus, dass »Geist« auch mit anderen Substraten als mit einem Gehirn (im neurobiologischen Sinn) funktionieren könnte. Das führt zur »Computer-Metapher«, in der

sie beruhen. Als Konsequenz lautet das funktionalistische Forschungsprogramm: Zum Verständnis von »Geist« soll man Psychologie, aber nicht Neurobiologie studieren. Die Erkenntnisse über den Geist lassen sich unabhängig vom Studium physiologischer Aktivitäten gewinnen und in abstrakten Regeln einer »Künstlichen Intelligenz« formulieren. Ein solches Programm, bei dem permanent darüber nachgedacht wird, »wie« man nachdenkt, läuft allerdings leicht Gefahr, Tautologien zu produzieren.

Für den konnektionistischen Ansatz sind nur ganz wenige, substrat-spezifische Merkmale wichtig (der Rest ergab sich eben

hige Methoden bereit. Dieses Forschungsgebiet wird in Göttingen durch die Arbeitsgruppen von Prof. Dr. Annette Zippelius und von mir vertreten. Statistische Physik beschäftigt sich schon seit vielen Jahrzehnten erfolgreich mit Problemen der spontanen Musterentstehung, wie beispielsweise der Entstehung komplizierter Kristalle aus kugelsymmetrischen Atomen. Der zentralen Hypothese des konnektionistischen Ansatzes entsprechend ist »Wissen« gespeichert in Verbindungen zwischen Neuronen. »Denken« entspricht elektrophysiologischen Signalen, die zwischen den Neuronen als Botschaften ausge-

tauscht und von den Empfängerneuronen weiter verarbeitet werden. »Lernen« entsteht durch Veränderungen der Verbindungen nach mechanistischen Regeln als Reaktion auf Sinneserfahrungen aus der Umwelt.

Für den neurobiologischen Ansatz ist das Gehirn schließlich Teil eines Gesamtorganismus und ein Stück biologischer Materie, in dem die Umwelt durch eine Vielzahl molekularer Strukturen (einzelne Moleküle, Molekülkomplexe, Zellorganellen, Zellen,

Methoden der Naturwissenschaften gewonnen werden können. In diesen Grenzgebieten liegen auch die Beiträge unserer Arbeitsgruppen. Sie arbeiten dabei im Rahmen des Graduiertenkollegs 723 »Raumzeitliche Prozesse in Neuronen und zelluläre Biophysik« und im DFG Forschungszentrum Molekularphysiologie des Gehirns (CMPB) mit experimentellen Gruppen der Medizinischen Fakultät und des Göttinger Max-Planck-Instituts für biophysikalische Chemie zusam-

wichtigen Zutaten sind dabei »Stellschrauben«, mit denen sich die Regel eines Kastens verändern lässt. Beim so genannten »überwachten Lernen« spielt die Umwelt die Rolle eines »Lehrers«. Durch sie wird die Input-Output Relation bewertet (»War die Reaktion richtig?«) und die Bewertung an den Kasten zurückgemeldet (»Belohnung« oder »Strafe« bei richtiger beziehungsweise falscher Reaktion). Der Kasten benutzt nun die Rückmeldung, um an den Stellschrauben

Zellverbände) repräsentiert wird. Potenziell kann jede vorhandene molekulare Struktur und jeder molekulare Prozess Bedeutung bei der Repräsentation mentaler Zustände übernehmen. Die in den Zellen und zwischen den Zellen eines Gehirns ablaufenden Prozesse sind biologisch, das bedeutet, sie unterscheiden sich nicht prinzipiell von Prozessen in anderen Teilen eines Organismus. Sie werden in einem Gehirn nur in besondere und besonders flexible Beziehungen zu den Umwelterfahrungen gestellt. Es gibt, wie wir noch sehen werden, im Rahmen dieses Ansatzes keine Trennung zwischen Software und Hardware. Man muss die gesamte Neurobiologie studieren, um die molekularen und zellulären Symbole zu verstehen, die den »Geist« ausmachen.

Auf sich allein gestellt scheint keiner der drei Ansätze geeignet, die Fragen nach dem Verhältnis von »Gehirn« und »Geist« beantworten zu können. Wir wollen nun im Folgenden illustrieren, dass spannende Einsichten in den Grenzgebieten zwischen den Ansätzen mit Hilfe theoretischer

men. Graduiertenkolleg und Forschungszentrum werden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziert.

