

Die Chemie – eine zentrale Säule der menschlichen Kultur**

Sason Shaik*

Stichwörter:

Chemiedidaktik · Popularisierung der Chemie · Wissenschaftsgeschichte

Seit der Beschreibung des elenden Zustands der Chemikergemeinde als isoliert unter dem Großteil der Bevölkerung, der sich kaum für ihr Geschäft interessiert, durch Gabriel-François Venel 1753 in Diderots Enzyklopädie hat sich nur wenig verändert an der öffentlichen Wahrnehmung der Chemie und der Chemiker.^[1] Das öffentliche Bild der Chemie^[2] und ihr Status in den Medien als „the forgotten science“^[2a] sind uns allen schmerhaft bewusst. Trotzdem gibt es immer noch kaum Bemühungen, die Chemie zu popularisieren.^[3] Die Chemiker selbst stehen solchen Bemühungen zwiespältig bis verächtlich gegenüber, so als ob sie dem Verdikt, dass es wenig in ihrer Wissenschaft gäbe, das Laien begeistert, Recht geben

würden. Obwohl es schwierig sein mag, Laien für die Chemie zu begeistern, müssen wir sie populärer machen! Wir müssen neue Wege finden, die Geschichte des „chemischen Universums“ zu erzählen und die Position der Chemie als einer zentralen Säule der menschlichen Kultur herauszustellen.

Meiner eigenen Erfahrung nach, die ich in diesem Essay mit den Lesern teilen möchte, gelingt es, Chemie zu popularisieren, wenn man die folgende Botschaft vermittelt:

- Chemie ist das Fenster, das den Menschen geben ist, um einen Blick auf ihr stoffliches Wesen zu werfen.

**Chemie ist das Fenster,
das den Menschen ge-
geben ist, um einen
Blick auf ihr stoffliches
Wesen zu werfen.**

Für meine Studierenden der „zweiten Kultur“, die mir beigebracht haben, dass nicht Alles, was nützlich ist, notwendigerweise auch begeistert.

diesen Grundideen; er kann sowohl als Beispiel für eine Einführung für Erstsemester-Chemiestudenten als auch für einen populärwissenschaftlichen Vortrag dienen.

Liebe, Abhängigkeit, seelisches Gleichgewicht und mehr

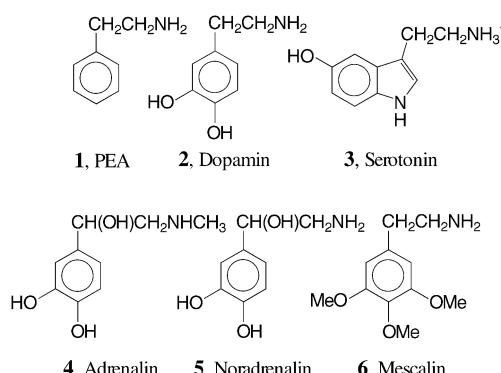
Pheromone sind Moleküle, die das „Liebesleben“ und alle weitere Kommunikation im Leben von Insekten steuern.^[4a] Auch bei höheren Organismen wie Säugetieren spielen sie eine Rolle^[4b] – Menschen scheinen dabei keine Ausnahme zu sein. Auch wenn die chemischen Details des Gefühlslebens noch unerforscht sind, spricht Vieles dafür, dass es durch genetisch determinierte Muster und spezifische Gehirnbotenstoffe reguliert wird. Beispielsweise ergab eine neuere Untersuchung,^[5] dass Individuen mit unterschiedlichen Ausprägungen (Allelen) des Gens, das für das Transportprotein des Neurotransmitters Serotonin kodiert, in der Amygdala, dem Bereich des Gehirns, der für die Steuerung der Emotionen zuständig ist, unterschiedliche Aktivitätsmuster aufweisen. Eine hyperaktive Amygdala führt zu einer permanenten Ängstlichkeit, auch in nicht bedrohlichen Situationen.^[5] Unsere Gehirne sind also chemisch verkabelt.^[6] Einige der Neurochemikalien sind Neurotransmitter, andere sind Neuromodulatoren, die die Aktivität der Neurotransmitter regulieren, wieder andere sind Hormone. Neurochemikalien agieren manchmal alleine, manchmal in Kombination mit Neuromodulatoren und anderen Neurotransmittern und manchmal durch Kaskaden, die zur Freisetzung

[*] Prof. S. Shaik
Department of Organic Chemistry and
The Lise Meitner–Minerva Center for
Computational Quantum Chemistry
Hebrew University
91904, Jerusalem (Israel)
Fax: (+972) 2-658-4680
E-mail: sason@yfaat.ch.huji.ac.il

[**] Dieser Essay basiert auf einem Seminar, das für Studierende der Geistes- und Sozialwissenschaften gegeben wurde, sowie auf einem öffentlichen Vortrag, der das erste Mal 1999 anlässlich des israelischen Jahres der Chemie gehalten wurde. Seitdem wurde er jedes Jahr für die Erstsemester-Chemiestudenten und vor Chemikern sowie anderen Wissenschaftlern gehalten. Der Vortrag ist ein Beispiel für eine erfolgreiche Popularisierung der Chemie, ein Vorschlag für eine Lehrstrategie und eine Philosophie.

von Sekundärbotenstoffen führen, die ein Signal auf den eigentlichen Auslöser übertragen.^[6]

Untersuchungen ergaben, dass die Gehirnchemikalie 2-Phenylethylamin (PEA (**1**), Schema 1)^[7,8] ein Neurotrans-



Schema 1. Moleküle der Emotionen.

mitter und Neuromodulator der Libido und der zwischenmenschlichen Energie ist;^[7a] die Verabreichung von PEA steigert emotionale Wärme, Zuneigung, Sexualität und das Gefühl von physischer Energie. Auch mit dem Hochgefühl von Langstreckenläufern wird es in Verbindung gebracht.^[9] Zwar wirkt PEA oft zusammen mit Neurotransmittern wie Dopamin (**2**) und Serotonin (**3**), aber seine Wirkung im emotionalen Bereich ist einzigartig.^[7] Für PEA wurde tatsächlich kürzlich ein spezifischer Rezeptor identifiziert,^[8] der vor allem in der Amygdala lokalisiert ist. Einzigartig sind auch die kurze Lebensdauer von PEA (Minuten) und sein Abbau durch eine spezifische Isoform des Enzyms MAO (Monoamin-Oxygenase), das Isoenzym MAO_B. Die kurze Lebensdauer deutet auf eine spezielle biodynamische Rolle von PEA hin, die mit sehr kurz wirkenden Effekten auf die Reiznerven verknüpft ist. Im Unterschied dazu haben andere Neuroamine (Serotonin (**3**), Noradrenalin (**5**) und Dopamin (**2**)) sehr lange Lebensdauern (Stunden) und werden durch das Isoenzym MAO_A abgebaut.

