

Ein Hauch von einem Duft kann in uns Erinnerungswelten wachrufen. Gefühle und Zustände bewegen uns wieder, und die Bilder der Vergangenheit stehen lebendig vor unserem inneren Auge. Düfte sind innig mit unserem emotionalen Gedächtnis verknüpft. Manches davon wird uns bewusst, vieles bleibt im Unbewussten, beeinflusst unser Verhalten aber nicht weniger stark. Wir können einen Menschen »nicht riechen«, wir sagen »mir stinkt es«, wenn wir eine Abneigung ausdrücken und wir »beschnuppern« uns erst einmal, wenn wir uns kennenlernen wollen. — Düfte und Geruchssinn sind die ältesten Kommunikationssysteme von Lebewesen. Bakterien orientieren sich an chemischen Gradienten und finden sich zur sexuellen Fortpflanzung. Eizellen von Moosen und Farnen senden Lockstoffe aus, um männliche Zellen zu leiten. Markierungsmoleküle und Konzentrationsstufen von Leitsubstanzen dienen als Erkennungsmarken für die Entwicklungsprogramme in höheren Tieren und Pflanzen. Überall herrscht das gleiche molekulare Prinzip. Duftsubstanzen sind die molekularen Schalter in den Erkennungsmolekülen. Klinken sie ein, dann steuern sie Prozesse in der Zelle, schalten Wachstumsvorgänge ein oder aus, verändern die elektrischen Signale von Zellen, verknüpfen Zellen zu Verbänden oder lösen solche auf. Dabei werden genetische Programme aktiviert oder abgeschaltet und somit wird das in der Evolution der Organismen entstandene Gedächtnis zum Ausdruck gebracht. Dieses Gedächtnis ist niedergelegt in der Anordnung molekularer Buchstaben im Erbträger, dem DNS-Molekül (Desoxy Nuklein Säure). — Jede Tier- und Pflanzenart enthält eine andere Information in ihrer DNS, und alle Individuen einer Art unterscheiden sich geringfügig in der Buchstabenabfolge ihrer DNS. Bei der sexuellen Fortpflanzung werden diese individuellen Abweichungen immer wieder neu gemischt, so dass im Ganzen jeweils eine Art über dasselbe Artgedächtnis verfügt. Dieses Artgedächtnis bestimmt auch, was Organismen riechen können, und welches erfahrungsabhängige Gedächtnis die einzelnen Mitglieder der Art bilden können. — Wie ein erfahrungsabhängiges Gedächtnis entsteht ist zwar in vieler Hinsicht ein Geheimnis, aber wichtige Entdeckungen wurden in den letzten Jahren gemacht. Die Geruchswahrnehmung beginnt mit den Molekülen, die von den Geruchssubstanzen wie mit einem Schlüssel ein- und ausgeschaltet werden. Säugetiere, und wohl auch der Mensch, verfügen über hunderte solcher verschiedener Moleküle. Jeweils eine Sorte ist in der Membran einer Art von Geruchsrezeptoren in der Nasenschleimhaut angeordnet. Jeder dieser Geruchsrezeptoren ist damit für eine bestimmte Gruppe von Duftmolekülen empfindlich – meist für recht viele, aber in einer abgestuften Weise. Da sich die Empfindlichkeitsspektren von verschiedenen Duftrezeptoren nur zum Teil unterscheiden, wird die riesige Zahl von Duftmolekülen, die wahrgenommen werden können, jeweils von einer ganzen Zahl verschiedener Duftrezeptoren registriert. Wenn ein Duftmolekül ein Erkennungsmolekül einschaltet, dann führt das zu einer Änderung der elektrischen Spannung

