



# Wahrnehmung

## Sehen und Co. – Die fünf Sinne

### Sehen – Wahrnehmen – Verstehen

Beim Menschen kann man zwischen der primären Registrierung eines Objekts (hier allgemein als „Sehen“ bezeichnet), seiner bewussten Wahrnehmung und dem Verstehen derselben unterscheiden. Gemeint ist also das „Sehen mit dem Auge“, das „Sehen mit dem Gehirn“ und die Bildung eines mentalen Modells des Objekts.

### Welche Sinne kennt man?

Der Mensch hat fünf Sinne, so weiß der Volksmund und so sind sie in dem gleichnamigen opulenten Gemälde von HANS MAKART (1840–1884) abgebildet: Tasten, Hören, Sehen, Riechen und Schmecken oder mit ihren klassischen Bezeichnungen Gefühl, Gehör, Gesicht, Geruch und Geschmack.

Das ist natürlich bei weitem nicht vollständig. Was ist zum Beispiel mit dem Temperaturempfinden, mit dem Gleichgewichtssinn, mit den Schmerzrezeptoren oder mit den Dehnungsrezeptoren, die uns andauernd über die Lage unserer Gelenke informieren?

Interessanterweise gibt es im Körper noch unzählige weitere Rezeptoren oder „Sinne“, die bestimmte Schaltstellen unseres Gehirns etwa über die Säurestärke oder die  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Gehirn-Rückenmarks-Flüssigkeit, über die Sauerstoffkonzentration oder das Glucoseniveau im Blut oder über den Blutdruck informieren. Deren Werte werden in internen Regelkreisen benötigt. Sie stehen uns aber nicht bewusst zur Verfügung, sondern höchstens sekundär, etwa über ein Hungergefühl. Vermutlich nehmen wir sie nicht bewusst wahr, weil sie nicht direkt etwas über unsere Außenwelt aussagen. Für unser Überleben ist aber die Interaktion mit eben dieser Außenwelt der entscheidende Faktor.



### Haben nur Menschen und Tiere Sinne?

Nein, auch Pflanzen verfügen über Sinne! Zumindest haben sie Lichtsinneszellen und einen Schwerkraftsinn: Sie wissen, in welcher Richtung sie die Wurzeln ausbilden müssen. Auch Tastrezeptoren finden sich, die (etwa bei Mimosen) durchaus sehr schnell reagieren können. Und sogar einfache einzellige Lebewesen wie Bakterien verfügen bereits über primitive Sinne. Praktisch alle reagieren auf chemische Einflüsse aus ihrer Umgebung und bewegen sich z. B. in einem Stoffkonzentrationsgefälle in einer Vorzugsrichtung. Man nennt dieses Verhalten Chemotaxis und kann es als Entsprechung zu unserem Geschmacks- oder Geruchssinn auffassen. Es basiert auf Chemorezeptoren in der Zellmembran, die eine erstaunlich differenzierte Signalkaskade im Zellinneren in Gang setzen,

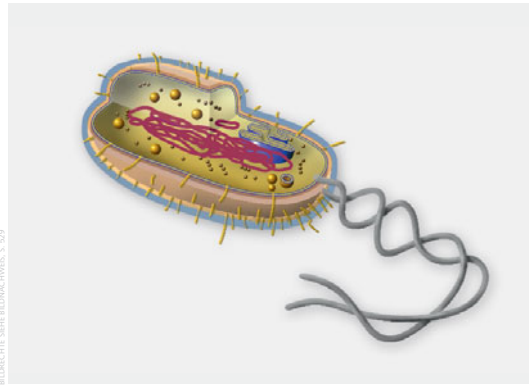
2-1

**Die fünf Sinne.** Sehen, Hören, Riechen, Schmecken, Tasten: Gemälde von HANS MAKART (1840-1884)



**2-2**

**Bakterienzelle.** Das Schema zeigt typische Strukturelemente eines Prokaryoten (Bakterien und Cyanobakterien). Die Ausstattung der einzelnen Arten mit Schleimhülle (blassgrau außen), Zellwand (rosa), Pili (gelb), Geißeln (grau), innerem Lamellensystem (blau) und anderen Funktionseinheiten (Organellen) variiert stark.



die wiederum den Motor, die rotierenden Geißeln (Flagellen) der Bakterien, reguliert.

Auch Reaktionen auf Licht (Phototaxis) werden schon bei vielen Bakterien angetroffen und angesichts der doch recht komplexen Verhaltensweisen würde es verwundern, in diesem Lebensreich nicht auch ein Tastempfinden (Mechanorezeption) zu finden. Man beachte, dass diese erstaunlichen Lebewesen, die von uns meist nur als Krankheitserreger wahrgenommen werden, all diese Wahrnehmungsleistungen innerhalb einer einzigen Zelle vollbringen (► Kapitel 12).

Vielzeller wie wir Menschen benötigen für jede Einzelaufgabe spezialisierte Organe, die oft aus einer astronomischen Anzahl von Zellen bestehen.

Schon die direkten Sinne versorgen uns mit einem breiten Spektrum an Informationen über Eigenschaften der Welt, die für uns und unsere Vorfahren potenziell wichtig waren. Hier sind bei komplexeren Lebewesen offenbar einfache Regelkreise wie die erwähnte Phototaxis nicht mehr ausreichend.

Die Evolution kann neue Sinne und neue neuronale Verarbeitungsmechanismen nur dann hervorbringen, wenn sich für das Lebewesen zumindest ein kleiner Selektionsvorteil ergibt. Man braucht nicht besonders viel Phantasie, um zu erkennen, welcher enorme Selektionsvorteil sich daraus ergibt, gezielt zu einer Nah-

rungsquelle schwimmen zu können oder zu lernen, einem sich nähernden Fressfeind rechtzeitig auszuweichen.

Warum haben wir gerade die Sinne, die wir haben, und keine anderen?

Aber nicht alle Sinne kann die Natur so direkt erschaffen. Da jede zusätzlich gebildete Sinnesstruktur einen gewissen Energiebetrag kostet, der dem Lebewesen an anderer Stelle möglicherweise fehlt, setzt sie sich nur dann in einer Population durch, wenn die gewonnene Information einen ausreichenden Wert besitzt. So verfügen viele Schlangen über einen Infrarotsinn, mit dem sie die Körperwärme eines Opfers erspüren können, Fische haben ein elektrisches Seitenlinienorgan zur Wahrnehmung elektrischer Felder im Wasser

**Eingangsstreife menschlicher Sinne**

- Elektromagnetische Wellen (Licht) von ca. 400–800 nm Wellenlänge
- Druckwellen (Schall) von ca. 16–16000 Schwingungen pro Sekunde (Hz)
- Mechanisch hochfrequent (Vibration)
- Mechanisch niederfrequent (Druck)
- Wärme (schnelle Molekülschwingungen)
- Kälte (langsame Molekülschwingungen)
- Geruch (Stoffkonzentration in Gasen, ca. 350–400 unterschiedliche Rezeptoren)
- Geschmack (Stoffkonzentration in Flüssigkeiten; Rezeptoren für süß, salzig, sauer, scharf, umami, Calcium, evtl. Fett (ungeklärt) sowie einige Dutzend Bitter-Rezeptoren)