Die Einflüsse von PEA auf das menschliche Verhalten haben zu der Hypothese geführt (psychochemische Hypothese genannt), dass es eng verknüpft ist mit dem Sich-Verlieben.^[10] Obwohl dieser Zusammenhang sehr spekulativ ist, ist es interessant, sich mit der psychochemischen Hypothese

auseinander zu setzen, da sie zumindest einige wegweisende Aspekte bezüglich der Rolle von PEA bei der Regulierung von Affekten aufzeigen könnte. Walsh^[10a] beschreibt die Aktivität von PEA sehr anschaulich: Wenn wir jemanden treffen, der uns gefällt, „the whistle blows at the PEA factory“. Menschen beurteilen die Attraktivität eines Partners oder einer Partnerin in erster Linie anhand des optischen Eindrucks und nicht wie viele andere Säugetiere anhand eines Duftes oder einer Berührung. Ein romantisches Liebesgefühl kann durch den bloßen Blick ausgelöst werden. So beginnt auch die biblische Geschichte von David und Batseba: „Und es begab sich, dass David um den Abend aufstand von seinem

Lager und ging auf dem Dach des Königshauses und er sah ein Weib sich waschen, und das Weib war sehr schöner Gestalt.“ Die Synthese von PEA im Gehirn und seine Verteilung ins gesamte Nervensystem spielen eine Rolle beim Erzeugen der Erregung, die man beim Anblick eines geliebten Menschen verspürt, und der Sehnsucht nach dieser Person, wenn sie nicht da ist.^[10a,11] PEA findet sich auch in Schokolade, Nutra-sweet (mit dem Hauptbestandteil Aspartam) und Diätgetränken, und seine Konzentration erhöht sich beispielsweise beim Rauchen von Marihuana.^[10d] Doch alle diese PEA-Quellen liefern nicht den gleichen Kick wie das PEA im Gehirn, was zum Teil am schnellen Abbau durch das Enzym MAO_B liegt. Obwohl PEA die Blut-Hirn-Schranke passieren kann, wird es daher ohne die Zugabe von MAO_B-Blockern weitgehend vorher im Organismus abgebaut.^[7] Zwar mag es Liebeszaubertränke in Shakespeares *Sommernachtstraum* geben, aber in der Realität wacht unser chemisches System eifersüchtig über die Exklusivität der emotionalen Reaktionen.

Die psychochemische Hypothese^[10] ordnet auch anderen Neurotransmittern eine Bedeutung zu für unsere psychobiologische Energie. Zu diesen Neurotransmittern zählen die Endorphine, die im Hypothalamus, im Hirnstamm und in der Hypophyse produziert werden.^[12] Endorphine sind Neuropeptide (β-Endorphin, das am stärksten wirksame

Endorphin, enthält 31 Aminosäurereste), die als natürliche Schmerzmittel im Körper fungieren. Sie wirken auf spezifische Opiatrezeptoren,^[12] um eine Analgesie (Aufhebung des Schmerzempfindens) und ein Gefühl des Wohlbefindens zu erzeugen. Nach der psychochemischen Hypothese^[10d] sind sie jedoch auch entscheidend für das Aufrechterhalten langfristiger Beziehungen. Da der Körper nach der Phase des ersten Verliebtheins höhere PEA-Dosen benötigt, um den gleichen Kick wie am Anfang zu erzeugen, nimmt im Laufe der Zeit die Verliebtheit allmählich ab.^[10a–c] Wäre das alles, würde Liebe nur aus Romanzen bestehen. Glücklicherweise erzeugt das Gehirn, als versierter Chemiker, auch Endorphine, die uns für beständige Partnerschaften geeignet machen. Immer wenn wir unseren Partner sehen, verspritzt das Gehirn eine Dosis Endorphin, die unseren ganzen Körper durchströmt^[10d] und uns ein Gefühl der Sicherheit, der Ruhe und des Wohlbefindens vermittelt. Der starke, fast physische Schmerz, der mit dem Verlust einer geliebten Person einhergeht, könnte nach diesem Modell durch das plötzliche Stoppen des Endorphin-Mechanismus entstehen.

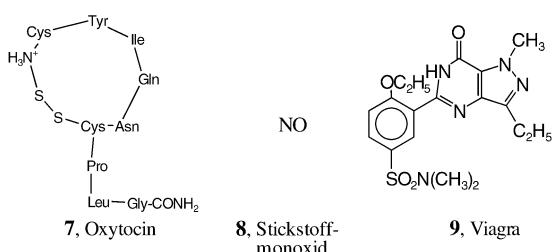
PEA ist nur eines der Neuroamine, die als Moleküle der Emotionen wirken. In Schema 1 sind weitere aufgeführt. Dopamin (**2**) beispielsweise wird im Gehirn im ventralen Tegmentum aus Tyrosin hergestellt und in der vorderen Hirnrinde freigesetzt. Dieses Molekül spielt eine Rolle bei belohnungsabhängigen Verhaltensweisen, der Lernfähigkeit, der Drogenabhängigkeit, der Entwicklung von Abhängigkeiten inklusive der Konditionierung und bewusster Kontrollprozesse.^[6c] Nach der psychochemischen Hypothese^[10] reguliert Dopamin das Verlangen nach Wohlbefinden und den Umgang mit Gefahr und wirkt motivierend auf Durchsetzungsfähigkeit und Bestreben. Zu wenig Dopamin führt zu einer eingeschränkten Lebensfreude und einem geringen Sinn für Abenteuer und Erfahrungen,^[10,13] während zu hohe Mengen oder eine verstärkte Aufnahme von Dopamin durch die Nervenzellen ein Suchtverhalten hervorrufen können. Heute geht man davon aus, dass Suchtverhalten mit einer langfristigen Veränderung in den Synapsen zwischen den Neuronen ein-

hergeht, ähnlich wie bei der Erinnerungs- und Lernfähigkeit.^[6c]

Serotonin (**3**) bildet sich aus Tryptophan in den Raphe nuclei tief im Hirnstamm^[5] und wird von da zu den Nervenendigungen transportiert. Es ist das „Stimmungsmolekül“,^[10d] verantwortlich für das seelische Gleichgewicht, und ein inneres Antidepressivum. Probleme im Serotonin-Zyklus werden mit Leiden wie chronischen Schmerzen, Depressionen, dem Alzheimer-Syndrom, Schlaganfällen und dem Parkinson-Syndrom in Verbindung gebracht. Ein Serotonin-Mangel kann unter anderem Aggressionen (auch sexuelle), Depressionen, Schizophrenie sowie das Verlangen nach Kohlenhydraten und Süßigkeiten hervorrufen. Ein normaler Serotonin-Spiegel bewirkt eine ausgeglichene Persönlichkeit, während ein zu hoher Spiegel mit Ängstlichkeit assoziiert wird. Serotonin ist in Bananen, Tomaten und Nudeln enthalten. Aber auch hier führt die Aufnahme des Neuroamins über Lebensmittel nicht zu einer Erhöhung seines Spiegels im Gehirn, denn Serotonin wird wie PEA enzymatisch rasch abgebaut (durch MOA_A).

