

Stephan Frings
Frank Müller



Biologie der Sinne

Vom Molekül
zur Wahrnehmung

SACHBUCH

 Springer Spektrum

Biologie der Sinne

Stephan Frings
Frank Müller

Biologie der Sinne

Vom Molekül zur Wahrnehmung

Prof. Dr. Stephan Frings
Universität Heidelberg
Abteilung für Molekulare Physiologie
Im Neuenheimer Feld 230
69120 Heidelberg
frings@uni-hd.de

Prof. Dr. Frank Müller
Institute of Complex Systems
Zelluläre Biophysik (ICS-4)
Forschungszentrum Jülich
52425 Jülich
f.mueller@fz-juelich.de

ISBN 978-3-8274-2272-9
DOI 10.1007/978-3-8274-2273-6

978-3-8274-2273-6 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Planung und Lektorat: Dr. Ulrich Moltmann; Imme Techentin

Redaktion: Regine Zimmerschied

Zeichnungen: Michal Rössler

Grafikbearbeitung: Dr. Anja Mataruga, Dr. Martin Lay, Breisach a. Rh.

Einbandabbildung: psdesign1; fotolia.com

Einbandentwurf: deblik, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.springer-spektrum.de

Inhaltsverzeichnis

1	Die Sinne – unsere Fenster zur Welt	1
1.1	Wahrnehmung findet im Gehirn statt.	2
1.1.1	Gefangen in der Maskenwelt	2
1.1.2	Das Gehirn, das rätselhafte Organ der Wahrnehmung	2
1.2	Wie kommt die Welt in unseren Kopf?	4
1.2.1	Von der Sinneszelle zur Wahrnehmung	4
1.2.2	Wahrnehmung ist ein Urteilsakt des Gehirns	5
1.3	Sinneswelten	6
1.3.1	Sinneswelt, die erste!	6
1.3.2	Sinneswelt, die zweite!	7
1.3.3	Sinneswelt, die dritte!	8
1.4	Vom Sinn der Sinne	9
2	Die Evolution der Sinne	11
2.1	Die Sinne des Menschen und wie er dazu kam.	12
2.1.1	Wie viele Sinne hat der Mensch?	12
2.2	Die Evolution der Sinne	14
2.2.1	Die Evolution ist der Motor für die Weiterentwicklung des Lebens.	14
2.2.2	Das Prinzip der Zucht – die künstliche Auswahl	16
2.2.3	Das Prinzip der Evolution – die natürliche Auslese	17
2.2.4	Die Eigenschaften unserer Sinnessysteme und die Verarbeitungsstrategien unseres Gehirns sind ein Produkt der Evolution	19
2.2.5	Kinder der Evolution.	24
2.2.6	»Wer hat's erfunden?«	25
2.3	Jeder auf seine Art – die Leistungen unserer Sinne sind höchst unterschiedlich	26
2.3.1	Zwei Sinne im Vergleich	26
2.3.2	Vom Sinnesreiz zum Verhalten	29
	Literatur.	30
3	Die Sprache der Nervenzellen – und wie man sie versteht	31
3.1	Labor eines Neurowissenschaftlers.	32
3.2	Labor 1: Die wunderbare Welt der Nervenzelle	34
3.2.1	Nervenzellen sind die Funktionseinheiten des Gehirns	34
3.2.2	Aufbau einer Nervenzelle	34
3.2.3	Was macht die Nervenzelle zur Nervenzelle?	38
3.2.4	Warum können Nervenzellen Signale übertragen?	41
3.3	Labor 2: Von Ionen und Membranen – wie Nervenzellen eine elektrische Spannung aufbauen	41
3.3.1	Ionen sind die Grundlage für elektrische Signale in Nervenzellen	41
3.3.2	Ionenpumpen bauen Unterschiede zwischen dem Inneren der Zelle und ihrer Umgebung auf.	43
3.3.3	Ionenkanäle sind elektrische Schalter in der Zellmembran	44
3.4	Labor 3: Aktionspotenziale sind die Sprache unseres Nervensystems.	46