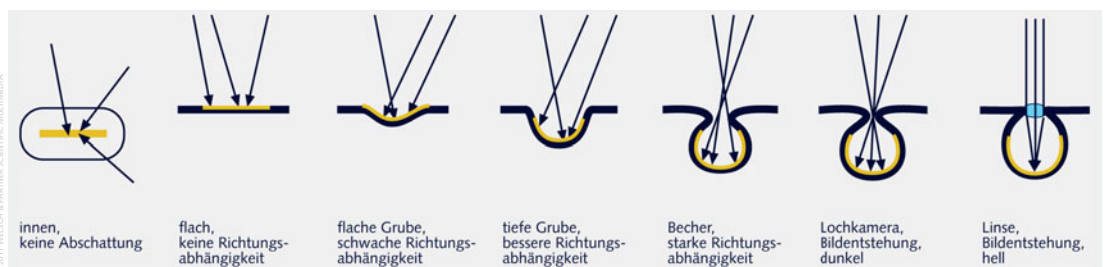
**Wofür wir z. B. keine Sinne besitzen**

- Magnetfeldstärke und -richtung
- Elektrische Feldstärke und -richtung
- UV-Strahlung\*
- Infrarotstrahlung\*
- Radiowellen
- Röntgenstrahlung
- Gammastrahlung
- Neutronenstrahlung

\*starke Infrarot- und Ultraviolettstrahlung können wir zwar über ihre Wirkung (Erwärmung bzw. Sonnenbrand) wahrnehmen, dies ist aber kein spezialisierter Sinn.

**2-3**

**Evolution der Lichtsinnesorgane.** Von einfachen Lichtsensoren bis hin zu einer punktgenauen Abbildung der Außenwelt bieten alle Zwischenstufen dem Träger signifikante Überlebensvorteile.





und Vögel können Magnetfelder buchstäblich „sehen“, denn diese aktivieren dieselben Gehirnstrukturen wie optische Eindrücke.

Ein möglicher Grund dafür, dass wir über manche denkbaren Sinne nicht verfügen, ist also sicherlich, dass die daraus gewonnene Information bei unserer jeweiligen Lebensweise im Laufe der Evolution einfach nicht wichtig genug für das Überleben war.

Dies kann auch eine Ursache dafür sein, dass manche Sinne, soweit man heute weiß, überhaupt nirgendwo auf der Erde entstanden sind. So kennen wir kein Lebewesen mit einem Sinnesorgan für Radioaktivität. Diese war (zumindest vor Tschernobyl) im Vergleich zu anderen Gefahren so wenig schädlich, dass sie das individuelle Überleben kaum beeinflusste und somit der notwendige Selektionsdruck zur Ausbildung eines entsprechenden Sinns fehlte.

Daneben ist natürlich auch keinerlei Garantie gegeben, dass stets eine passende Mutation für die Initialzündung zur Evolution eines eventuell nützlichen Sinns tatsächlich auftrat. Einiges an der Ausstattung von Lebewesen scheint nicht auf Notwendigkeit, sondern auf Zufällen in der Stammesentwicklung zu basieren. Das Auftreten solcher Mutationen ist übrigens bei einfachen Lebewesen mit hoher Individuenzahl, kurzer Generationsdauer und wenig ausgeprägten DNA-Reparaturmechanismen ungleich wahrscheinlicher als bei höheren Tieren.

Andererseits ist es auch wahrscheinlich, dass sich manche Eigenschaften der Welt gar nicht direkt mit biologischen Systemen aufnehmen lassen. Kann man sich vielleicht noch die Entstehung eines Röntgen- oder Gammastrahlungssinns vorstellen, so sieht es bei manchen extrem schwach wechselwirkenden Teilchen schon anders aus. Hier verbietet nicht nur der fehlende Selektionsvorteil die Entstehung eines solchen Organs, sondern die physikalischen Eigenschaften selbst (► Kapitel 10) machen sie praktisch unmöglich.

Ganz erstaunlich ist nach dieser Betrachtung, dass alle erwähnten unmöglichen Sinne schließlich doch entstanden sind. Denn unser Gehirn hat uns befähigt, die entsprechenden Sensoren sozusagen als „Prothesen“ herzustellen. Nachsichtgeräte, Richtmikrofone, Radioempfänger, Röntgenteleskope, Geigerzähler, optische Teleskope – all dies sind künstliche Sinne, die unseren eigenen Sinnen entweder neue Sinnesmodalitäten

hinzufügen oder vorhandene um viele Größenordnungen empfindlicher machen. Sind also unsere technischen Errungenschaften das vorläufige Endergebnis einer Evolutionslinie? Nein, das sollte man nicht anzunehmen, solange niemand nachweist, dass die Zahl der Nachkommen von z. B. Gammastrahlungsastronomen aufgrund ihres Berufs besonders groß ist. Der Zusammenhang ist offensichtlich ein anderer: Bisher hat die starke Entwicklung unseres Gehirns das Überleben der Menschen enorm gefördert. Wir sind zur vorherrschenden Spezies unseres Planeten geworden und leben auf der Erde in einer Dichte, die dutzende Mal höher ist, als man es für Tiere vergleichbarer Größe im besten Falle erwarten könnte (und als es ratsam wäre). Dieses so nützliche Gehirn bringt als Nebeneffekt die Neugierde mit sich. Dieser allgemeine Drang, mehr über die Umwelt wissen zu wollen, kann sehr wohl ein Überlebensvorteil sein. Das massive Interesse an allen Vorgängen in der Welt, das wir auch bei vielen Jungtieren beobachten, bleibt bei vielen Exemplaren unserer Spezies ein Leben lang erhalten und bildet so die Grundlage für die stetige Verfeinerung und Ausdehnung unserer technischen Sinne. Man kann es auch so ausdrücken: Da Wissenschaft eine Folge der evolutionär begünstigten Komplexität unseres Gehirns ist und offensichtlich (bisher) nicht groß geschadet hat, lässt uns die Natur diese Spielwiese. Vielleicht ist es so etwas wie Präadaptation. So nennen Biologen die Erscheinung, dass eine ideale Anpassung unmöglich ist; gute Flieger wie Albatrosse sind miserable Läufer. Individuen einer Spezies zeigen eine gewisse Streuung in ihren Eigenschaften und Verhaltensweisen. Bei sich ändernden Umwelteinflüssen ist so das Überleben der Spezies wahrscheinlicher, da ja schon einige Individuen den neuen Verhältnissen zufällig besser angepasst sind als das Gros. Vielleicht wird ja doch eines Tages die Zeit kommen, in der Gammastrahlungsastronomen ihren potenziellen evolutionären Vorteil ausspielen können.

## Materie sehen und wahrnehmen

Wir sind „Augentiere“. Der Löwenanteil der Informationen, die wir über die materielle Welt erhalten, entstammt dem Gesichtssinn. Ihm verdanken wir in erster Linie das gedankliche Bild der Außenwelt, auf dem unsere Erkenntnisse und unsere Interaktionen beruhen. Das Sehen ist



**2-4**  
**Baupläne für hochentwickelte Augen im Vergleich.** Das Auge des Menschen (Mitte) gehört zu den höchstentwickeltesten "allround"-Talenten im Tierreich. Für jeden Einzelaspekt finden sich allerdings leistungsfähigere Spezialisierungen. Oben: Tintenfischaugen (hohe Lichtempfindlichkeit); unten: Insektenaugen (hohe zeitliche Auflösung); Leistungsfähigere Spezialisierungen gibt es auch bezüglich räumlicher Auflösung (Raubvögel) oder Farbsehen (Krebse).



deshalb für die meisten Menschen ein so natürlicher Vorgang, dass sie im täglichen Leben selten darüber nachdenken. Oberflächlich betrachtet, geht es dabei um Licht, das in unsere Augen fällt und auf der Retina in Nervensignale umgewandelt wird. Dies allein schon als Beschreibung des Sehens zu bezeichnen, würde allerdings gerade die wichtigsten Aspekte auslassen.