Die in Schema 1 ebenfalls gezeigten Verbindungen Adrenalin (**4**) und Noradrenalin (**5**), auch bekannt als Epinephrin bzw. Norepinephrin, sind Stresshormone, die den Körper für eine anstrengende Aktivität vorbereiten. Adrenalin wird vom Nebennierenmark freigesetzt und steigert den Glucose-Spiegel im Blut, um so die für anstrengende Aufgaben und die Konfrontation mit Gefahr benötigte Energie bereitzustellen. Noradrenalin ist ein Neurotransmitter, der in Stresssituationen zusammen mit Adrenalin aktiviert wird. In Verbindung mit PEA und Dopamin wird ihm jedoch auch Bedeutung für das Aufrechterhalten der Lebenslust zugesprochen. Die Verbindung **6** in Schema 1 ist das halluzinogene Rauschmittel Mescalin. Die Ähnlichkeit mit den körpereigenen „Drogen“ ist offensichtlich. Mit diesem Wissen stellen sich neue Fragen zur „Realität“ von Emotionen – unabhängig von ihren einzigartigen chemischen Motoren.

Nun komme ich zu einem Neuropeptid, das in der psychochemischen Hypothese eine Rolle spielt:^[10,14] Oxytocin (**7**, Schema 2), ein in der Hypophyse erzeugtes Nonapeptid. Es war



Schema 2. Moleküle der Freude und des Wohlbefindens.

eines der ersten natürlichen Peptide, das im Labor synthetisiert wurde und anhand dessen die chemischen Ursprünge des psychobiologischen Energieflusses belegt wurden. Im Menschen löst Oxytocin am Ende der Schwangerschaft die Kontraktionen des Uterus und damit die Wehen aus, außerdem stimuliert es den Milchfluss beim Stillen. An Laborieren konnte gezeigt werden, dass Oxytocin das Sexualverhalten und die Paarbindung fördert. Daraus wurde die Hypothese abgeleitet,^[10,14] dass Oxytocin eines der für die Treue verantwortlichen Moleküle ist^[14] und hinter dem menschlichen Verlangen nach Berührung, Zärtlichkeit und Sicherheit steht. Einfaches Streicheln des Nackens genügt, um die durch Oxytocin ausgelöste angenehme Empfindung zu haben. Das Gefühl wird stärker, wenn der Partner das Streicheln übernimmt, schließlich handelt es sich um einen evolutionären chemischen Mechanismus des Suchens und wachsenden Verlangens nach dem Gefühl des Zusammengehörens. Bei Frauen spielt Oxytocin weitere wichtige Rollen: Sein Anstieg beim Stillen führt zu einem Gefühl des Wohlbefindens und der Entspannung, was wiederum die Mutter-Kind-Bindung verstärkt; sein Anstieg beim Sex führt zum Orgasmus der Frau. Oxytocin regelt also die „chemische Hingabe“ und das daraus folgende Wohlgefühl.

Der Orgasmus des Mannes zielt auf die Ejakulation, die chemisch durch Spinalnerven gesteuert und kontrolliert wird,^[15] die in den Segmenten L3 und L4 der Lendenwirbelsäule lokalisiert sind (lumbar spinothalamic (LSt) neurons). Diese Neuronen sind Teil des Tractus spinothalamicus, der Nervenbahn, über die sensorische Informationen vom Körper zur Thalamus-Region des Gehirns weitergeleitet werden, die wiederum die Ejakulation auf chemischem Weg auslöst. Die Ejakulation setzt eine Erektion

voraus, die ebenfalls chemisch gesteuert wird, und zwar durch das in Schema 2 gezeigte natürliche Viagra – Stickstoffmonoxid (**8**). Stickstoffmonoxid ist ein wichtiger Neurotransmitter mit gefäßweiternder Wirkung.^[16] Es ist so essenziell, dass es ein Enzym gibt (Stickstoffmonoxid-Syn-

thase, NOS), dessen einzige Aufgabe es ist, durch den Abbau von L-Arginin in den Endothelzellen NO zu erzeugen.^[16] Die Diffusion des NO zu den glatten Muskelzellen in den Wänden der Penisarterien des erigierbaren Gewebes (und seine Bindung an das Häm der Guanylat-Cyclase) löst eine Kaskade von chemischen Reaktionen aus, an deren Ende die Muskelzellen an Ca²⁺-Ionen verarmt sind, was dazu führt, dass die Muskeln relaxieren, Blut in den Penis strömen kann und die Erektion einsetzt.

NO ist auch für den Mechanismus des Langzeitgedächtnisses im Hippocampus entscheidend (Langzeitverstärkung, LTP).^[6,17] Während des Erinnerns fungiert NO als Neuromodulator, der dem NMDA-Rezeptor (NMDA = N-Methyl-D-aspartat) für L-Glutamat hilft, die Ca²⁺-Konzentration in den Zellen zu steigern. Dies führt zu sich wiederholenden Mustern der neuronalen Entladungen der Zelle – dem Kernelement der LTP. Bei der Erkenntnis, dass die Erektion und das Gedächtnis umgekehrte Ca²⁺-Flüsse erfordern (raus bzw. rein), kann man sich ein Schmunzeln nur schlecht verkneifen.

In Schema 2 ist auch der künstliche Wirkstoff Sildenafil, besser bekannt unter dem Handelsnamen Viagra, dargestellt (**9**). Die Synthese ist so einfach, dass vermutlich bereits Studierende vor dem Vordiplom die Verbindung herstellen könnten. Viagra greift in den Mechanismus der oben beschriebenen NO-induzierten Ca²⁺-Depletion ein. Die Aufregung um Viagra hat kaum nachgelassen und schon wird das Wissen um den auf NO basierenden Mechanismus der Erektion eifrig genutzt, um Wirkstoffe herzustellen, die noch besser als Viagra sind.^[18] Das Liebeselixier ist also vielleicht gar nicht außer Reichweite.

Die Entdeckung der chemischen Neurotransmission Ende der 1950er

Jahre hatte einen Paradigmenwechsel vom „elektrischen“ zum „chemischen Gehirn“ zur Folge.^[6c,d] So sind die Neurotransmitter Träger des Informationsflusses zwischen den Nervenzellen, durch sie werden Befehle des Gehirns an den Körper und Informationen vom Körper sowie von externen Stimuli an das Gehirn übermittelt. Ungefähr 100 Milliarden Nervenzellen sind zu jedem beliebigen Zeitpunkt an dieser Kommunikation beteiligt, für die es zwei prototypische Mechanismen – schnelles Ionen-„Feuern“ und langsame biochemische Kaskaden – sowie Kombinationen der beiden Mechanismen gibt.^[6b] In diesem eher populärwissenschaftlichen Beitrag kann das außerordentlich vielfältige und sich sehr schnell entwickelnde Thema der Zell-Zell-Kommunikation nicht vertieft werden.^[6,19] Am einfachsten dürfte es sein, die durch Neurotransmitter geschaltete Zell-Zell-Kommunikation, die durch elektrische Impulse vermittelt wird („Feuern“), – wenn auch nur oberflächlich – zu beschreiben.