Lernen, Erinnern und Problemlösungen

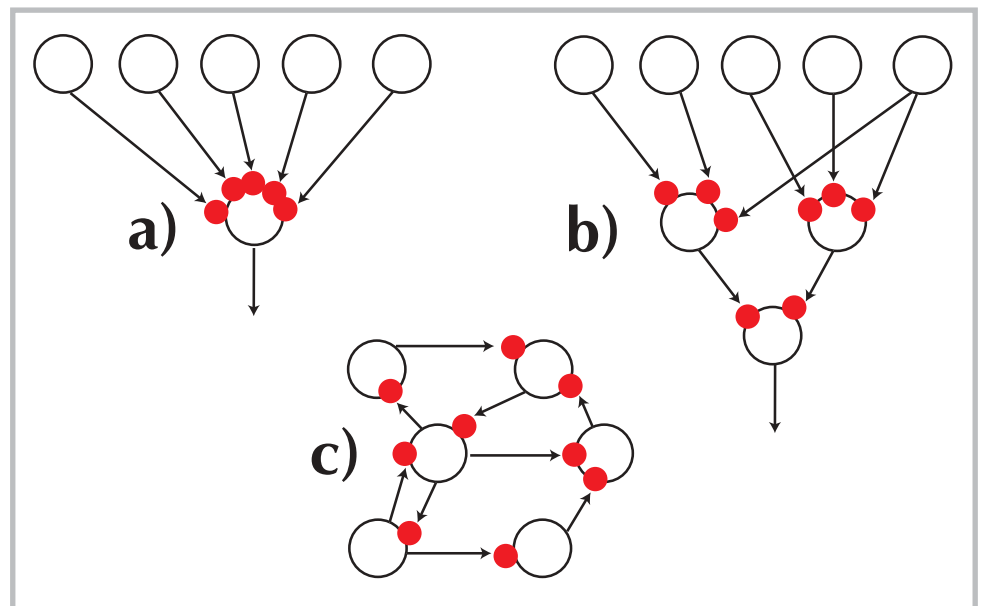
Eine Grundstruktur des funktionalistischen Ansatzes ist die »black box«. Ein solcher Kasten reagiert auf Eingangsaktivität (Input) mit einer Ausgangsaktivität (Output), die der Kasten nach festen Regeln aus dem Input bestimmt. Wie die Maschinerie in dem Kasten beschaffen ist, interessiert black box-Forscher nicht. Sie möchten nur die Regel kennen, die der Kasten repräsentiert. Die einfachsten »schwarzen Kästen« beschreiben fest gefügte, mentale Aktivitäten nach dem Reiz-Reaktions-Schema, also feste Reflexe wie es beispielsweise der Knie-sehnenreflex ist. Natürlich sind solche »fest verdrahteten« Regeln so stereotype mentale Aktivitäten, dass der Erklärungsbedarf hierbei nicht hoch ist. Eine typische »höhere« mentale Aktivität, über die man sehr wohl staunen kann, ist das Lernen. Wie werden schwarze Kästen lernfähig? Die ersten

der eigenen Regel zu drehen und sie nach Möglichkeit so zu verändern, dass er in Zukunft nur richtige Input-Output Verknüpfungen liefert, die den Lehrer zufrieden stellen. Dazu benutzt er wiederum mechanistische Regeln, die so genannten Lernregeln.

Eine große Hoffnung der black box-Forschung bestand darin, aus Beobachtungen einfache Regeln für die Änderung der Stellschrauben zu finden, und dadurch »lernende Automaten« für komplizierte Aufgaben bauen zu können. Leider ist im Rahmen des funktionalistischen Ansatzes nicht klar, wie man die Lernregeln experimentell erforschen kann. Aus der kognitiven Psychologie ist zwar der Mechanismus des Lernens durch Bestätigung oder Belohnung (ebenso wie das Lernen durch Bestrafung) bekannt. Aber wie setzt man die Qualität der Rückmeldungen, nämlich »Belohnung« oder »Strafe« in ein sinnvolles, abstraktes Schema von Lernregeln um?