der Rezeptorzelle und damit zu einem Signal für das Gehirn. Duftrezeptoren liefern also dem Gehirn elektrische Erregungssignale, die auf vielen Nerven parallel in die erste Verarbeitungsinstanz einströmen. Die ca. 30 Millionen Duftrezeptoren in unserer Nasenschleimhaut mit ihren zum Gehirn ziehenden Nervenfasern gehören etwa 1000 verschiedenen Klassen von Duftrezeptoren an. Man kann also abschätzen, daß etwa 30 000 Rezeptoren derselben Klasse zum Gehirn ziehen. Dort enden sie in einem sehr ursprünglichen Teil des Gehirns, das schon bei den ältesten Wirbeltieren den Eingang vom Riechorgan erhielt: Dieser Teil des Gehirns, der *Bulbus olfactorius*, ist direkt und innig mit Regionen des Gehirns verschaltet, die unsere Gefühle und unsere unbewussten Reaktionen steuern. Dies mag der Grund dafür sein, dass Duftgedächtnisse so stark mit unserer Gefühlswelt verknüpft und viele duftgesteuerte Verhaltensweisen nicht unserer Kontrolle durch das Bewusstsein unterliegen. Der *Bulbus olfactorius* ist aber auch mit Regionen unseres Gehirns verschaltet, deren Funktionen uns bewusst werden. Dies versetzt uns in die Lage, Düfte zu erkennen, sie bewusst Situationen zuzuordnen und unser Verhalten danach einzurichten. Wie aber geschieht das? — Wie sortiert das Gehirn die Erregungssignale der 30 Millionen Duftrezeptoren so, dass eine bestimmte Substanz einer eindeutigen Duft-

wahrnehmung zugeordnet wird und dass Mischungen von vielen Substanzen ihre ganz charakteristische Duftnote erhalten? Die Leistungen des Riechsystems sind in der Tat erstaunlich. Einem Hund reichen wenige Moleküle während eines Schnüffelvorgangs, um einen Duft zu erkennen. Ein Mottenmännchen des Seidenspinners *Bombyx mori* vermag das Weibchen an einem von diesem erzeugten Molekül in 1 Milliliter Luftvolumen zu erkennen. Die Duftunterscheidung erscheint fast unbegrenzt: Wir Menschen können sicher mehr als 10 000 Düfte unterscheiden, aber gut trainierte Parfümeure und Weinkenner übertreffen diese Zahl bei weitem. Eine Eigenart der Duftwahrnehmung gilt für Menschen wie für Tiere: Die Duftqualität kann stark von der Konzentration des Duftes abhängen. So riecht zum Beispiel der im Parfüm häufig verwendete Duftstoff Ionon in niedrigen Konzentrationen nach Veilchen, in höheren nach Holz. Moschus (aus Drüsen des hirschartigen Moschustieres) ist in sehr geringer Konzentration Bestandteil vieler Parfüms, in

hoher Konzentration hat es für uns einen ekelerregenden Geruch. Diese Hedonik der Duftwahrnehmung verweist auf das genetisch festgelegte Artgedächtnis, das über die im DNS-Molekül gespeicherte Information die Verknüpfung der Nervenzellen im Gehirn so steuert, dass nicht nur Düfte erkannt werden, sondern ihnen auch Qualitäten (angenehm, unangenehm) angeborenermaßen, also ohne Erfahrung, zugeordnet werden. Diese genetische Steuerung der Duftwahrnehmung wird auch bei angeborener Duftblindheit deutlich. So können zum Beispiel 2 Prozent der Bevölkerung keinen Schweißgeruch und 33 Prozent kein Kampher riechen. Diesen Menschen fehlen die geeigneten Duftrezeptoren. Es gibt eine ganze Reihe solcher Duftblindheiten. Andere Leistungen des Riechsystems weisen auf die große Bedeutung der Erfahrung mit Düften hin, mitunter schon ganz früh in der Entwicklung. Kaninchen werden zum Beispiel schon vor der Geburt auf bestimmte Futterpflanzen geprägt, die die Mutter aufnimmt. Diese werden



7/97 Die Blumenbilder von Georgia O'Keeffe zeigen die Blüten voluminös von ihrer sinnlichen betörenden Seite, fleischlich und üppig in der Farbigkeit. Die »Weiße Trompetenblume« mit ihrem weit geöffneten Kelch scheint Düfte zu verströmen wie sie umgekehrt als Trichter von verschlingender Anmutung ist.
San Diego Museum of Art