Im Ruhezustand sind die Nervenzellen durch einen als Synapse bezeichneten Spalt getrennt.^[19] Die synaptische Spalte ist so zu sagen die Aus-Stellung, während der Neurotransmitter, indem er die Spalte überbrückt und die Übertragung des Signals in die Zelle ermöglicht, für die An-Stellung sorgt. Die Neurotransmitter werden in den synaptischen Vesikeln an den Nervenendigungen der präsynaptischen Zelle gespeichert. Erreicht ein elektrisches Signal (z.B. ein Fluss von Ca^{2+} -Ionen) die Zelle, verschmelzen die Vesikel mit der präsynaptischen Bahn, die Neurotransmitter werden freigesetzt und gelangen durch den Spalt zu den Rezeptoren der nächsten, der postsynaptischen Zelle. Die Rezeptoren sind Ionenkanäle aus einigen Proteinen, z.B. besteht der NMDA-Rezeptor aus fünf Proteinen,^[17] während die Rezeptoren der in Schema 1 dargestellten Neuroamine zu einer speziellen Familie der G-Protein-gekoppelten Rezeptoren (GPCRs) gehören, die sieben Helices enthalten.^[20] Heftet sich ein Neurotransmitter an einen Rezeptor, erfolgt eine Konformationsänderung, die zur Öffnung des Ionenkanals führt. Durch den geöffneten Kanal strömen Ionen mit der Folge, dass andere Neurotransmitter den nächsten

synaptischen Spalt überqueren und eine andere Zelle feuert, was gegebenenfalls auch intrazelluläre biochemische Reaktionswege aktivieren kann, z.B. bei der LTP, bei der persistente Veränderungen in der postsynaptischen Zelle induziert werden.

Haben die Neurotransmitter-Moleküle ihre Aufgabe erledigt, müssen sie zu den Nervenendigungen zurückkehren, aus denen sie freigesetzt worden waren, sonst erzeugen sie – durch die Inhibition der Superoxid-Dismutase – Radikale, die die Zelle chemisch zerstören. Bei den Neuroaminen bauen die MAO-Enzyme die Neurotransmitter, die sich nicht an einem Rezeptor oder in einem Vesikel der Ausgangszelle befinden, ab (Neurotransmitter werden im Gehirn durch spezifische biochemische Reaktionen wieder aufgebaut). Im Zusammenhang mit der Rückkehr von Serotonin zu den präsynaptischen Zellen wurde die bereits erwähnte Entdeckung gemacht,^[5] dass für die Transportproteine, die Serotonin über den synaptischen Spalt zurückbefördern, ein Gen codiert, das in zwei Allelen auftritt, und dass eines dieser Allele nur halb so viele Transportproteine produziert wie das andere. Die daraus folgende häufigere Neurotransmission durch die Serotonin-Moleküle im ersten Fall zeigt sich im Gehirn als eine hyperaktive Amygdala und wird mit permanenter Ängstlichkeit und Furcht in Verbindung gebracht. Hier besteht eine sehr auffällige Beziehung zwischen den Isoformen eines Gens, der Effizienz des Transports einer einzelnen Gehirnchemikalie und unterschiedlichen menschlichen Reaktionen auf emotionale Reize.

Das Verständnis der chemischen Grundlage der Neurotransmission ermöglichte die Synthese von Wirkstoffen, die gezielt Neurotransmitter ansteuern. Ein Beispiel ist Prozac, ein Antidepressivum, das auf Serotonin zielt, indem es die präsynaptische Zelle gegen die Rückkehr von Serotonin blockiert, sodass die geringe noch vorhandene Menge an Serotonin wieder zu den Rezeptoren gelangt und eine Entladung induziert. Redux (ein Mittel gegen Fettleibigkeit, das wegen seiner unerwünschten Nebenwirkungen vor kurzem vom Markt genommen wurde) zielt dagegen auf die Vesikel der präsynaptischen Zelle und führt zu einem erhöhten

Serotonin-Transport. L-DOPA kann die Blut-Hirn-Schranke passieren und in Dopamin umgewandelt werden; es wird in der Therapie von Parkinson-Patienten mit Dopamin-Mangel eingesetzt. Untersuchungen von Chemikern haben gezeigt, dass beispielsweise Acetylcholin und Serotonin mit ihren positiven Enden an den Rezeptor binden, indem sie eine Art π -Komplex mit den aromatischen Ringen der Aminosäuren Tryptophan und Tyrosin bilden.^[21] Die Wechselwirkung zwischen dem Neurotransmitter und dem Ionenkanal des Rezeptors ist also chemisch sehr spezifisch. Es könnte daher sein, dass diese Wechselwirkungen – und infolgedessen die „emotionalen“ Funktionen – der Neurotransmitter ähnlich kodiert werden wie die DNA- oder die Proteinsynthese, nur dass es sich nicht um H-Brücken-Wechselwirkungen handelt.

Die allgemeine Gültigkeit des Mechanismus der Neurotransmission in der Natur und die Entdeckung der Trinität Gen – Neurotransmission und Gehirnmuster – Charakterzüge,^[5] die anhand der Beispiele beschrieben wurden, belegen, dass trotz der hohen Biokomplexität die Basis der wunderbarsten menschlichen Eigenschaften sehr einfach ist. Der Informationsfluss zwischen den unbewussten (Körper) und den bewussten Domänen (Gehirn) des Biosystems wird durch molekulare Schalter über schwache Wechselwirkungen und Konformationsänderungen gesteuert. Sogar das Lernverhalten und Verhaltensänderungen in einem individuellen Leben beruhen auf chemischen Reaktionen.^[6a,c] Kurz gesagt, das gesamte emotionale, sensorische und intellektuelle System,^[19,22] das wir als Mensch bezeichnen, hat eine molekulare Basis. Das Folgende fasst die zentrale Position der Chemie für die Menschheit nochmals zusammen:

- Der Mensch besteht aus chemischen Stoffen, denselben Stoffen, aus denen auch die gesamte andere chemische Materie besteht. Menschen sind also tatsächlich „das Salz der Erde“.
- Die Menschheit hat die Geheimnisse der Manipulation und der Formung von chemischen Stoffen gelernt (und ist immer noch dabei, es zu tun). Diese Gnossia ist die Chemie.
- Die Chemie ist infolgedessen das Fenster, das die Menschheit nutzen

kann, um ihr eigenes stoffliches Sein zu untersuchen und auch dessen Grenzen zu bewältigen.

- Es ist das Schicksal und Bestreben der Menschheit, dieses Fenster zu vergrößern.

Die Philosophie neigt dazu, die Selbsterkenntnis und die freie Wahlmöglichkeit als die Eigenschaften des Menschen zu charakterisieren, die ihn vom Rest der tierischen Welt unterscheiden. Ich habe gelesen, dass Ratten von sich selbst und ihrem Aufenthaltsort träumen (während sie in ihren Labyrinthen herumrennen).^[23] In diesem Sinne haben Ratten sicherlich auch eine Art Selbsterkenntnis und Bewusstsein. Tatsächlich ist die Chemie der Gefühle, des Gedächtnisses und des Lernens allgemeingültig, genau wie der genetische Code und die Proteinsynthese, sodass der große Unterschied zwischen Menschen und Tieren nicht eine Form der Selbsterkenntnis und freien Wahlmöglichkeit ist. Es ist eher der unbewusste Prozess der Selbstprüfung, den die Menschheit auf ihrer langen Reise durch die chemische Materie durchlaufen hat und den wir Chemie nennen. Auch wenn die Details der oben erzählten Geschichte vereinfacht sein mögen und neue Erkenntnisse einige der Details ersetzen werden, bleiben die Grunderkenntnisse erhalten.