An dieser Stelle überschreiten wir die Grenzen des funktionalistischen Ansatzes und ziehen auch Elemente des Konnektionismus

mit in Betracht, um zu Lösungen des Lernregelproblems zu gelangen. Dazu öffnen wir die schwarzen Kästen und werfen einen Blick in die Maschinerie eines Gehirns, allerdings einen sehr eingeschränkten Blick, der sich nur auf die elektrischen Aktivitäten konzentriert. Wir sehen eine Ansammlung von Neuronen, die lange, kabelartige Fortsätze (Axone) ausbilden. Neuronen können elektrische Impulse aussenden, die entlang der Axone laufen. Es ist eine Eigenschaft des Axon-Kabels, dass alle dort laufenden elektrischen Impulse exakt gleich sind. Axone enden entweder auf »Output-Zellen«, die die innere oder äußere Umwelt beeinflussen (wie beispielsweise Muskel- oder Drüsenzellen), oder auf anderen Neuronen. Die Verbindungsstellen zwischen Axon und Neuron, genannt Synapsen, übertragen die elektrischen Impulse von den Axonen auf ein Neuron, wobei sie allerdings die Impulse in Typ und Stärke verändern. Dabei gibt es zwei Grundtypen von Synapsen, erregende – exzitatorische – und hemmende – inhibitorische –, deren Bedeutung wir gleich erklären. Das Neuron summiert alle innerhalb eines kleinen Zeitintervalls einlaufenden Impulse zu einem Gesamtwert auf und vergleicht diesen Wert mit einem eingebauten positiven Schwellenwert. Die Signale von erregenden Synapsen zählen dabei positiv und bringen das Neuron aus dem Ruhezustand dem Schwellenwert näher, die von hemmenden Synapsen zählen negativ und treiben es vom Schwellenwert wieder fort. Übersteigt der Gesamtwert den Schwellenwert, so »feuert« das Neuron ein elektrisches Signal längs seines Axons, andernfalls bleibt es in Ruhe. Das ist, soweit es die elektrische Aktivität angeht, alles. Die ganze Struktur erinnert sehr an einen komplexen Schaltkreis der Digitalelektronik. Unsere Gehirne bestehen aus etwa 100 Milliarden



Neuronen mit durchschnittlich 10.000 Synapsen pro Neuron, die dauernd Signale übertragen. Die beschriebenen Aktivitäten finden alle auf einer Zeitskala von einer tausendstel Sekunde statt. Verglichen mit elementaren Operationen in Computerchips, die nur noch milliardstel Sekunden in Anspruch nehmen, ist das ziemlich langsam.

Das fest gefügte Schema der Verbindungen zwischen Neuronen bestimmt die Architektur des neuronalen Netzwerks (siehe Abb. 1 a, b, c). Experimentell findet man, dass Synapsen natürliche »Stellschrauben« des neuronalen Netzwerks sind. Zwar bleiben hemmende Synapsen immer hemmend und erregende Synapsen immer erregend, aber die Stärke der übertragenen elektrischen Impulse an den Synapsen ist nicht ein für alle Mal festgelegt, sondern kann sich durch verschiedene Einflüsse ändern. Man spricht von synaptischer Plastizität. Damit sind Synapsen Strukturen, an denen Lernregeln ansetzen könnten. Donald Hebb stellte 1949 die äußerst fruchtbare Hypothese auf, dass das »Lernen durch Bestätigung« eine einfache Realisierung auf der Ebene von Neuronen und Synapsen haben könnte (Abb. 2). Falls eine erre-

Abb. 1
 Wichtige Architekturen neuronaler Netzwerke: Die Kreise repräsentieren Neuronen, die roten Punkte Synapsen. Axone, die »Kabelverbindungen« zwischen Neuronen, sind als schwarze Striche mit Pfeilen dargestellt. Elektrische Impulse laufen nur in Pfeilrichtung. Die Architekturen sind bekannt als a) Perzeptron, b) mehrschichtiges Perzeptron oder Perzeptron mit verborgenen Neuronen (»hidden units«), c) rekurrentes Netzwerk, bei dem zu beachten ist, dass Impulse über Schleifen von Axonen sozusagen »im Kreis« laufen können.
 Grafik: Reiner Kree

gende Synapse zu einer Zeit Signale übertrug, als das von ihr beeinflusste Neuron auch tatsächlich elektrische Impulse abfeuerte, so hat sie – aus lokaler Sicht der Nervenzellen – ihre Sache richtig gemacht und sollte bestärkt werden. Die Bestärkung besteht darin, dass ihr erregendes Signal, das sie pro einlaufendem Axon-Impuls erzeugt, in Zukunft vergrößert wird. Dadurch nimmt ihr Einfluss auf das weitere Verhalten des Neurons zu. Dies ist die Grundversion der »Hebbischen Lernregel«, von der es zahlreiche Varianten gibt, darunter eine eigene Lernregel für hemmende Synapsen.