Sehen wir etwa eine völlig saubere Glasscheibe, durch die Licht in unsere Augen fällt? Können Fledermäuse Hindernisse sehen? Können bewusste Personen sehen, wenn der Arzt ihnen ins Auge leuchtet? Sehen wir Dinge im Traum? Sehen wir einen Baum auf einem Bild wirklich, obwohl sich dort überhaupt kein Baum befindet, sondern eine Ansammlung von Farbtupfern? Oder sehen wir ein Modell auf einem Computerbildschirm? Ein Teilchen in einem Elektronenmikroskop? Sehen wir den Kommissar, wenn wir uns beim abendlichen Fernsehen einen Krimi anschauen? Seltsame Fragen, sicher, aber durchaus wichtig für unsere Erkenntnisse über die Welt.

Normales, direktes Sehen (des Menschen) hat tatsächlich erst einmal mit Licht zu tun. Man kann folgenden Ablauf notieren:

- 1 Eine Lichtquelle sendet Licht aus.
- 2 Das Licht interagiert mit einem Objekt.
- 3 Verändertes Licht fällt vom Objekt ins Auge.
- 4 Das Auge erzeugt ein Bild des Objekts auf der Netzhaut (Retina).
- 5 Die Retina wandelt das Bild in Nervensignale um.

## 2-5

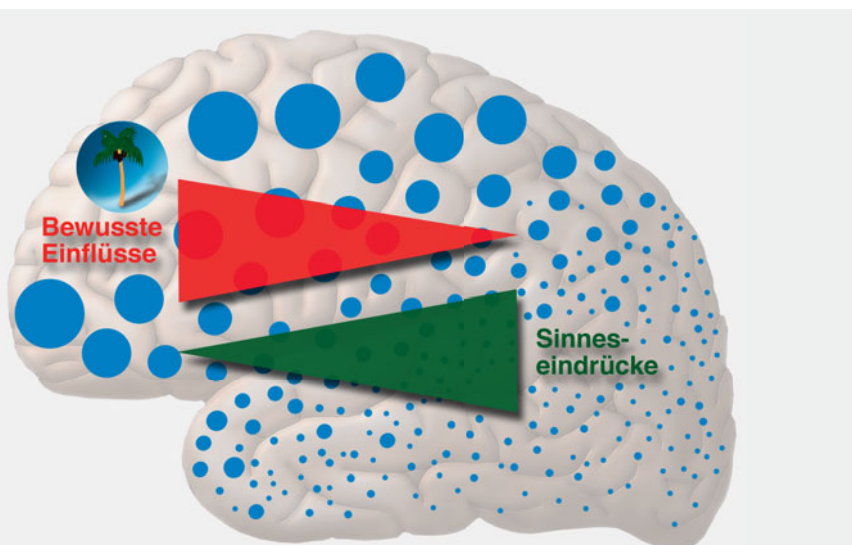
**Wahrnehmung.** Die Wahrnehmung unserer materiellen Umwelt beruht nicht auf einer Einbahnstraße der Abstraktion von den Sinnen ins Bewusstsein. Vielmehr werden alle Wahrnehmungen auf mehreren Ebenen von Erwartungen und Kontextinformation gefiltert und verändert.

- 6 Die Sehnerven leiten die Information in die primäre Sehrinde (im Hinterkopf).
- 7 Die Information wird ins Frontalhirn (Stirnlappen) transportiert und bewusst wahrgenommen.

Damit kommen wir der Sache schon etwas näher. Aber offenbar ist diese Beschreibung der visuellen Wahrnehmung noch viel zu eng gefasst. Große Teile des Vorgangs finden völlig unabhängig vom Licht irgendwo zwischen der Netzhaut unserer Augen und den neuronalen Strukturen in unserem Gehirn statt, in denen sich unser subjektiv empfundenes Bewusstsein abspielt.

Zum Sehen gehören Rückkopplungsschleifen. Es ist viel eher ein Teil des Denkens und des Bewusstseins als ein isolierter Vorgang. Man muss sich frei machen von der rein mechanistischen Vorstellung, dass eine vom menschlichen Bewusstsein unabhängige materielle Außenwelt über unser Auge wie durch die Linse eines Fotoapparats auf eine Art Leinwand im Gehirn projiziert wird. Dieses Modell trägt wenig zum Verständnis der Wahrnehmung bei, es greift ausschließlich für den dioptrischen Apparat, jenen Teil des Auges, der nach dem klassischen Prinzip der Strahlenoptik funktioniert. Im Gehirn gibt es aber keinen Homunculus, der eine Projektion als unabhängiger Beobachter, als Bewusstsein unabhängig vom Gehirn, betrachten könnte.

Sehr instruktiv ist es auch, sich klar zu machen, wie stark die von der materiellen Außenwelt einströmende Datenflut gefiltert und verdichtet wird, bevor sie in unser Bewusstsein gelangt. Unsere Augen sind in der Lage, von der schwer abzuschätzenden Gesamtinformation, die in unserer unmittelbaren materiellen Umwelt auf unsere Netzhaut (Retina) einströmt, etwa 10 Milliarden Bits pro Sekunde über die Sehzellen (Zapfen für Farbsehen und Stäbchen für Schwarzweißsehen) aufzunehmen. Die Retina ist evolutionär aus einer Ausstülpung des Gehirns entstanden. Bereits in der Retina sorgt eine komplexe Verschaltung der Signale dafür, dass nach der Vorverarbeitung nur noch 6 Millionen Bits pro Sekunde, also weniger als ein Tausendstel, über den Sehnerv transportiert werden müssen. Über verschiedene Schaltstationen (Chiasma, Corpus geniculatum laterale) erfolgt auf dem Weg ins primäre Sehzentrum (Area 17 am hinteren Gehirnpol) eine weitere





bedeutende Kompression, so dass dort nur noch ca. 10 000 Bits pro Sekunde ankommen. Doch bis zur bewussten Wahrnehmung im Frontalhirn wird heftig weiter reduziert. Psychologen schätzen, dass gerade noch etwa 100 Bits pro Sekunde in unser Bewusstsein gelangen. Das entspricht einer phantastischen Informationsverdichtung um den Faktor 100 Millionen.

Neuere Untersuchungsmethoden, mit denen die Intensität der Gehirntätigkeit erfasst werden kann, belegen, dass die Erinnerung an bestimmte Eindrücke im Wesentlichen dieselben Gehirnregionen aktiviert wie die direkte Wahrnehmung. Auch wird diese Wahrnehmung keineswegs nur von den momentan einlaufenden Informationen bestimmt, sondern mindestens ebenso stark durch die aktuellen internen Zustände. Erinnerung, Absichten, psychischer und physischer Zustand beeinflussen das Gesehene durch Rückkopplungen von Gehirnzentren höherer Abstraktionsebene auf Teile des Sehsystems, die der physischen Außenwelt in der Verarbeitungskaskade näher stehen. Je weiter wir die eingehende visuelle Information in ihrem Konzentrations- und Abstraktionsweg vom Auge bis ins Gehirn und Bewusstsein verfolgen, desto größer wird dieser „subjektive“ Anteil an der Wahrnehmung.