3.4.1	Die Membranspannung spiegelt die Aktivität einer Nervenzelle wider	46
3.4.2	Aktionspotenziale leiten Signale über lange Strecken	48
3.5	Labor 4: Wie Nervenzellen Information austauschen	52
3.5.1	Synapsen übertragen die Information chemisch	52
3.6	Labor 5: Wie man mit Nervenzellen einen Hochleistungsrechner baut	56
3.6.1	Die Grundlagen des neuronalen Rechnens: Konvergenz und Divergenz, Erregung und Hemmung	56
3.6.2	Der Rechner in der Nervenzelle	59
3.6.3	Die schreckhafte Maus oder die Rückwärtshemmung als Notbremse	61
	Literatur	62
4	Von der Sinneszelle zum Gehirn	63
4.1	Vom Reiz zum elektrischen Signal – die Signalwandlung	64
4.1.1	Eine komplizierte Aufgabe	64
4.1.2	Sinneszellen besitzen ein spezialisiertes Außensegment	64
4.1.3	Die einfachste Art der Signalwandlung: Rezeptor und Ionenkanal sind in einem Protein zusammengefasst	65
4.1.4	Signalwandlung mit dem Baukastensystem – die G-Protein-gekoppelte Signalkaskade. ...	66
4.2	Adaptation	69
4.2.1	Sinneszellen passen sich an die Umgebung an – sie adaptieren	69
4.3	Codierung der Sinnesinformation	71
4.3.1	Sinnesreize werden in der Abfolge von Aktionspotenzialen codiert und an das Gehirn geschickt	71
4.4	Die geordnete Verschaltung der Sinnesinformation	72
4.4.1	Ordnung im Strom der Sinnesinformation	72
4.4.2	Ordnung auf höchster Ebene – die topografische Abbildung	73
4.4.3	Die Sinnesinformation wird gefiltert	74
	Literatur	75
5	Schmecken	77
5.1	Vom Sinn des Schmeckens	78
5.2	Geschmackszellen überprüfen die Nahrung	79
5.3	Sauer und salzig: Ionenkanäle auf der Zunge	81
5.4	Bittere Gifte	84
5.5	Köstlicher Geschmack: Süß und umami	87
5.6	Der »Scharfgeschmack« ist eigentlich ein Schmerzreiz	89
5.7	Die Geschmacksempfindung	90
5.8	Andere Lösungen	92
	Literatur	93
6	Riechen	95
6.1	Die Vielfalt der Gerüche ist grenzenlos	96
6.2	Riechzellen in der Nase detektieren Duftstoffe	97
6.3	Im Gehirn entstehen Geruchsbilder	102
6.4	Bleib jung! Das Riechsystem erneuert sich selbst	105
6.5	Das Riechen mit Zilien	106
6.6	Pheromone organisieren das Sozialleben	108