Installation »Geruch und Gedächtnis«. Mit Hilfe eines interaktiven Spiels können Besucher in die Rolle einer Biene schlüpfen und beim Flug über eine blühende Wiese den Zusammenklang von Düften und ihre Einprägung in das Gedächtnis erleben. (Die Installation entstand in Zusammenarbeit von Prof. Randolf Menzel und Dr. Giovanni Galizia, Institut für Neurobiologie, Freie Universität Berlin, dem Medienkünstler Eku Wand und dem Trickfilmer Heinz Busert)

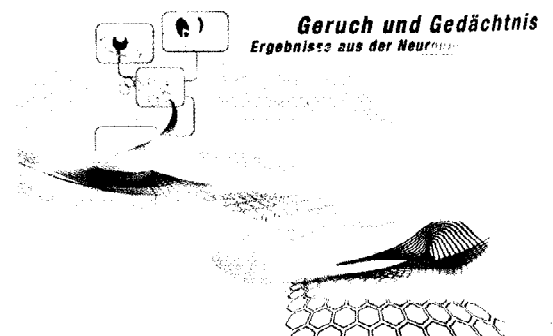
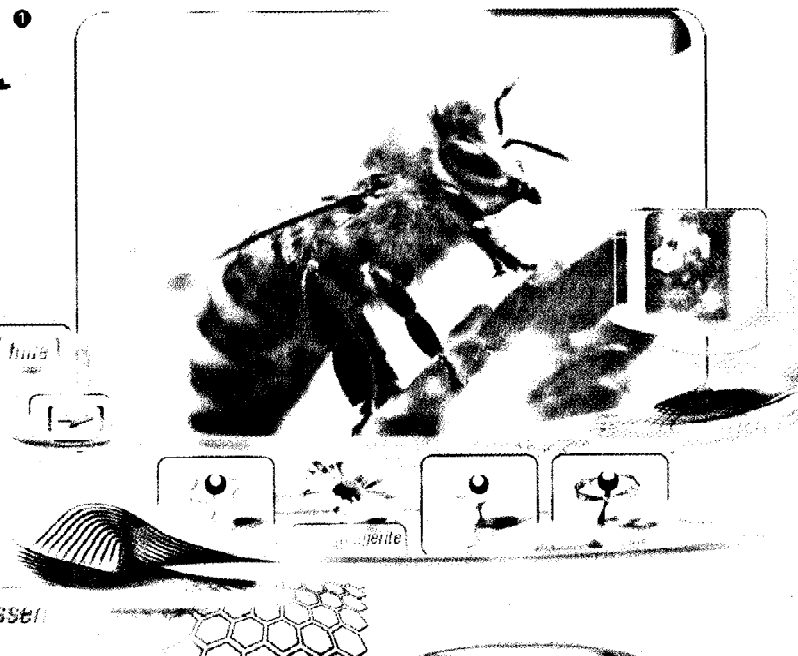
1 Die Nase der Biene ist auf ihren Fühlern. 60 000 Sinneszellen empfangen dort ein buntes Potpourri von Duftstoffen, während die fleißige Sammlerin über eine blühende Sommerwiese fliegt. Was spielt sich dabei in ihrem Gehirn ab? Und was passiert, wenn die Biene lernt und sich die Erinnerung an einen ganz bestimmten Duft einprägt?

2 Der »Duft-Code« der Biene hat auch Ähnlichkeit mit der Musik. Ein Akkord ergibt sich aus einer bestimmten Kombination von Noten. Ändert sich nur eine Note, so kann doch der ganze Akkord anders klingen. Ordnet man nun jedem Glomerulus eine Note zu, so wird ein Duft als Akkord »hörbar« und der Besucher kann wie mit einer natürlichen »Duft-orgele« eigene Kompositionen erstellen.