Es ist schwer vorstellbar, dass mit einer so simplen mechanistischen Lernregel mentale Fähigkeiten entstehen können, die wesentlich über das einfache Reiz-Reflex-Schema hinausgehen. Physiker, Informatiker und Ingenieure haben jedoch mit theoretischen Methoden sehr überzeugend die

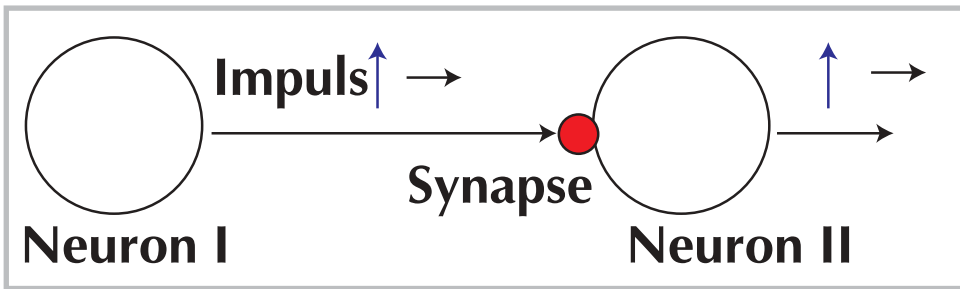


Abb. 2
Die Hebb'sche Lernregel: Neuron I feuert elektrische Impulse (blau), die über das Axon zu einer Synapse von Neuron II laufen. Tragen diese Impulse erfolgreich dazu bei, dass Neuron II nach Summation aller innerhalb einer kurzen Zeitspanne einlaufenden Pulse selber elektrische Impulse aussendet, sind also Neuron I und Neuron II in diesem Sinn synchron aktiv, so wird zukünftig die Synapse bei Erregung durch Neuron I ein stärkeres Signal an Neuron II übertragen. Diese Regel wurde durch neurobiologische Experimente bestätigt.
Grafik: Reiner Kree

enorme Leistungsfähigkeit mechanistischer Lernregeln unter Beweis stellen können, denn das vereinfachte konnektionistische Bild eines neuronalen Netzwerks ist einer mathematischen Analyse zugänglich und lässt sich sehr effizient mit Computersimulation studieren. So entstand in den letzten zwei Jahrzehnten sowohl eine ausgefeilte Theorie des Lernens in neuronalen Netzwerken als auch eine Fülle technischer Anwendungen künstlicher neuronaler Netzwerke. Solche Netzwerke lernen allein durch die Präsentation von Beispielen mit Hilfe der Hebb'schen Regel oder einer verwandten mechanistischen Lernregel äußerst beeindruckende Dinge, beispielsweise das Erkennen von natürlicher Sprache, von Handschrift, die Lösung vertrackter kombinatorischer Probleme, die optimale Steuerung von Maschinen und vieles mehr. Auch scharfe Kritiker des Ansatzes müssen zugeben, dass solche »mentalen Leistungen« sehr weit von dem einfachen Reiz-Reaktions-Schema entfernt sind.

Wichtiger für ein besseres Verständnis der Gehirn-Geist-Beziehung als die Menge an technischen Beispielen ist jedoch, dass grundlegende Fragen über die Leistungsfähigkeit und Grenzen des Lernens, die sich im Rahmen des black box-Ansatzes sehr

rasch aufdrängen, in dem erweiterten Ansatz mit mathematischer Genauigkeit beantwortet werden können. Zu solchen Fragen gehören beispielsweise: Kann ein neuronales Netzwerk eigentlich alle möglichen Regeln zwischen Input und Output lernen? Antwort: Ja, wenn es die Architektur eines »mehrschichtigen Perzeptrons« hat. (Abb. 1b.) Wie gut kann ein neuronales Netzwerk nach einigen Beispielen verallgemeinern, wie sieht seine Lernkurve aus? Antwort: Man kann für viele Problemstellungen, Netzwerkarchitekturen und Lernregeln die Verallgemeinerungsfähigkeit und die Lernkurve exakt berechnen. Kann ein Netzwerk auch unlogisch, also assoziativ denken, so wie wir? Antwort: Ja. Sind die gelernten Fähigkeiten robust gegen Störungen, wie zum Beispiel dem Durchtrennen einiger Synapsen oder dem Absterben einiger Neurone? Antwort: Ja, rekurrente Netzwerke sind sogar verblüffend robust und verlieren ihre Fähigkeiten immer nur graduell, wie verblassende Erinnerungen (Abb. 1c.) Was passiert eigentlich bei »sozialer Interaktion« zwischen Netzwerken verschiedener Struktur oder verschiedenem Lernhintergrund? Antwort: Die gegenseitige Lernfähigkeit hat genau bestimmbare Grenzen.