So kann es passieren, dass wir ein gesuchtes Objekt (etwa eine Zuckerdose auf dem Tisch) scheinbar nicht sehen können, obwohl wir direkt davor stehen – ganz einfach deshalb, weil sie vielleicht aus Porzellan besteht und wir eine Dose aus Edelstahl erwartet hatten. Wie weit diese sogenannte Unaufmerksamkeitsblindheit gehen kann, wurde auch eindrücklich durch Experimente gezeigt, in denen mit einer Beobachtungsaufgabe beschäftigte Betrachter eines Baseballspieles nicht einmal einen Menschen bemerkten, der in einem Gorillakostüm quer über das Spielfeld ging. Offenbar gibt es keine bewusste Wahrnehmung ohne Aufmerksamkeit. Und je unwahrscheinlicher ein Objekt ist, je weiter weg vom Fokus unserer Aufmerksamkeit, desto eher wird es überhaupt nicht wahrgenommen.

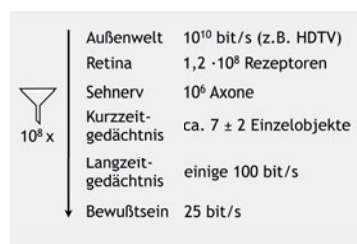
Demnach wäre der Begriff „Sehen“ durch die obige Aufzählung der Schritte von der Lichtquelle zum Bewusstsein viel zu eng gefasst. Wesentlich am „Sehen“ ist nicht die Unmittelbarkeit des Vorgangs, ganz im Gegenteil umfasst er sogar mehrere relativ unabhängige Vorgänge. Das Bewusstsein sollte man sich, darauf hat der

„Papst“ der Künstlichen Intelligenz, MARVIN MINSKY, in seinem Buch „Mentropolis“ vielfach hingewiesen, nicht als einheitliche Instanz vorstellen, sondern eher als eine große Menge miteinander interagierender Prozesse. Diese sind im Gehirn repräsentiert durch ineinandergreifende neuronale Netzwerke (cell assemblies), die beständig mit der Verarbeitung und Bewertung der vorliegenden alten und neuen Informationen beschäftigt sind.

Es liegen keine Erkenntnisse vor, die es nahe legen würden, dass es irgendwelche grundsätzlichen Unterschiede bei der neuronalen Verarbeitung auf unterschiedlichen Abstraktionsniveaus gibt. So scheinen einfachere Netzwerke für die Verschaltung der Ausgangsinformation verschiedener Sehzellen zur Kantenerkennung verantwortlich zu sein, komplexere Versionen sind vielleicht für die Erkennung eines roten Balls, einer Rose oder eines Gesichts zuständig und noch komplexere bilden vielleicht die interne Repräsentation einer Idee oder eines Vorhabens. Komplexität muss in diesem Fall nicht notwendigerweise mit der Anzahl der Neuronen korrelieren, die ein solches Netzwerk bilden. Es kann sich ebenso gut auf die komplexe Abstraktionsebene beziehen, welche die Eingangsinformation liefert (obwohl die Vermutung einer auch zahlenmäßig komplexeren Struktur nahe liegt).

Wie kann das dünne Informationsrinnsal, das uns aus der Umwelt erreicht, genügen, um die von uns empfundene Vielfalt der Welt und des Erlebens zu generieren?

Offensichtlich ist unsere subjektive Wahrnehmung nicht unmittelbar von den aktuell aufgenommenen Informationen abhängig. Vielmehr scheint es so zu sein, dass wir über ein detailliertes internes Weltbild verfügen, das sich hauptsächlich auf sich selbst bezieht. Fortwährend wird sein Zustand auf innere Konsistenz geprüft, unser Gehirn ordnet und berechnet wahrscheinliche Zukunftsszenarien als Vorbereitung auf mögliche hereinkommende Informationen. Diese Innenwelt ist nur schwach an die Außenwelt gekoppelt. Die wenige uns erreichende Information dient dazu, den notwendigen Abgleich durchzuführen, die Synchronisation zwischen der Welt und dem Weltmodell sicherzustellen. Diese Sichtweise wird auch von neueren Befunden gestützt, auf die MARCUS E. RAICHLE auf Basis von PET- und fMRT-Scans hingewiesen hat, nämlich dass unser Gehirn selbst ohne bewusste



## 2-6

**Welt und Gehirn.** Die Informationsfülle der Welt (hier am Beispiel visueller Informationen) wird durch unsere Sinne um Faktoren der Größenordnung 1 zu 100 Millionen reduziert. Die verbleibende Information dient dem ständigen Abgleich eines internen Weltmodells mit der wahrgenommenen Umwelt.



Gedankenprozesse und Wahrnehmungen, also etwa bei Tagträumen, im Schlaf und sogar unter Narkose, immer noch mit ca. 95 Prozent seiner Rechenleistung arbeitet und dabei Signalverarbeitung über ein Ruhestandardnetz (Default Mode Network) betreibt.

Auch andere Befunde weisen in diese Richtung. So treten etwa bei Ausfall bestimmter, an der höheren Verarbeitung beteiligter Hirnareale, sogenannte Agnosien (griech. *gnosis*, Wahrnehmung, Erkennen) auf. Eine Person kann zum Beispiel den linken Bereich ihres Gesichtsfelds nicht mehr wahrnehmen, obwohl das ganze visuelle System vom Auge bis hin zur primären Sehrinde völlig korrekt arbeitet. Erstaunlicherweise fehlt diesen Patienten scheinbar nichts in ihrem bewussten Weltbild. Sie kommen zum Beispiel nur zum Arzt, weil sie sich häufig (mit ihrer linken Körperseite) anstoßen.

Was diese Erkenntnisse für unser Verständnis der Welt und unserer eigenen Identität bedeuten mag, kann einem eine Gänsehaut verursachen. Was ist mit den Aspekten der Welt, für die wir einfach von Natur aus keine Gehirnstrukturen besitzen? Offenbar könnte unser *gnothi seauton* (griech. „Erkenne Dich selbst“) sehr eingeschränkt sein und wir würden es noch nicht einmal bemerken.

Ein wenig trösten kann uns aber, dass die Evolution uns sicherlich wenigstens mit dem Sensorium und den Verarbeitungskapazitäten ausgestattet haben wird, die für unser Überleben wichtig sind. Und das Gehirn besitzt eine erstaunliche Flexibilität, über das Notwendige hinaus zu gehen. Das zeigt sich zum Beispiel an einem Experiment, das GERALD H. JACOBS von der University of California in Santa Barbara durchgeführt hat.