3 Die Bilder zeigen einen winzigen Teil des Bienenhirns - hier findet die Duftwahrnehmung statt. Die kleinen runden Kügelchen sind Nervenknäuel, sogenannte Glomeruli. In den Experimenten brachten Gehirnforscher diese Glomeruli mit einem speziellen Farbstoff zum »Leuchten« und nahmen Filme der Hirnaktivität auf. Immer dann, wenn die Biene einen Duft roch, blinkte eine ganz bestimmte Kombination der Nervenknäuel auf (gelbe und rote Stellen). So hat jeder Duft seinen eigenen »Code« im Gehirn. Beim Lernen prägt sich dieses Muster tief ein und hinterlässt eine bleibende Erinnerung im Hirn der Biene.

auch von den Tieren nach der Geburt gewählt. Ein Schaf muss sein Neugeborenes unmittelbar nach der Geburt riechen, damit es dieses als sein eigenes Junges annimmt. Solche prägnanten Lernvorgänge sind außerordentlich stabil und wirken unbewusst. — Wenn wir verstehen wollen, wie das Gehirn Duftunterscheidung und Dufterlernen leistet, müssen wir ihm bei diesen Aufgaben zusehen. Das gelingt, weil die elektrischen Erregungssignale der Duftrezeptoren gemessen werden können und der Erregungsfluss im Gehirn sichtbar gemacht werden kann. Dann tut sich eine wunderbare Welt der Gehirnleistung auf. Wir sehen, dass Düfte zu Erregungslandschaften führen, die für jeden Duft unterschiedlich und spezifisch sind. Die Ausstellung zeigt dies am Beispiel des Riechsystems der Biene. Die Biene ist besonders geeignet, weil man ihrem Gehirn tatsächlich beim Riechen und beim Dufterlernen zusehen kann. Da die Leistungen beim Riechen und der Aufbau der ersten Gehirninstanz von Biene und Säugetieren recht ähnlich sind, kann man aus den Erkenntnissen am Bienenhirn auch vieles über unser eigenes Gehirn lernen. — Wie beim Säugetier laufen die Nervenfasern der Geruchsrezeptoren auf der Antenne (hier 60 000 statt 30 Millionen beim Menschen) in eine erste Verschaltungsinstanz (hier Antennallobus und nicht olfaktorischer Bulbus genannt). Wie beim Säugetier vereinigen sich die Nervenfasern in kleinen Klumpen von dichten Nervenverschaltungen, den Glomeruli. Säugetiere haben einige Tausend solcher Glomeruli, die Biene hundertsechzig, die alle genauestens bekannt sind. Die hundertsechzig Glomeruli bilden eine traubenartige Anordnung, zwischen denen viele Nervenzellen vermitteln und von denen Nervenfasern ausgehen und zu anderen Gehirnregionen verlaufen, wie dies auch im Säugetiergehirn der Fall ist. Riecht die Biene nun einen Duft, dann werden die Riechrezeptoren, die mit ihren Erkennungsmolekülen auf den Duft ansprechen, elektrische Erregungssignale erzeugen und sie in die Glomeruli schicken. Hier entsteht nun eine Erregungslandschaft, die anzeigt, welche Duftrezeptoren und damit welche Glomeruli durch den Duft erregt werden. Sichtbar machen kann man die Erregungsverteilung im Gehirn mit bestimmten Farbstoffen. Diese Farbstoffe haben die Eigenschaft unterschiedlich stark zu fluoreszieren, wenn Nervenzellen unterschiedlich erregt sind. Die Fluoreszenzänderung kann man mit einem Mikroskop und einer Kamera messen und als Bildserie darstellen. In der Ausstellung wird die Verstärkung der Fluoreszenz als Farbänderung von Blau nach Grün nach Gelb nach Rot dargestellt. Auf diese Weise erkennt man

starke Erregung als gelbe und rote Flecken. — Man kann die Erregungslandschaft mit einer Karte beschreiben, in der die Glomeruli wie Landmarken angeordnet sind und jeder Duft zu einem unterschiedlichen Muster von herausgehobenen Landmarken führt. Ein Duft ist also im Gehirn ein Muster von Glomeruli-Erregungen. Da die Muster überlappen und stets mehrere, aber nicht viele Glo-