6.7	Was uns an Gerüchen interessiert	113
6.8	Leben, ohne zu riechen.	115
	Literatur.	116
7	Sehen	117
7.1	Augen auf – und dann?	119
7.1.1	Ball, Satz und Sieg!	119
7.1.2	Betrachten wir die Sache mit dem Sehen mal bei Licht	119
7.1.3	Was wir in diesem Kapitel sehen werden	122
7.1.4	Was ist eigentlich Licht?	123
7.2	Das Auge.	124
7.2.1	»Ich seh dir in die Augen, Kleines!«	124
7.2.2	Auf den ersten Blick ähnelt unser Auge einer Kamera.	126
7.2.3	Nur im winzigen Zentrum unseres Bildfeldes sehen wir wirklich scharf	129
7.2.4	Die Verteilung der Photorezeptoren erfolgt als Anpassung an die Lebensweise	133
7.2.5	Wer hat die schärfsten Augen?	134
7.3	Wie unsere Photorezeptoren Licht in die Sprache des Nervensystems übersetzen – die Phototransduktion	136
7.3.1	Das Außensegment ist die lichtempfindliche Antenne des Photorezeptors	136
7.3.2	Der erste Schritt beim Sehen: Ein Farbstoffmolekül im Photorezeptor absorbiert das Lichtquant	138
7.3.3	Die elektrische Lichtantwort unserer Photorezeptoren ist außergewöhnlich	139
7.3.4	Unsere Photorezeptoren – die etwas anderen Zellen	141
7.3.5	Ein Stäbchen kann zwar auf ein Lichtquant reagieren, wahrnehmen können wir ein einzelnes Lichtquant aber nicht	143
7.3.6	Besser als jeder fotografische Film: Die Anpassungsleistung der Netzhaut	144
7.3.7	Immer in Bewegung bleiben – wie Mikrosakkaden unsere Wahrnehmung stabilisieren.	146
7.4	Farbsehen	148
7.4.1	Drei Sehpigmente in den Zapfen ermöglichen uns das Farbsehen	148
7.4.2	Die trichromatische Theorie der Farbwahrnehmung	151
7.4.3	Farbsehstörungen	151
7.4.4	Die Evolution des Farbsehens	153
7.5	Die Retina – der Rechner im Auge	155
7.5.1	Die Netzhaut besteht nicht nur aus Photorezeptoren	155
7.5.2	Die Information wird im retinalen Netzwerk weiterverarbeitet	157
7.5.3	Die Sprache der Ganglienzellen	158
7.5.4	Vorteil eins: Objektrennung durch Kontrastverschärfung!	160
7.5.5	Vorteil zwei: Die Informationsflut wird reduziert.	162
7.5.6	Vorteil drei: Unabhängig werden von der Beleuchtung	163
7.5.7	Wie die Antwort im Zentrum des rezeptiven Feldes erzeugt wird.	166
7.5.8	Wie die Retina durch laterale Hemmung rezeptive Felder erzeugt	167
7.5.9	Ganglienzellen sind neuronale Filter.	169
7.5.10	Auf ins Gehirn!	172
7.6	Eine Reise durch das Sehsystem	173
7.6.1	Von der Retina bis zur primären Sehrinde	173
7.6.2	Die Sehrinde ist hochorganisiert	175
7.6.3	Die meisten rezeptiven Felder in der primären Sehrinde reagieren auf Kanten und Linien	176

7.6.4	Jenseits der primären Sehrinde	179
7.6.5	Der dorsale Pfad: Die Wo-wie-wohin-Bahn	180
7.6.6	Der ventrale Pfad: die Was-Bahn	181
7.6.7	Wo, bitte, geht's zur Großmutterzelle?	182
7.6.8	Andere Lösungen: Komplexaugen	186
	Literatur	188
8	Hören	189
8.1	Bei Nacht im Kreidewald	190
8.2	Schall hören	191
8.2.1	Von der Schallquelle in das Ohr	191
8.2.2	Die Vielfalt des Hörens: Töne, Klänge, Geräusche	192
8.3	Cochlea – die tonotope Hörschnecke	194
8.3.1	Resonanz und Wanderwellen	194
8.3.2	Aufbau der Cochlea	195
8.3.3	Der Verstärker des Corti-Organes	196
8.3.4	Innere Haarzellen – empfindlicher geht es nicht	198
8.3.5	Die mechanoelektrische Transduktion	202
8.3.6	Haarzellen übertragen ihr Signal auf Nervenfasern	204
8.4	Unsere Hörwelt	206
8.4.1	Schallortung	206
8.4.2	Die Wahrnehmung von Sprache	210
8.4.3	Musik – der direkte Weg zur Emotion	214
8.5	Die Hörwelt der anderen: Echoortung	216
8.5.1	»Sehen mit den Ohren«	216
8.5.2	Die Kunst der Echoortung	218
8.5.3	Angewandte Physik – die Fledermaus nutzt den Dopplereffekt	221
8.6	Andere Lösungen: Mit den Knochen hören	223
	Literatur	226
9	Orientierung und Navigation	227
9.1	Wo bin ich?	228
9.2	Die Orientierung an chemischen Signalen	229
9.3	Visuelle Orientierung	231
9.3.1	Sonne und Polarstern dienen als Orientierungshilfe	231
9.3.2	Die Detektion von polarisiertem Licht	233
9.4	Der magnetische Kartensinn	236
9.4.1	Das Magnetfeld der Erde	236
9.4.2	Magnetsinn bei Vögeln	240
	Literatur	247
10	Tasten und Fühlen	249
10.1	Unsere Haut	250
10.2	Tasthaare	252
10.3	Schmerz – Warnung und Leid	254
10.4	Kälte, Wärme, Infrarot	264
	Literatur	268