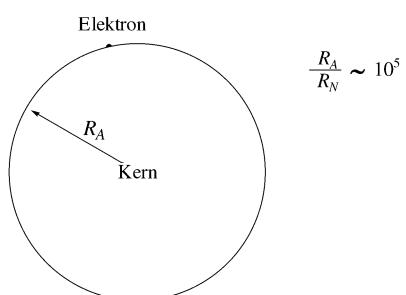
Chemische Stoffe

Da Menschen aus chemischen Stoffen bestehen, ist es sinnvoll, einige der Grundzüge dieser Stoffe zu kennen, die eventuell auch die menschliche Identität betreffen.

Die zentralen Paradigmen der Chemie lauten:

- Es existieren Atome, die chemische Bindungen eingehen können.
- Die Bindungen sind im Raum gerichtet und bestimmen den Molekülbau, die Reaktivität und die Interaktionspotentiale der Moleküle.
- Diese Dinge bestimmen alle Eigenschaften der belebten und der unbelebten Materie.

Das Atom ist neutral und besteht aus Elektronen und Protonen, die geladene Teilchen sind, sowie aus den neutralen Neutronen. Die Masse des Elektrons beträgt etwa 1/2000 der Mas-



Schema 3. Das Größenverhältnis von Atomkern und Atom – fast die gesamte Masse befindet sich auf winzigstem Raum, während die Elektronen über „dem Rand der Tiefe schweben“.

se des Protons oder Neutrons. In Schema 3 sind die Größenverhältnisse in einem durchschnittlichen Atom in einer Kugelschnittdarstellung gezeigt (die Kugel soll den Raum beschreiben, in dem das Elektron mit einer Wahrscheinlichkeit von 99 % angetroffen wird). Im Zentrum befindet sich der Atomkern, der die schweren Teilchen enthält. Der Radius R des Atoms beträgt ungefähr 1 Å, es ist also sehr klein, aber der Radius des Kerns ist noch um einen Faktor 10^5 kleiner. Stellt man sich das Atom als Fußballfeld vor, wäre der Kern nicht etwa der Fußball, sondern eher ein Staubteilchen, das sich unter dem Schuh eines Spielers in der Mitte des Feldes befindet. Chemische Stoffe sind also leer und wir, die wir ja aus ihnen bestehen, sind geformte Hohlräume.

Es stellt sich die Frage, warum der Hohlraum nicht kollabiert. Die Architektur des Hohlraums wird durch das winzige Teilchen/Nichtteilchen-Gebilde namens Elektron geformt. Im Allgemeinen befolgen die chemischen Stoffe und ihre zahlreichen Arten der Wechselwirkung die Regeln der Elektronen. In diesem Sinne sind chemische Stoffe einzigartig, weil das Elektron bereits ein Elementarteilchen ist und infolgedessen chemische Muster nicht weiter reduziert oder von „unten nach oben“ (d.h. aus noch elementarer Komponenten) rekonstruiert werden können. Das Verhalten des Elektrons wird von einigen wenigen „Gesetzen“ bestimmt. Die Heisenbergsche Unschärferelation verbietet es, den Ort und die Energie (Geschwindigkeit, Impuls) eines Teilchens gleichzeitig genau zu bestimmen. Deshalb ist das Elektron im Raum

delokalisiert und schwebt über dem Kern. Kurz gesagt, die Unschärferelation misst das Ausmaß der Leere im Atom.

Akzeptiert man, dass Atome nicht kollabieren, bleibt aber immer noch die Frage, warum sie sich nicht alle zu einem einzigen Riesenmolekül vereinigen, so dass wir alle Teil eines stofflichen Kontinuums wären (eines stofflichen Nirwanas). Hier kommt das Pauli-Prinzip ins Spiel, das, wenn man es auf Elektronen anwendet, den Atomen eine spezifische Bindungsfähigkeit vorschreibt, die so genannte Valenz, die schon im 19. Jahrhundert entdeckt wurde. Das Pauli-Prinzip erklärt also die Trennung der Materie in einzelne Moleküle und zugleich ist es für die molekulare Diversität der chemischen Stoffe verantwortlich.

Das Ergebnis dieser beiden Regeln ist, dass die Chemie ein Lego-Spiel mit Atomen und Fragmenten mit spezifischen Bindungsfähigkeiten ist. Die Art, wie zwei Fragmente verknüpft werden, bestimmt den Bau eines Moleküls, seine elektrischen und magnetischen Eigenschaften sowie seine Wechselwirkungen mit anderen Molekülen oder Licht, die zu neuen Informationen und emergenten Eigenschaften führen. Kurz gesagt ist das die chemische Kausalität. Das Opus magnum der chemischen Stoffe und ihre emergenten Eigenschaften sind Ausdruck des Molekülbaus und der Atombewegungen.

Molekülbau

In Abbildung 1 ist am Beispiel von Graphit und Diamant die transzentrale Funktion des Molekülbaus gezeigt. Beide Substanzen bestehen aus Kohlenstoffatomen. Der Aufbau aber ist unterschiedlich, abhängig von der Zahl der Freiheitsgrade der vierbindigen Kohlenstoffatome. Diamant ist hart und durchsichtig, während Graphit brüchig und undurchsichtig ist. Der unterschiedliche Molekülbau bestimmt das unterschiedliche Ergebnis der Wechselwirkung beider Verbindungen mit Licht. Doch weit darüber hinaus gehend ist Diamant „schön“ und teuer und Graphit „hässlich“ und billig. Es gibt Menschen, die für Diamanten morden und Raubüberfälle wagen, andere bewun-

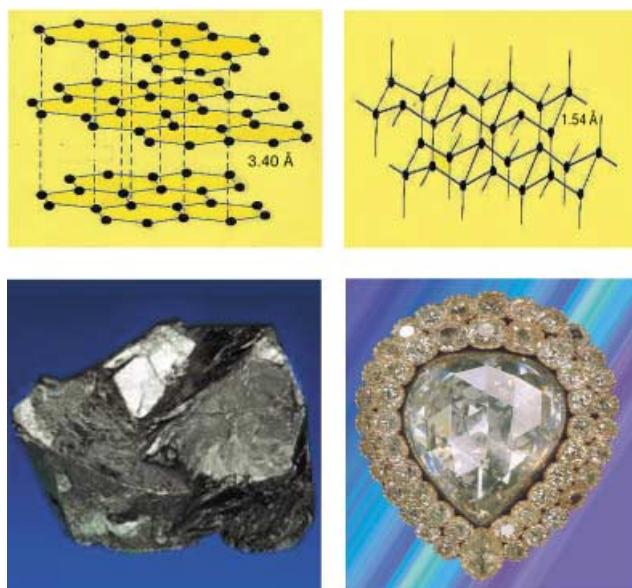
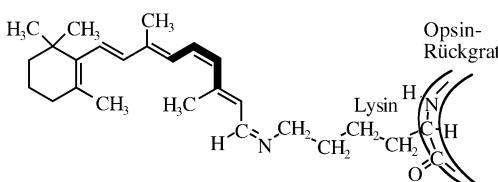


Abbildung 1. Die Bauweise eines Moleküls kann Einfluss auf soziale Werte und Dichtung haben. Oben sind die Strukturen von Graphit (links) und Diamant (rechts) gezeigt. Unten sieht man zugehörige Materialmuster: ein Stück Graphit (links) und den berühmten Topkapi-Diamanten (rechts).

dern einfach nur ihre Schönheit. Niemand jedoch würde einen einzigen dieser Gedanken an Graphit verschwenden. Die Unterschiede des Aufbaus dringen somit in soziale und moralische Werte und in die Dichtung ein. Dies zeigt, wie im Aufbau eines Stoffes gespeicherte Informationen durch Licht-vermittelte molekulare Prozesse des Biosystems eine emotional-mentale Reaktion hervorrufen. Damit handelt es sich hier um eine emergente Eigenschaft des Molekülaus, die auf den Informationen, die durch Wechselwirkung mit Licht entstehen, und auf der spezifischen, durch die chemischen Mechanismen von Neurotransmittern und Neuromodulatoren vermittelten Reaktion beruht.