An Antworten auf solche prinzipiellen Fragen beteiligten sich unsere Arbeitsgruppen mit etlichen Originalarbeiten, Diplom- und Doktorarbeiten und Beiträgen zu Monographien. Besonders originelle Arbeiten wurden auf diesem Gebiet von Prof. Dr. Andreas

Engel geleistet, der inzwischen auf eine C4-Proffur der Universität Magdeburg berufen wurde.

Neurobiologie und »Geist«

Hebbs Lernregel war zunächst nur eine Hypothese, die zeigen sollte, dass Lösungen für das Lernregelproblem denkbar sind. Die »Konnektionisten« waren daher sehr angenehm überrascht, als es in neurobiologischen Experimenten tatsächlich gelang, die Existenz einer Hebb'schen Regel für die synaptische Plastizität in Gehirnen auch nachzuweisen (im neurobiologischen Kontext hat sie den Namen »Long Term Potentiation«, abgekürzt LTP.) Neurobiologen fanden heraus, dass die Stärke erregender Synapsen in der Hirnregion des Hippocampus – eine für Gedächtnisleistungen wichtige Region – dauerhaft zunimmt, wenn die durch sie verbundenen Neuronen gleichzeitig elektrische Impulse aussenden.

Muss man mehr wissen und sich für den ganzen Rest der molekularbiologischen Maschinerie im Gehirn überhaupt noch interessieren? Ein deutliches Ja kommt von mehreren Seiten: Erstens hat auch der Ansatz lernender neuronaler Netzwerke seine Grenzen, insbesondere bei komplexen integrativen Fähigkeiten, wie das »Wichtige« in einer Situation zu erkennen, zweitens erfüllen sehr viele Synapsen im Gehirn ihre Aufgabe der Übertragung elektrischer Signale nur äußerst unzuverlässig, was unter dem Gesichtspunkt, dass es gerade auf elektrische Signalübertragung ankommt, nur sehr schwer verständlich ist. Und drittens findet die neurobiologische Forschung Prozesse auf molekularer Ebene, die sich ohne große Mühe als Symbole für komplexe, mentale Zustände verstehen lassen. Die Beschreibung des Gehirns als elektrisches Netzwerk, die wir oben skizziert haben, ist nichts als die Wahrheit – aber sie ist eben nicht die ganze Wahrheit.

An einer Synapse werden nicht einfach elektrische Signale übertragen, es erfolgt eine Umkodierung der einlaufenden elektrischen Impulse in mehrere chemische Botenstoffe (Neurotransmitter, Neuropeptide), die beim Zielneuron nicht nur den übertragenelektrischen Impuls auslösen, sondern auch viele andere, komplizierte Ketten chemischer Signale. Dabei laufen die chemischen Botschaften deutlich langsamer als die elektrischen, greifen aber dafür zum Teil sehr nachhaltig in die zelluläre und biochemische Maschinerie ein. Spätestens als man Signalwege fand, über die die elektrische Aktivität an Synapsen das Ablesen des genetischen Codes und die Herstellung von neuen Zellbausteinen beeinflussen kann, wurde deutlich, dass eigentlich alle zellulären Prozesse in Neuronen auch als Teil der informationsverarbeitenden Prozesse – der »Software« – betrachtet werden müssen. Eine Unterscheidung zwischen Software und Hardware macht dann aber kaum noch Sinn: Der Computer ist das Programm!