Hierzu muss man wissen, dass Menschen wie andere Primaten Trichromaten sind. Wir können also drei Grundfarben unterscheiden, denn wir besitzen drei Arten von Zapfen mit verschiedenen Sehpigmenten. Sie heißen nach den Lichtwellenlängen, für die sie hauptsächlich empfänglich sind, L (lang), M (middle) und S (short) und entsprechen den Wahrnehmungen von Rot, Grün und Blau. Die Welt gewöhnlicher Mäuse ist viel weniger bunt. Wie auch alle anderen Säugetiere außer den Primaten sind sie Dichromaten. Sie können also nur zwei Grundfarben unterscheiden, denn sie besitzen nur Gene für die Pigmente

M und S. In dem faszinierenden Experiment wurde nun Mäusen ein menschliches Gen für das L-Pigment übertragen. Und tatsächlich: Dergestalt modifizierte Tiere konnten nun in den Versuchen lernen, bestimmte Orangetöne von Blau unterscheiden, was normalen Mäusen niemals gelang. Damit ist bewiesen, dass heranwachsende Gehirne über genügend Plastizität verfügen, ihre neuronale Verschaltung für zusätzlich zur Verfügung stehende Informationen zu optimieren. Somit sind eher nicht sie der Flaschenhals der Erkenntnis, sondern die zur Verfügung stehenden Sinnesorgane. Aber gerade da haben sich die Menschen mittels Technik in vielerlei Hinsicht Abhilfe geschaffen.

### Kleinste Teilchen der Materie sehen?

Trotz unserer sehr guten Augen, erscheint uns Materie normalerweise recht homogen. Solange man einheitliche Substanzen, – ein Stück Gold oder das Wasser in einem Glas –, betrachtet, kann man keine Struktur erkennen, die auf einen Aufbau aus Atomen schließen ließe.

Das einheitliche Aussehen ist eine Folge der begrenzten Auflösung des menschlichen Auges und der damit verbundenen verhältnismäßig großen Lichtwellenlänge. Punkte können bei normaler Betrachtungsentfernung gerade noch auseinander gehalten werden, wenn sie ca. 1/20 mm voneinander entfernt liegen. Da man mit Hilfe von Wellen normalerweise nur Dinge abbilden kann, die größer sind als etwa die halbe Wellenlänge, waren Chemiker früher stets darauf angewiesen, völlig „blind“ zu arbeiten. Bis in die 1960er Jahre hinein galt es als ausgemacht, dass man einzelne Atome, die Bausteine der Welt, die ein Chemiker manipuliert, nie würde sehen können, denn sie sind mit Radien von etwa 0,04–0,3 nm ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ) mehr als tausendfach kleiner als Lichtwellen (grünes Licht hat etwa eine Wellenlänge um 500 nm). Der etwa 0,3 mm große Punkt am Ende dieses Satzes hat demnach einen Durchmesser von etwa 1 Million Atomen.

### Sehen ohne Licht

Wir sind es gewohnt, „fern-zu-sehen“ und bezeichnen auch diese indirekte Ansicht der Dinge ohne weiteres als Sehen. Hierbei erreicht kein einziges Photon mehr den Betrachter, das tat-



sächlich einmal eine Wechselwirkung zum gesehenen materiellen Objekt erlebt hat. Sehen ist damit reduziert auf die reine Information, die vom Betrachter wahrgenommen wird.

Im Jahr 1951 konstruierte ERWIN W. MÜLLER an der Technischen Universität in Berlin das erste Feldionenmikroskop, mit dem Auflösungen bis zu 0,25 nm erreicht wurden. MÜLLER war damit der erste Mensch, der Atome in diesem Sinne „sehen“ konnte. Dennoch blieb die Darstellbarkeit in atomarer Dimension eine Ausnahme. Sie wurde kaum von einer breiteren Öffentlichkeit rezipiert, bis es HEINRICH ROHRER und GERD BINNIG 1981 am IBM-Forschungslabor in Rüschlikon gelang, das erste Rastertunnelmikroskop zu entwickeln. Mit der Weiterentwicklung zum technisch viel einfacheren Atomkraftmikroskop (AFM: atomic force microscope) 1985, für die BINNIG und ROHRER 1986 den Physiknobelpreis erhielten, wurden atomare Auflösungen in der Forschung breiter verfügbar.

Die heutige Fähigkeit, im Prinzip atomare bis subatomare Auflösungen zu erreichen und sogar einzelne Orbitale von Atomen abzubilden, bedeutet jedoch nicht, dass dies in der Praxis für die jeweils interessierenden Systeme immer gelingt. In dieser Hinsicht werden die allermeisten Chemiker also auch weiterhin mit unsichtbaren „Bausteinen“ mauern.

## Fühlen und Tasten

Meist sind uns diese Sinne weniger bewußt als der Gesichtssinn. Wie wichtig sie sind, stellt sich erst heraus, wenn sie etwa durch Nervenstörungen wie bei Lepraerkrankungen gestört sind. Andauernde Verletzungen sind die unweigerliche Folge. Blinde Menschen machen sich sogar ein inneres „Bild“ von Gegenständen allein durch den Tastsinn, ganz ähnlich wie moderne Atomkraftmikroskope, wenn gleich auf viel größeren Skalen.

Einige Eigenschaften fester oder flüssiger Materie können wir bei Berührung mit der Haut direkt wahrnehmen.

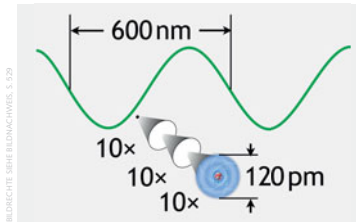
### Heiß oder kalt? – Thermorezeptoren

Fassen wir einen Stoff an, so ist es zunächst die Temperaturempfindung, die uns bewusst wird. Und zwar nicht die absolute Temperatur, ja nicht einmal unbedingt der Temperaturun-

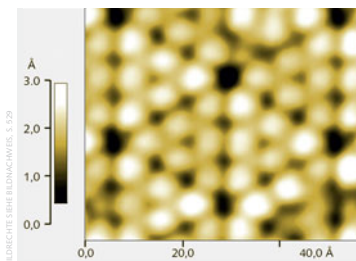
terschied zwischen Körperoberfläche und dem angefassten Gegenstand. Beispielsweise kommt uns Holz, Kork oder ein Tuch bei 70 °C in der Sauna keineswegs unerträglich heiß vor. Fassen wir aber ein Metallstück gleicher Temperatur an, so verbrennen wir uns daran die Finger. Was unsere Temperatursinneszellen (und im Falle von Schmerz die dafür zuständigen freien Nervenenden) tatsächlich detektieren, ist nämlich nicht die Temperatur des berührten Stoffes selbst. Sie teilen uns vielmehr mit, wie stark und in welche Richtung (heiß oder kalt) die Temperatur der Haut vom Optimum abweicht. Dies hängt natürlich vom Temperaturunterschied zwischen Haut und dem Gegenstand ab, aber auch davon, wie schnell Wärmeenergie vom Körper ab oder ihm zufließt, das heißt von dessen Wärmeleitfähigkeit. Bei Gegenständen geringer Masse wie Folien, die nicht an ein Temperaturreervoir angekoppelt sind, kommt hierzu noch ein gewisser Einfluss der Wärmekapazität: Eine heiße oberflächlich metallisierte Hohlkugel aus Plastik verbrennt uns nicht so leicht die Finger wie eine massive Metallkugel gleicher Temperatur. Bei Flüssigkeiten spielen noch andere physikalische Eigenschaften wie die Verdampfungswärme eine Rolle (alle diese Eigenschaften werden in Kapitel 4 behandelt). Für die Sinnesmodalitäten „heiß“ oder „kalt“ verfügen wir sogar über verschiedene Thermorezeptoren. Kältesensoren mit einem Messbereich von 5–43 °C reagieren recht schnell und liegen oberflächennah in der Haut. Sie sind etwa zehn Mal häufiger zu finden als Wärmesensoren. Letztere liegen in tieferen Hautschichten. Sie haben einen Messbereich von 30–48 °C und reagieren deutlich langsamer als die Kälterezeptoren.