„Es werde Licht“

Unsere innere visuelle Welt ist geprägt von den Wechselwirkungen eines Moleküls mit Licht und von seiner Fähigkeit, in zwei verschiedenen definierten Zuständen zu existieren. Unser Sehpigment ist der Rhodopsin-Rezeptor, ein G-Protein-gekoppelter Rezeptor^[20,24] mit dem Chromophor Retinal. Das in Schema 4 dargestellte Retinalmolekül hat eine Doppelbindung mit *cis*-Konfiguration, wegen der das Mole-



Schema 4. Konfiguration des Licht-empfindlichen Chromophors von Rhodopsin in der Ruhephase (*cis*-Doppelbindung fett gedruckt).

kül leicht gekrümmt ist. Bei Lichtaufnahme isomerisiert das Molekül in die *trans*-Konfiguration und nimmt dabei die Form einer gestreckten Kette an. Diese Veränderung modifiziert die Struktur der Membran und aktiviert ein G-Protein.^[20] Das wiederum führt zu einer Verstärkung des ursprünglichen Signals, das als neuronales Signal übertragen und zur Erzeugung eines Bildes genutzt wird.^[24] Anschließend findet eine weitere, noch zu erläuternde Neurotransmission statt, die eine emotionale Reaktion wie „Diamanten sind schön“ hervorruft. Unser Erkennen von Form und der angeborene Sinn für Schönheit sind also das Ergebnis der Wechselwirkung von Materie mit Licht und der Bewegung der Atome als Materiebausteine. Das erinnert sehr an das Aktivieren des emotional-sensorischen Systems durch die chemischen Mechanismen der Neurotransmitter und Neuromodulatoren.

Die Chemie und ihre emergenten Ausdrucksformen

Wieder und wieder erfahren wir dieselbe Binsenweisheit, dass die Basis der menschlichen Eigenschaften chemische Vermittlung ist. Auf Moleküle, schwache molekulare Wechselwirkungen und Konformationsenergien sprechen wir an. Diesen Algorithmus finden wir überall, von der Art, wie Stoffe andere Stoffe an ihrer Chiralität^[25] oder anhand des Schlüssel-Schloss-Prinzips erkennen, bis zum genetischen Code und der Proteinsynthese, die beide auf H-Brücken-bildenden Templayen basieren. Die Chemie stellt eine unendliche Zahl an Wegen zur Verfügung, auf denen mit einigen grundlegenden Mechanismen und vielen Kombinationsmöglichkeiten eine große Vielfalt an emergenten Eigenschaften entstehen kann. Diese chemische Maschinerie, ihre genetischen Ursprünge und ihre emergenten emotional-sensorischen Ausdrucksformen^[5] bilden eine sich allmählich entfaltende „psychophysikalische Verbindung“ (Körper = Chemie, Geist = Denken, Gefühle, Motivation).^[6c,f,19,26,27]

Vergangenheit und Zukunft

In der Frühzeit der Chemie war die Alchemie.^[29] Der mythische Begründer der Alchemie war der in Abbildung 2 dargestellte Hermes Trismegistus.^[28a] Diese legendäre Gestalt gab der Menschheit „das hermetische Wissen der göttlichen Kunst“. Der Begriff hermetisches Wissen hat den Beigeschmack von Mystizismus und Magie, die von modernen Chemikern strikt abgelehnt werden. Trotzdem sollten wir anerkennen, dass die Alchemisten genau das versuchten zu tun, was moderne Chemiker heutzutage machen. Sie untersuchten die Stoffe, um eine Sicht auf die Welt zu formulieren – als philosophisches System oder als Erkenntnis. In ihrem System waren der Geist und die Materie untrennbar miteinander verbunden.^[28b] Wie in Abbildung 2 rechts dargestellt hatte jede stoffliche Einheit eine spirituelle Erscheinungsform und umgekehrt.

Die Alchemisten beschäftigten sich auch mit der Manipulation der Stoffe



Hermes Trismegistus



Abbildung 2. Der erste Alchemist (links) und eine Darstellung der Vereinigung von Materie, Geist und Seele des Alchemisten Abraham Eleazar aus *Uraltes Chymisches Werck*. (Aus Lit. [28a] bzw. [28b].)

und hinterließen uns Werkzeuge, die nach wie vor im Einsatz sind.^[28b] Maria Judaica wird als die erste Alchemistin der westlichen Welt beschrieben. Die von ihr erfundenen Geräte zum vorsichtigen Erwärmen und Trennen von Stoffen nutzen Chemiker noch immer, und es gebührt ihr die Anerkennung, sich als Erste so dem Verhalten von Stoffen gewidmet zu haben, wie Chemiker es heute noch tun. Das Sammeln von Wissen über die Chemie hat uns, wenn auch langsam, gelehrt, dass hinter dem breiten Spektrum der menschlichen Eigenschaften chemische Mechanismen der molekularen Bewegung und der Wechselwirkung zwischen Molekülen und von Molekülen mit umgebenden Energiefeldern liegen. Wir sind einen weiten Weg gegangen, um die Kluft zwischen der alten und der neuen Welt der Chemie zu schließen. Die Chemie ist das intellektuelle Abenteuer des Menschen auf seiner Exkursion durch sein eigenes stoffliches Sein. So wie sich diese Reise entfaltet, so entdeckt der Mensch den gordischen Knoten zwischen der Materie und ihren spirituellen Ausdrucksformen.^[27]

Schlussbemerkungen

Die Chemie ist ganz offensichtlich die Manifestation der persönlichen und universellen Erkenntnis des Menschen über sein eigenes stoffliches Sein, sie ist auch die intellektuelle Ehestifterin zwischen dem stofflichen Sein und der Herrschaft des Menschen über die Materie. Einerseits sind wir durch unsere

Kenntnisse über Chemie Materie mit Selbsterkenntnis und Gnosis, die eine immense Bedeutung für den Fortschritt und das Wohlergehen der Menschheit haben. Andererseits erinnert uns das Ausüben der Kontrolle über die Materie ständig an die Warnung (von Kain) aus Genesis 4:7 an die Menschheit: „So ruht die Sünde vor der Tür, und nach dir hat sie Verlangen; du aber herrsche über sie.“ Die Chemie definiert die Grenzen der Macht über die Materie und veranschaulicht diese Grenzen durch Umweltverschmutzung,

chemische Waffen etc. Die Beherrschung der Materie bedeutet auch, den richtigen Weg des Umgangs mit ihr zu finden. An diesem Punkt sind wir noch lange nicht, und die Chemie hat das biblische Diktum noch nicht erfüllt.