Obwohl diese Erkenntnisse zunächst das theoretische Verständnis wieder erschweren, zeichnen sich im Dschungel der chemischen Signalwege und ihrer Wechselwirkung mit elektrischen Aktivitäten bereits interessante Ordnungsprinzipien ab. Bedeutend ist dabei, dass viele dieser molekular-physiologischen Regulationsprozesse keine Besonderheiten von Nervenzellen sind. Ähnliche Vorgänge gibt es in fast jeder Zelle. Im Kontext von Neuronen gewinnen diese Vorgänge und Strukturen aber ganz besondere Bedeutungen, wie das folgende Beispiel zeigt: Für viele Zellen sind das »Stress-Hormon« Adrenalin und die chemisch verwandten Substanzen Noradrenalin und Dopamin wichtige Botenstoffe. In Neuronen werden sie auch zur elektrischen Übertragung an Synapsen verwendet. Für

Graduiertenkolleg 723: Raumzeitliche Signalprozesse in Neuronen und zelluläre Biophysik

(red.) Funktionale Abläufe in den Nervenzellen, vor allem Signalprozesse in Neuronen, aber auch die Organisationsprozesse von Membranen und Zellen sind Thema des seit 2001 an der Georg-August-Universität Göttingen bestehende Graduiertenkollegs 723 »Raumzeitliche Signalprozesse in Neuronen und zelluläre Biophysik«. Die Entschlüsselung des Genoms einiger Arten, den Menschen eingeschlossen, hat weitere Forschungsfelder eröffnet, denn die Funktionen beispielsweise der beteiligten Proteine ist vielfach unbekannt. Um die Physiologie und Pathophysiologie von Zellen und Geweben zu verstehen, werden deshalb die Wirkungsweise und die Interaktionen einzelner Moleküle und Proteine erforscht. Da dieses Zusammenwirken gemessen werden soll, führt die enge Verflechtung von Inhalten und Methoden Biologen, Physiker und Mediziner in dem Göttinger Graduiertenkolleg zusammen. In den Disserationsprojekten, die sich mit Themen aus dem Grenzgebiet zwischen Neurobiologie und Biophysik beschäftigen, werden dazu Methoden der zellulären Biophysik, vor allem moderne optische Verfahren eingesetzt. Insbesondere bei der Methodenentwicklung gibt es noch Defizite, die auszuräumen eines der Ziele des Göttinger Kollegs darstellt.

Das Graduiertenkolleg 723 ist eine gemeinsame Einrichtung der Fakultäten für Medizin, Biologie und Physik sowie der Max-Planck-Institute für biophysikalische Chemie und experimentelle Medizin. In dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Kolleg, arbeiten zurzeit zehn Doktoranden an ihrer Promotion. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit der Stipendiaten ist für die Kollegarbeit als Vorbereitung auf eine weitere berufliche Tätigkeit von großer Bedeutung, da Wissenschaft und Industrie einen erheblichen Bedarf an biophysikalisch trainierten Medizinern und Biologen als auch an medizinisch-biologisch gut ausgebildeten Biophysikern haben. Sprecher des Kollegs ist Prof. Dr. Dr. Detlev Schild.

ihre Synthese ist ein Enzym, die so genannte Tyrosinhydroxylase (TH), von besonderer Wichtigkeit. Dieses Enzym können alle Zellen, die die Botenstoffe verwenden, auch selbst herstellen. Die Aktivität von TH bestimmt die Geschwindigkeit, mit der die Botenstoffe entstehen. Dieses Enzym hat im Zusammenhang mit mentalen Leistungen eine besondere Symbolfunktion. Vereinfacht funktioniert es folgendermaßen: Vielfältige »Stressreize« aus der Umwelt, die über Sinnesorgane

empfangen und über das sympathische Nervensystem als elektrische Aktivität weitergeleitet werden, führen sowohl zu einer Aktivierung von TH als auch zu einer Vermehrung von TH durch Genexpression in Neuronen. Als Folge erhöht sich die Syntheserate der Botenstoffe, und es kommt zu einer verstärkten elektrischen Impulsaktivität der Neuronen, die durch das sympathische Nervensystem in viele Teile des Körpers übertragen wird. Es treten die für Stress typischen physiologischen



Reaktionen, beispielsweise erhöhte Pulsfrequenz und erhöhter Blutdruck, auf. Es gibt auch eine molekular-physiologische Wirkung im Gehirn selbst, die durch Umweltreize im so genannten Locus coreuleus die TH-Aktivität erhöht und dadurch viele andere Hirnregionen beeinflusst. Das Ergebnis ist erhöhte Aufmerksamkeit, die wiederum zu einer erhöhten Wirkung der Stressreize führen kann, und dies über lange Zeitskalen: Denn Wirkungen der Genexpression können Stunden oder Tage anhalten, nachdem der primäre, auslösende Reiz verschwunden ist. TH wird also zu einem Molekül, das als ein guter Repräsentant für einen komplexen mentalen Zustand (Angst, Stress) betrachtet werden kann. Es integriert viele verschiedene Sinnesreize und führt zu einem ganzen Spektrum von Reaktionen inner- und außerhalb des Gehirns.