### Direkter Kontakt – Mechanorezeptoren

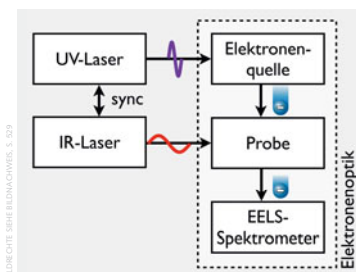
Berühren wir ein Objekt, so können wir gröbere Oberflächenrauigkeiten sofort wahrnehmen, denn Mechanorezeptoren in unserer Haut werden lokal unterschiedlich ansprechen. Hierzu dienen die in der Lederhaut (Dermis) lokalisierten Ruffini-Körperchen, die als langsam adaptierende Dehnungsrezeptoren wirken, sowie die in der tieferen Oberhaut (Epidermis) liegenden Merkel-Zellen. Letztere reagieren bevorzugt auf Druckreize durch Eindrücken der Haut in einem Frequenzbereich 0,3–3 Sekunden.



**2-7**  
**Lichtwellen und Atome.** Sichtbares Licht besitzt Wellenlängen, die etwa fünftausendfach größer sind als Atome. Atome lassen sich deshalb mit gewöhnlichem Licht nicht direkt darstellen.



**2-8**  
**Atomare Auflösung mit dem Atomkraftmikroskop.** Beispiel eines 5,8 nm x 5,8 nm großen Bereichs der Oberfläche eines Siliciumkristalls mit einer Topographie von bis zu 0,3 nm. (Bild freundlicherweise zur Verfügung gestellt von F. J. Gießibl)



**2-9**  
**UEM.** Ultraschnelle Elektronenmikroskopie (UEM) kombiniert atomare Auflösungen mit Bildfolgen im Femtosekundenbereich ( $10^{-15}$ ). Extrem kurze UV-Pulse erzeugen Einzel-Elektronen, während ein synchronisierter IR-Puls die Probe anregt. Damit können z. B. Bewegungsabläufe bei der Faltung von Biomolekülen oder Umlagerungen in Kristallgittern dargestellt werden.



Spätestens, wenn wir unseren Finger wieder zurückziehen, erhalten wir weitere Informationen: Er ist klebrig oder nicht. Klebrigkeit ist eine Qualität, die sich auf Grund der Reaktivität von Oberflächen ergibt. Sie wird in der Regel durch kurzfristig entstehende schwache chemische Bindungen vermittelt, sogenannte Wasserstoffbrückenbindungen (► Materialeigenschaft: klebrig, Seite 219). Nach dem Abheben des Fingers verrät uns eine ggf. einsetzende Temperaturabnahme, dass wir es mit einer leicht verdunstenden Flüssigkeit zu tun haben. Reflexartig reiben wir nun die Fingerkuppen aneinander. Damit bestätigen wir eine eventuelle Benetzung und können bei leichtem Gleiten Seife oder Öl, bei mehr Reibung Wasser vermuten.

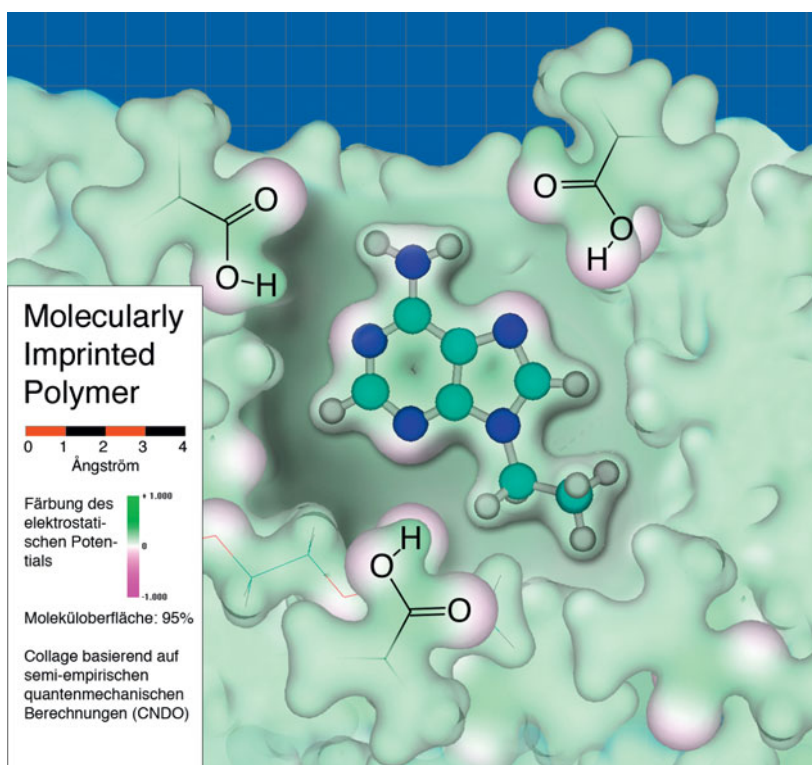
Um einen Gegenstand aber noch näher zu erfassen, pflegen wir unsere Finger prüfend in mehreren Richtungen über ihn hinweg gleiten zu lassen. Damit offenbart sich gleich eine große Menge zusätzlicher Informationen. Ist die Gleitreibung nur wenig oder viel geringer als die Haftreibung? Ist der Widerstand gegenüber der Bewegung konstant, der Körper mithin glatt, oder wechselt er wie bei Oberflächenrauigkeit? Dazu besitzen wir in unserer Haut nicht nur die erwähnten langsamen Druckrezeptoren, sondern insbesondere in den Fingerkuppen sogenannte Meissner-Körperchen, die als Geschwindigkeitsrezeptoren bezeichnet werden und vielleicht die wichtigste Komponente unseres Tastsinns darstellen. Sie reagieren nur auf Druckreize, die sich mit Frequenzen von 2–20 Hz ändern wie sie typischerweise beim Gleiten von Haut über Feststoffe auftreten. Langsamere Veränderungen

werden von ihnen nicht mehr gemeldet. Hier helfen uns übrigens die Rillen auf den Fingerkuppen sehr. Damit lässt sich sogar eine zufällige Rauigkeit von einer zyklisch wechselnden regelmäßigen Struktur unterscheiden. Selbst Rauigkeiten im Bereich einiger tausendstel Millimeter werden dabei erfasst.

Doch damit nicht genug. Es gibt in der Unterhaut (Subcutis) auch Rezeptoren, die nur auf Änderungen der Geschwindigkeit eines Reizes reagieren, also auf Beschleunigungen. Diese als Vater-Paccini-Körperchen bekannten Sensoren erkennen besonders leicht Vibrationen. Auch solche entstehen natürlich beim Gleiten von Fingerrillen über unebene Oberflächen. Diese Informationen zur taktilen Wahrnehmung werden über zwei unterschiedliche Systeme (das lemniskale und das extralemniskale System) über verschiedene Relaisstationen (z. B. Hirnstamm und Thalamus) an den somatosensorischen Cortex (der körperfühlenden Großhirnrinde) weitergeleitet. Wie man sieht, verfügen wir also über ein äußerst leistungsfähiges Instrumentarium, um mechanische und manchmal sogar indirekt auch chemische Informationen über berührte Stoffe zu erschließen.