Chemiker haben die Pflicht, die Chemie näher an die Öffentlichkeit zu bringen, und das insbesondere in dieser Zeit, in der einige der großen Probleme der Welt in Zusammenhang mit der Chemie stehen. Solange das Thema faszinierend ist, ist die Verbreitung von Wissen einfach, und das ist bei der Chemie sicherlich der Fall. Die Chemie ließe sich beschreiben als eine praktische Form der Selbstbeobachtung – eine unbewusste selbstbeobachtende Analyse, die auf dem langen Weg der Menschheit durch die Materie stattgefunden hat. Die Chemie macht die innere Erfahrung des Menschen von Veränderung und Verbesserung lebendig sowie das angeborene Wissen, dass Veränderungen durch Gegensätze mit großer Anziehung herbeigeführt werden. Alles in allem berührt die Chemie die Existenz und das Wohlergehen des Menschen sowie seine Verpflichtung, ein gütiger Herrscher über die Materie – seinen essenziellen Bestandteil – zu sein. Alle diese Aspekte machen die Chemie zu einer zentralen Säule der menschlichen Kultur.

Mein Dank gilt D. Avnir, R. Fisch, R. Hoffmann, E. Keinan, D. Milstein, A. D. Mosnaim, C. Nowerstein, D. Porte, R. Rachamimoff, Z. Rappoport, H. Schwarz, A. Stanger und H. Vancik für hilfreiche Diskussionen und Kommentare.

Z. Naor danke ich dafür, dass er mir sein eigenes Material zum Thema Chemie der Liebe zur Verfügung gestellt hat. H. Sabelli gab den Hinweis auf Lit. [7a]. Meine Tochter Yifat war bei der Gestaltung von Abbildung 1 behilflich und S. de Visser und D. Danovich bei den übrigen Illustrationen. Dass keiner der Genannten für den Inhalt dieses Essays verantwortlich gemacht werden darf, versteht sich von selbst.

- [1] Der französische Originaltext von Gabriel-François Venel lautet: „peux curieux de son commerce et n'attendant presque rien de son industrie“. Für eine Diskussion siehe: B. Bensaude-Vincent, *Bull. Hist. Chem.* **1999**, 23, 1.
- [2] Beispiele finden sich in a) R. M. Baum, *Chem. Eng. News* **1995**, 73(17), 49; b) R. M. Baum, *Chem. Eng. News* **2001**, 79(36), 5; c) M. Jacobs, *Chem. Eng. News* **2001**, 79(25), 5; M. Jacobs, *Chem. Eng. News* **1999**, 77(15), 5; d) W. Berry, *Life is a Miracle*, Counterpoint Press, Boulder, CO, **2000** (Chemie wird nur einmal erwähnt, und zwar auf S. 20 im Zusammenhang mit Umweltverschmutzung); e) siehe dagegen B. Werth, S. Vogel, *Das Milliarden-Dollar-Molekül*, VCH, Weinheim, **1996** (das Buch vermittelt allerdings die falsche Vorstellung, dass nur die Synthese Chemie sei und der Rest wie NMR-Analyse oder Modeling-Rechnungen nicht dazu gehören).
- [3] Für Beispiele siehe a) R. Hoffmann, P. Laszlo, *Angew. Chem.* **2001**, 113, 1065; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2001**, 40, 1033; b) R. Hoffmann, *The Same and Not the Same*, Columbia University Press, New York, **1995** (deutsche Ausgabe: R. Hoffmann, *Sein und Schein*, Wiley-VCH, **1997**); c) R. Hoffmann, S. Leibowitz Schmidt, *Old Wine, New Flasks*, Freeman, New York, **1997**; d) R. Hoffmann, V. Torrence, *Chemistry Imagined*, Smithsonian, Washington, **1993**; e) H. Vancik, *Found. Chem.* **1999**, 1, 241; f) H. Vancik, *Found. Chem.*, im Druck; g) A. L. Buchachneko, *Herald Russ. Acad. Sci. (Transl. of Vestn. Ross. Akad. Nauk.)* **2001**, 71, 311.
- [4] Siehe beispielsweise A. Shani, *CHEMTECH* **1998**, 30; b) S. Jacob, M. K. McClintock, B. Zelano, C. Ober, *Nat. Genet.* **2002**, 30, 175. Auch bei der Partnerwahl durch Frauen scheint der Duft des Mannes eine Rolle zu spielen.
- [5] A. R. Hariri, V. S. Mattay, A. Tessitore, B. Kolachana, F. Fera, D. Goldman, M. F. Egan, D. R. Weinberger, *Science* **2002**, 297, 400.
- [6] a) Siehe die Beiträge von P. Greengard, E. R. Kandel, C. Holden sowie L. Hel-