Dieses Organisationsmuster findet sich an vielen Stellen des chemischen Regulationsnetzwerks. Die in zahlreichen physiologischen Regelkreisen auftretenden »Zweiten Botenstoffe« (Second Messengers) sind Prototypen solcher Punkte des molekular-physiologischen Netzwerks, an denen viele Regelungspfade zusammenlaufen und sich kreuzen. Was solche Moleküle in neuronalen Prozessen repräsentieren, ist nicht immer leicht zu entschlüsseln. Gegenwärtig werden Computersimulationen und Methoden der Graphentheorie benutzt, um die Ordnungs- und Regelungsprinzipien im molekular-physiologischen Netzwerk des Gehirns aufzudecken. Obwohl eine vergleichbar einfache und weit reichende Hypothese wie die Hebb'sche Regel in diesem Forschungsfeld noch nicht formuliert wurde, sind die Fortschritte in letzter Zeit doch beachtlich: Zum einen versuchen Wissenschaftler in großen, internationalen Forschungsverbänden alle Informationen über ein bestimmtes

Neuron in einem Computermodell zu integrieren, an das man dann gezielt Fragen stellen kann (brute-force-Methode), zum anderen wird daran gearbeitet, wichtige Teilprozesse zu identifizieren und quantitative Modelle dafür aufzustellen, die dann wiederum als Bausteine komplexerer Modelle dienen können. Unsere Arbeitsgruppen beteiligen sich an diesem bottom-up-Ansatz mit der Modellierung der Signalübertragung an Synapsen, der Selbstorganisation von Ionenkanälen in Zellmembranen und dem Einfluss kleinster räumlicher Strukturen (im Nanometerbereich) auf die elektrophysiologische Signalverarbeitung. Am Institut für Theoretische Physik der Universität Göttingen – wie an vielen anderen Orten – ist die Suche nach einer Synthese physiologischer Regelungsprinzipien mit den komplexen Informationsverarbeitungen im Gehirn gegenwärtig in vollem Gange.

■ We discuss the interplay of three different approaches to an understanding of higher cognitive functions and their relations to the brain: functionalism, connectionism and the neurobiological approach. After introducing them and explaining their essentials, we illustrate some successes of theoretical methods, which combine elements of several of these approaches. We analyse the foundations of learning to demonstrate that problems arising

Fazit

Die Antworten der neueren, naturwissenschaftlichen Forschung auf die am Anfang gestellten Fragen nach »Gehirn« und »Geist« sind sicher beeindruckend, aber noch längst nicht zufriedenstellend. Große Fortschritte konnten gemacht werden, wenn experimentell und theoretisch arbeitende Wissenschaftler ihre Ergebnisse wechselseitig zur Kenntnis nahmen und daraus neue Schlüsse zogen. Diese Balance zwischen Experiment und Theorie hat in den biologischen Wissenschaften noch keine so große Tradition wie in den anderen, klassischen Naturwissenschaften Chemie und Physik. Aber auch in der Biologie, insbesondere in der Neurobiologie, mehren sich die Stimmen derer, die eine »bessere« Theorie für eine unverzichtbare Grundlage weiteren wissenschaftlichen Fortschritts ihrer Disziplin halten. ◀

at the most abstract level (functionalism) can be successfully attacked using a hypothesis from a less abstract level (connectionism), which ultimately can be confirmed on the most detailed and realistic level (neurobiology). We also point out that each level brings new insights, but also new problems, which can only be solved in a synthesis. The state of the art of this synthesis of the three approaches is briefly pointed out. ■



Prof. Dr. Reiner Kree, Jahrgang 1954, studierte Physik an der Universität Dortmund und wurde 1984 an der Universität Karlsruhe promoviert. Anschließend war er an der Cornell University, Ithaca, N.Y. (USA) und an der Universität Düsseldorf tätig. Hier habilitierte er sich 1989. Im selben Jahr wurde er nach Göttingen an das Institut für Theoretische Physik berufen. Sein Arbeitsgebiet ist die Statistische Physik komplexer Systeme. Prof. Kree war von 1999 bis 2001 Dekan der Fakultät für Physik und ist seit 2002 Vizepräsident der Georg-August-Universität Göttingen.