## 2-10

**Molekulare Erkennung.** Molekulare Erkennung ist der wohl wichtigste, allen Lebensprozessen zugrunde liegende Vorgang. Chemiker versuchen, die hochspezifische Erkennung von Molekülform und Verteilung der Oberflächenladungen in sogenannten Molecularly Imprinted Polymers (MIPs) nachzuahmen.



## Riechen und Schmecken

Obwohl das chemische Analyselabor in unserer Nase und Zunge bekanntermaßen nicht die Fähigkeiten einer Hundennase erreicht, verfügt es doch über etwa 350–400 unterschiedliche Rezeptoren zur Unterscheidung von Gerüchen und dutzende unterschiedlicher Geschmacksrezeptoren. Wie funktionieren diese beiden chemischen Nahrinne, die sich bei Säugetieren gegenseitig beeinflussen und teilweise in sich überschneidenden Hirnregionen ausgewertet werden?

### Düfte und andere Gerüche

Zunächst zum Geruchssinn: Er analysiert leichtflüchtige Moleküle in unserer Atemluft. Dazu müssen diese riechbaren Stoffe direkt mit den zuständigen Zellen des Riechepithels (Rieschschleimhaut) unserer Nase in Kontakt kommen. Dies geschieht, indem ein Teil der Luft beim Einatmen an ihnen vorbei geführt wird. Infolge zufälliger Zusammenstöße treffen einige der riechbaren Moleküle auf die unterschiedlichen





Typen von Geruchsrezeptoren in den Zellmembranen des Riechepithels. Abhängig von ihrer äußeren Form und der chemischen Struktur, die sich in unterschiedlichen elektrischen Ladungsverteilungen an der Moleküloberfläche äußert, passen diese Schlüssel unterschiedlich gut zu den Schlössern der Rezeptorproteine (► Abbildung 2-11). Die Schlösser sind komplex gefaltete Proteinmoleküle, die ihre Faltung bei der Interaktion mit einem passenden Stoff ändern und dadurch eine Reizkaskade auslösen, die schließlich ins Gehirn weitergeschaltet wird. Dass beim Menschen einige hundert für unterschiedliche Moleküle klebrige Rezeptoren zur Verfügung stehen, heißt aber nicht, dass wir nur ebenso viele unterschiedliche Gerüche wahrnehmen können. Denn da Moleküle über ganz verschiedene Formen verfügen und dasselbe Molekül gleichzeitig mehrere reaktive Molekülteile besitzen kann, schafft es die Gesamtheit der Rezeptoren sozusagen, die Geruchsmoleküle rundherum abzutasten. Neben der Erkennung ganz spezifischer Substanzen sprechen unsere chemischen Nahsinne auch auf jeweils „ähnliche“ Substanzen an. Diese müssen nicht in jedem Fall eine wirkliche chemische Ähnlichkeit haben, sondern es genügt, wenn sie zur Umkonfiguration derselben Rezeptorproteine führen. Beispielsweise haben Zucker (Saccharose) und Saccharin chemisch kaum Gemeinsamkeiten, werden aber trotzdem beide als süß empfunden.

Manche Substanzen kann man nicht riechen. Praktischerweise gehören dazu alle üblichen Bestandteile der Luft wie Stickstoff und Sauerstoff. Es war offensichtlich in der Evolution wichtig, die Abweichung von einem neutralen Grundzustand detektieren zu können. Ein permanenter Geruch nach Luft wäre genau so wenig hilfreich, wie ein intensiver Geschmack von Wasser oder eine andauernde intensive Farbempfindung bei normalem Tageslicht. Auch Edelgase und das aus dem Erdgas bekannte Methan kann man nicht riechen. Bei ihnen fällt auf, dass es in erster Linie kleine, oft nahezu kugelförmige Moleküle sind, die chemisch nicht sehr reaktiv sind.

Die unterschiedlichen Stärken der Bindung an die Rezeptoren erzeugen im Riechepithel für jeden überhaupt detektierten Stoff ein typisches Aktivitätsmuster, quasi einen Fingerabdruck. So erkennen wir feine Nuancen von angenehmen Blumendüften oder unangenehmen Substanzen, vor denen uns unser Geruchssinn warnt. Wir

können übrigens auch völlig unbekannte Stoffe riechen, denn die Wahrscheinlichkeit ist groß, dass sie zumindest in gewissem Maße mit einigen der zahlreichen Rezeptoren interagieren. Über assoziatives Lernen gelingt es den entsprechenden Teilen der sensorischen Gehirnrinde sogar, viele Substanzen zu klassifizieren. Einige der wahrgenommenen Gruppierungen besitzen übrigens auch klare Entsprechungen im Molekülbau. So haben viele Alkohole eine ähnliche Geruchsnote, während Schwefelverbindungen fast immer fürchterlich stinken.

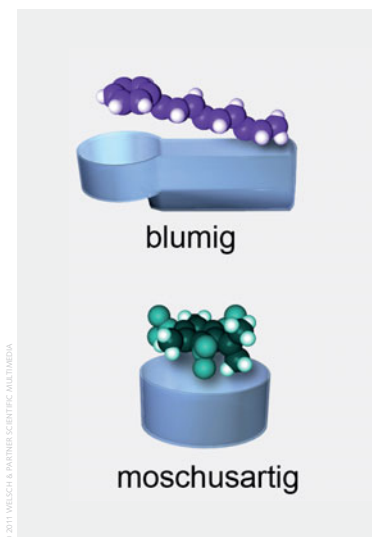
Wäre noch anzumerken: Das Prinzip des Geruchssinns, mit einer begrenzten Anzahl unterschiedlicher Rezeptoren viele Geruchsmoleküle zu erkennen, ist inzwischen auch auf künstlichen „Riechchips“ realisiert worden. Sie erreichen bereits erstaunliche Empfindlichkeiten und können es inzwischen mit einer Hundennase aufnehmen. Sie sind so genau, dass gegenwärtig versucht wird, die typischen Änderungen im Körpergeruch eines Menschen auszuwerten, die mit so unterschiedlichen Krankheiten wie Diabetes oder Lungenkrebs assoziiert sind (► Abbildung 2-10).

## Eine Frage des Geschmacks

Das Schlüssel-Schloss-Prinzip gilt ähnlich für den Geschmackssinn, der sich in erster Linie dadurch vom Geruchssinn unterscheidet, dass die detektierten chemischen Eigenschaften in Flüssigkeit gelöste Moleküle betreffen. Unterscheidbar sind zunächst die klassischen Geschmacksmodalitäten sauer, salzig, süß und bitter. Die ersten beiden Modalitäten detektieren das Vorhandensein eines Protonenüberschusses bzw. einer erhöhten Ionenkonzentration in wässrigen Lösungen.

Süße, typisch für die Stoffklasse der Zucker, wird von eigenen Rezeptoren registriert und weist uns auf energiereiche Nahrung hin. Viele Tiere besitzen ähnliche Süßrezeptoren. Interessanterweise büßte der Süßrezeptor der Katzentiere irgendwann in der Evolution seine Funktionsfähigkeit ein. Sie machen sich deshalb nichts aus süßen Verlockungen.