- muth in *Science* **2001**, 294, 945–1228; b) P. Greengard, *Science* **2001**, 294, 1024. Die Nervenzellen-Kommunikation kann über schnelle oder langsame synaptische Transmissionen ablaufen. Beim schnellen Modus (1 ms) handelt es sich um den exzitatorischen Mechanismus der Neurotransmission. Im langsamen Modus (100 ms bis Minuten) werden sekundäre Transmitter generiert, die verschiedene biochemische Reaktionen auslösen. Beide Mechanismen stehen in Wechselwirkung miteinander. (Für Studien über den langsamen Modus wurde im Jahr 2000 der Medizin-Nobelpreis verliehen; siehe A. Carlsson, *ChemBioChem* **2001**, 2, 484–493.) c) Zu Suchtverhalten siehe: C. Holden, *Science* **2001**, 294, 980; L. Helmuth, *Science* **2001**, 294, 982–984; C. H. Rankin, *Science* **2002**, 296, 1624; B. Brembs, F. D. Lorenzetti, F. D. Reyes, D. A. Baxter, J. H. Byrne, *Science* **2002**, 296, 1706; d) A. Carlsson, *Science* **2001**, 294, 1021; e) zur Entwicklung der Signaltransduktionsforschung siehe die Beiträge von L. B. Ray, A. S. Kliewer et al., A. S. Cashmore et al., C. A. Parent und P. Devreotes sowie S. Artavanis-Tsakonas et al. in *Science* **1999**, 284, 755–776, und die Beiträge von L. B. Ray und N. R. Gough, D. V. Goeddel, H. Wajant et al., R. Iyengar et al., G. A. Koretzky et al., J. C. Cambier, D. P. McDonnel et al., R. T. Moon et al., L. Attisanno, J. L. Warna et al., L. E. Elden et al., E. E. Farmer, J. Sheen et al., T. R. Parsons et al., C. M. Horvath et al. sowie L. C. Cantley et al. im Signal Transduction Knowledge Environment (STKE) von *Science* (*Science* **2002**, 296, 1632–1657, und auf der Internetseite www.stke.org); f) siehe die Beiträge von P. Stern, S. Cohen-Corey, M. Sheng et al., J. Rettig und E. Nehér, M. L. Dustin und D. R. Colman sowie D. J. Selkoe zu „Neuroscience: A Vibrant Connection“ in *Science* **2002**, 298, 769–791.
- [7] a) Eine sehr aktuelle Übersicht ist: H. Sabelli in *Natural Medications for Psychiatric Disorders Considering the Alternatives* (Hrsg.: D. Mischoulon, J. F. Rosenbaum), Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, **2002**, S. 83–110; b) H. C. Sabelli, J. I. Javaid, *J. Neuropsychiatry Clin. Neurosci.* **1995**, 7, 6; c) M. E. Wolf, A. D. Mosnaim, *Clin. Pharmacol.* **1983**, 14, 385.
- [8] B. Borowsky, N. Adham, K. J. Jones, R. Raddatz, R. Artymyshyn, K. L. Ogozalek, M. M. Durkin, P. P. Lkhlan, J. A. Bonini, S. Pathirana, N. Boyle, X. Pu, E. Kouranova, H. Lichtblau, F. Y. Ochoa, T. A. Branchek, C. Gerald, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2001**, 98, 8966.
- [9] A. Szabo, E. Billett, J. Turner, *Br. J. Sports Med.* **2001**, 35, 342.
- [10] a) A. Walsh, *The Science of Love*, Prometheus Books, Buffalo, NY, **1991**; b) M. Leibowitz, *The Chemistry of Love*, Berkeley Book, New York, **1983**; c) M. B. Krassner, *Chem. Eng. News* **1983**, 61(33), 22; d) T. L. Crenshaw, *The Alchemy of Love*, G. P. Putnam, New York, **1996**; e) H. E. Fisher, *Anatomy of Love*, Norton, New York, **1992**.
- [11] Eine Studie mit Medizinstudenten ergab, dass sich am Anfang einer romantischen Liebesaffäre das Serotonin-Transportprotein ähnlich verändert wie bei zwanghaften oder obsessiven Störungen. Siehe: D. Marazziti, H. S. Akiskal, A. Rossi, G. B. Cassano, *Psychol. Med.* **1999**, 29, 741.
- [12] C. B. Pert, *Molecules of Emotion*, Simon & Schuster, New York, **1997**.
- [13] a) J. M. Nash, *TIME*, 26. Mai 1997, S. 43; b) T. Greenfeld, *TIME*, 6. September 1999, S. 55.
- [14] a) C. S. Carter, *Psychoneuroendocrinology* **1998**, 23, 779; b) L. J. Young, M. M. Lim, B. Gingrich, T. R. Insel, *Horm. Behav.* **2001**, 40, 133.
- [15] W. A. Truitt, L. M. Coolen, *Science* **2002**, 297, 1566.
- [16] Siehe den Nobel-Vortrag R. F. Furchtgott, *Angew. Chem.* **1999**, 111, 1990; *Angew. Chem. Int. Ed.* **1999**, 38, 1870.
- [17] a) L. R. Squire, E. R. Kandel, *Memory: From Mind to Molecules*, Scientific American Library, New York, **1999**; b) M. D. Lemonick, *TIME*, 13. September 1999, S. 52; c) Y. Kovalchuk, E. Hanse, K. W. Kafitz, A. Konnerth, *Science* **2002**, 295, 1729.
- [18] K. E. Wilson, *Chem. Eng. News* **1998**, 76(27), 29.
- [19] J. LeDoux, *Synaptic Self. How Brains Become Who We Are?*, Viking, New York, **2002**.
- [20] Diese Rezeptoren aktivieren im Zellinneren Guaninnucleotid-Bindungsproteine (G-Proteine), die dort als Signalmoleküle fungieren, die Ionenkanäle und die Synthese von sekundären Botenstoffen anregen. Beschreibungen und Diskussionen zu G-Proteinen finden sich in a) C. A. Parent, P. N. Devreotes, *Science* **1999**, 284, 765; b) S. P. Neves, P. T. Ram, R. Iyengar, *Science* **2002**, 296, 765.
- [21] W. Zhong, J. P. Gallivan, Y. Zhang, L. Li, H. A. Lester, D. A. Daugherty, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **1998**, 95, 12088; L. Li, W. Zhong, N. Zacharias, C. Gibbs, H. A. Lester, D. A. Daugherty, *Chem. Biol.* **2001**, 8, 47.
- [22] Eine Diskussion des Geruchs- und Geschmackssinns findet sich in: C. L. Wilkinson, *Chem. Eng. News* **2000**, 78(18), 1; P. Zurer, *Chem. Eng. News* **1996**, 74(41), 5.
- [23] *TIME*, 5. Februar 2001, S. 51.
- [24] a) K. Palczewski, T. Kumashiro, T. Hori, C. A. Bhnke, H. Motoshima, B. A. Fox, I. Le Trong, D. C. Teller, T. Okada, R. E. Stenkamp, M. Yamamoto, M. Miyano, *Science* **2000**, 289, 739. b) Die Neuronen des Sehsystems reagieren auf verschiedene Teile desselben Objektes, welches fixiert wird, wenn es zu synchronen Entladungen der Neuronen kommt. Diese Synchronizität der neuronalen Entladungen neigt dazu, symmetrische Objekte vorzuziehen. Siehe S. H. Lee, R. Blake, *Science* **1999**, 284, 1165.
- [25] Als sehr schöne Metapher für die chirale Erkennung nennt R. Hoffmann auf S. 40 in Lit. [3b] das Händeschütteln im Dunkeln. Besonders wirksam ist es, in einem öffentlichen Vortrag mit Zuhörern die Hände zu schütteln, um die chirale Erkennung zu illustrieren.
- [26] Kürzlich konnte gezeigt werden, dass bei der Einnahme von Ecstasy (3,4-Methylendioxymethamphetamin) eine deutlich verstärkte Serotonin-Neurotransmission einsetzt. Der Serotoninverlust führt zu Depressionen, dauerhaften Gehirnschäden und einer erheblichen dopaminergen Toxizität (Unterbrechung der Axone von Neuronen und eine Anfälligkeit für das Parkinson-Syndrom). Siehe C. Holden, *Science* **2002**, 297, 2185.
- [27] Anders als die Chemie, die eine sehr präzise Sprache nutzt, ist die Neurochemie gezwungen, sich etwas weniger präzise auszudrücken, weil zwischen der Ebene der chemisch-mechanischen Details (Neurotransmission, Hirnregionen usw.) und der Ebene der integrierten Erfahrung (Depression, Liebe, Motivation usw.) hin- und hergewechselt wird. Die Kluft zwischen diesen Ebenen kann man vergleichen mit der zwischen den einzelnen Buchstaben des Alphabets und einem Gedicht. Die Buchstaben sind sicherlich die einzigen Bestandteile des Gedichts, aber nicht jeder Buchstabenberg ist auch ein Gedicht. Die Überbrückung dieser Sprachenkluft, sodass die Beziehung zwischen den Einzelteilen und der Gesamtheit deutlich wird, ist die Herausforderung, die vor uns liegt. Für Beispiele siehe die Einleitung „Whole-istic Biology“ zu einer Reihe von Beiträgen über Systembiologie und -komplexität: L. Chong, L. B. Ray, *Science* **2002**, 295, 1661–1682.
- [28] a) C. J. S. Thompson, *The Lure and Romance of Alchemy*, Senate Press, London, **1990**; b) R. Patai, *The Jewish Alchemists*, Princeton University Press, **1994**, S. 62, 63, 79, 254.
- [29] H. W. Schütt, *Auf der Suche nach dem Stein der Weisen – die Geschichte der Alchemie*, Beck, München, **2000**.