meruli an diesem Duftcode teilnehmen, können mit den hundertsechzig Glomeruli im Bienenhirn eine sehr große Zahl von Düften abgebildet werden. Und in der Tat unterscheiden Bienen sehr viele Düfte. Wahrscheinlich sind sie uns in der Duftunterscheidung eher überlegen als unterlegen. — Wie bildet sich ein Duftgedächtnis in einer solchen Glomeruli-Erregungslandschaft? Bienen wählen ja die Nektar und Pollen produzierenden Blüten, weil sie den Duft solcher Blüten lernen und bei ihren Suchflügen die Blütendüfte wählen, bei denen sie bereits erfolgreich waren. Lernen eines Duftes muss dazu führen, dass der bedeutungsvolle Duft aus den gerade bedeutungslosen Düften herausgehoben wird, aber die für die Düfte charakteristischen Glomeruli-Erregungskarten erhalten bleiben. Schaut man nun dem Bienenhirn zu, wenn es einen Duft lernt, dann sieht man, dass sich in der Tat die für diesen Duft charakteristische Erregungslandschaft verstärkt und sie von denen anderer Düfte verschiedener wird, dass sie sich aber nicht prinzipiell ändert. Das spezifische Gedächtnis für den gelernten Duft besteht also in einer Verstärkung der Verschaltungen im Gehirn, die zu der duftspezifischen Erregungslandschaft führen. Diese Beobachtung spiegelt ein wichtiges Prinzip wieder, wie im Gehirn generell Gedächtnis abgebildet wird: diejenigen Verschaltungen werden dauerhaft verstärkt, die den Gedächtnisinhalt im Gehirn repräsentieren. Dieses Prinzip gilt nicht nur für die Duftgedächtnisse, sondern nach all dem, was wir wissen, für alle Formen von Gedächtnissen, solche des Menschen mit eingeschlossen. Bei der Bildung des Duftgedächtnisses der Biene lässt sich dies direkt sichtbar machen. — Gedächtnisse haben immer zwei Anteile, das des genetisch kontrollierten, in der Evolution der Tierart entstandenen Artgedächtnisses und das durch Erfahrung des einzelnen Tieres mit der Umwelt entstandene Individualgedächtnis. So lernen Bienen einen Blütenduft schnell zu erkennen, der eine ertragreiche Futterquelle markiert (Individualgedächtnis). Sie können aber auch bei Gefahr andere Bienen zu Hilfe rufen, indem sie einen Alarmduft aussenden. Diesen Duft erkennen alle Bienen, angeborenermaßen, als Alarmsignal (Artgedächtnis). Auf der Ebene der Nervenzellen und ihrer Verschaltung sind diese beiden Gedächtnisse innig verschränkt. Die Information des DNS-Moleküls steuert die Entstehung der groben Verschaltungsmuster der Nervenzellen und stellt all die molekularen Reaktionsketten an den richtigen Stellen zur Verfügung, an denen die Erfahrung zu Anpassungen der Verschaltung zwischen den Nervenzellen führen kann. Die Erfahrung moduliert dann die feine Verschaltung der Nervenzellen. Gedächtnis liegt also im Nervensystem als Muster von Verschaltungsweisen verteilt an vielen Stellen vor. Wie das Gedächtnis sich auswirkt, ob es uns bewusst wird, ob es Verhaltensweisen direkt steuert, unsere Wahrnehmung beeinflusst und das Bild der Welt um uns verändert, ist eine Leistung des gesamten Nervensystems. Dazu wirken viele Gedächtnisse in verschiedenen sensorischen und motorischen Regionen zusammen, und welche davon auf unser Art-Gedächtnis und welche auf unser Erfahrungsgedächtnis zurückgehen, ist häufig nur sehr schwer zu erkennen. Aber vielleicht ist diese Unterscheidung gar nicht so wichtig. Bedeutsam ist die Erkenntnis, wie sehr das Erleben der Welt und der Umgang mit ihr von unseren Erwartungen abhängen. Erwartungen sind das Ergebnis unseres Gedächtnisses für ähnliche Situationen. Gedächtnis ist eine Leistung des Nervensystems, das die Zukunft vorwegnimmt, weil es die Vergangenheit bewahrt. Diese Vergangenheit kann kurz oder lange zurückliegen, kurz im Sinne der Lebensspanne eines Individuums, lange im Verlauf von vielen Generationen und ausgeprägt durch den Vorgang der biologischen Evolution.