Der Geschmack bitter ist eine Reaktion auf mehrere unterschiedliche Rezeptorsignale. Die erzeugten neuronalen Impulse werden aber bei Säugetieren nur als Summensignal an das Gehirn weitergeleitet. Dieser Geschmack soll uns vor



### 2-11

**Form und Geruch.** Geruchsrezeptoren erweisen sich als molekulare Bindungsstellen ganz bestimmter Gestalt, in die nur Moleküle mit gewisser Form hineinpassen. Daneben spielen noch Oberflächenladungen und Beweglichkeit der Geruchsmoleküle eine Rolle für die Festigkeit der Bindung.

Lösungen schmecken dann sauer, wenn darin besonders viele an Wassermoleküle gebundene Protonen vorkommen ( $\text{H}_3\text{O}^+$ -Ionen).



giftigen und ungenießbaren Stoffen warnen, denn sehr viele Gifte schmecken bitter. Da diese Substanzen aber teilweise chemisch sehr unterschiedlich aufgebaut sind, ist es nicht verwunderlich, dass mehrere Rezeptortypen zu ihrer Erkennung notwendig sind.

Eine eigene Kategorie darüber hinaus bildet „umami“ (japanisch, Fleisch), der typische würzig-herzhafte Geschmack von Glutamat. Als Abbauprodukt von Proteinen ist er u. a. in Fleischspeisen ausgeprägt. Das Vorhandensein weiterer grundsätzlicher Geschmacksrichtungen wie Calcium„geschmack“ und eventuell Fettgeschmack ist nicht gesichert.

## Hören

Zunächst mag es verwundern, das Gehör mit unterschiedlicher Materie in Verbindung zu bringen. Bei näherer Überlegung kann uns aber auch das Gehör einiges über die Stoffe verraten. Wenn Sie wissen wollten, woraus ein unbekannter Gegenstand besteht, haben Sie sicherlich schon instinktiv mit etwas Hartem dagegen geklopft. Der Klang, den man hört, ist natürlich zum Teil von der äußeren Form abhängig. Trotzdem: Klopfen auf massives Holz klingt definitiv anders als auf Glas. Metalle, Kunststoffe, Stein – alles können wir am Klang meist eindeutig erkennen. Wird ein Körper angestoßen, so schwingen seine Bausteine in komplexer Weise und er gibt ein ganzes Spektrum von Schallwellen ab. Die Mischung unterschiedlicher Tonhöhen erweist sich als typisch für das Material. Wir lernen aus Erfahrung, für diese Materialien ähnliche neuronale Filter zu bilden, wie sie für die Erkennung von Gerüchen existieren. Ähnlich wie man ein Musikinstrument in der Regel auch in Räumen mit verschiedener Form und Akustik wiedererkennt, kann man auch das Grundmaterial unterschiedlich geformter Körper meist heraushören.

Wir wollen es an dieser Stelle nicht weiter vertiefen, aber es sei angemerkt, dass Materialien aus härteren Substanzen im allgemeinen höhere Töne produzieren, während weichere Stoffe wie Holz oder Gummi vorwiegend tiefe Töne erzeugen. In Kapitel 4 werden wir sehen, dass die Härte eines Stoffes eng mit der Festigkeit von Bindungen zwischen den atomaren Bestandteilen der Materie zusammen hängt (► Härte, Seite 201).

## Was können wir prinzipiell verstehen?

Wir haben in diesem Kapitel unsere Wahrnehmung der materiellen Welt untersucht. Zusammenfassend kann man sagen, dass die Antwort auf die im Einleitungstext aufgeworfene Frage, ob wir das alles wirklich verstehen können, bis zu einem gewissen Maße „ja“ lautet. Unsere Fähigkeit, in Modellen zu denken, ist ausgesprochen ausgeprägt und vermutlich angeboren. Trotzdem lassen sich Grenzen erahnen. Beispielsweise mutet uns die grundlegendste aller heutigen physikalischen Theorien, die Quantentheorie, enorm viel zu. So viel, dass sich auf Basis des quantenmechanischen Atommodells wohl niemand ein Atom tatsächlich vorstellen kann, ohne automatisch daneben an trivialere Modelle wie kleine Kugeln zu denken. So ist zu erklären, dass sich Physik- und Chemielehrer sehr schwer tun, ihren Schülern z. B. das intuitiv eingängige aber im Grunde viel zu wenig erklärende Bohrsche Atommodell wieder auszutreiben und durch das wellenmechanische Modell der Quantentheorie zu ersetzen.

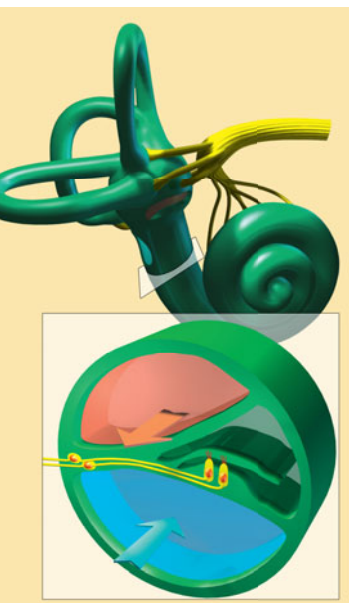
Ähnlich ergeht es uns in kosmischen Dimensionen. In beiden Fällen geht unsere mathematische Fähigkeit zur Modellbildung weit über das intuitiv Vorstellbare hinaus. In seinem 1967 erschienenen Buch *Vom Wesen physikalischer Gesetze* schrieb der geniale Physiker und Mitentwickler der Quantenelektrodynamik RICHARD FEYNMAN (1918–1988):

„Es gab eine Zeit, als Zeitungen sagten, nur zwölf Menschen verstünden die Relativitätstheorie. Ich glaube nicht, dass es jemals eine solche Zeit gab. Auf der anderen Seite denke ich, es ist sicher zu sagen, niemand versteht Quantenmechanik.“

So muss man sich natürlich die Frage stellen, ob es Bereiche gibt, bei denen nicht unsere Sinne die Limitierungen zum Weltverständnis darstellen, sondern die Fähigkeit unseres neuronalen Systems, des Gehirns, ein Modell der Realität zu erfassen. Möglicherweise müssen wir hier auf die weiter fortschreitende Evolution hoffen, oder darauf, dass wir Maschinen mit Möglichkeiten erschaffen können, die über unser menschliches Verständnis hinausgehen. Dies ist vielleicht gar nicht so unmöglich, denn schließlich kann auch ein nur durchschnittlich Schach spielender Programmierer ohne weiteres ein Schachprogramm erstellen, das ihn selbst schlägt. ■

Kurze Wellenlängen entsprechen hohen Tönen, lange tiefen Tönen.

Der (junge) Mensch kann Frequenzen etwa zwischen 16 und 16000 Hz (Schwingungen pro Sekunde) wahrnehmen.



### 2-12

**Cochlea.** Durch den kleiner werdenden Radius der Gehörschnecke (Cochlea) des Innenohrs erfolgt die Aufspaltung der Töne in ein Frequenzspektrum. Gehörzellen registrieren die Schallschwingungen durch mechanische Reizung feiner Fortsätze.



<http://www.springer.com/978-3-8274-1888-3>

Materie

Erde, Wasser, Luft und Feuer

Welsch, N.; Schwab, J.; Liebmann, C.

2013, XIV, 535 S. 884 Abb., 855 Abb. in Farbe.,

Hardcover

ISBN: 978-3-8274-1888-3