11	Unsere Innenwelt	269
11.1	Regelkreise organisieren den Körper	270
11.2	Muskelspindeln	271
11.3	Der Gleichgewichtssinn	273
11.4	Ausleuchtung der Innenwelt: Die Endorezeptoren	276
	Literatur	278
12	Wahrnehmung	279
12.1	Was ist Wahrnehmung?	281
12.1.1	Der erste Schritt: Wahrnehmung ist indirekt – unser Gehirn muss die Umwelt deshalb rekonstruieren	281
12.1.2	Der zweite Schritt zur Wahrnehmung: Die Rekonstruktion unserer Umwelt erfolgt nicht „wertfrei“ – unser Gehirn stellt eine Hypothese über die Umwelt auf	283
12.2	Prinzipien der Objekterkennung	285
12.2.1	Das Gehirn nutzt zur Wahrnehmung von Objekten einfache Prinzipien	285
12.3	Trennung von Objekt und Hintergrund	289
12.3.1	Unser Gehirn „übertreibt“ beim Trennen von Objekt und Hintergrund	289
12.3.2	Wettstreit der Strategien	289
12.3.3	Scheinkonturen – wir sehen etwas, das gar nicht ist	292
12.4	Wahrnehmung von Bewegung	293
12.4.1	Bewegung ist einer der wichtigsten Parameter in einer belebten Umwelt	293
12.4.2	Wer bewegt sich – du oder ich?	293
12.5	Wahrnehmung von Tiefe	296
12.5.1	Wie erzeugt unser Gehirn eine dreidimensionale Wahrnehmung aus einem zweidimensionalen Retinabild?	296
12.5.2	Auch ein zweidimensionales Bild kann Tiefeninformation enthalten	296
12.5.3	Erst das Sehen mit zwei Augen erlaubt die optimale Tiefenwahrnehmung	297
12.5.4	Die Wunderwelt des Stereogramms	300
12.5.5	Zufallspunktbilder – Tiefe aus dem Rauschen	301
12.5.6	Das Pulfrich-Pendel – oder: Täuschung ist die Wahrnehmung einer falschen Hypothese ...	304
12.6	Wahrnehmung von Größe	306
12.6.1	Das Prinzip der Größenkonstanz – damit aus Riesen keine Zwerge werden	306
12.6.2	Wenn Kugeln wachsen und schrumpfen – Größenkonstanz beim Pulfrich-Pendel	308
12.7	Wettstreit der Sinne, Körpertauch, Magie und andere Illusionen	309
12.7.1	Das Gehirn sucht aktiv nach Information	309
12.7.2	Wahrnehmung ist ein Erinnerungsprozess	310
12.7.3	Zur lückenlosen, geordneten Wahrnehmung muss das Gehirn unser Zeitempfinden bei der Wahrnehmung manipulieren	311
12.7.4	Unser Gedächtnis ist die tragende Säule unserer Wahrnehmung	312
12.7.5	»Blinde hören besser als Sehende« – Mythos oder Wirklichkeit?	314
12.7.6	Ist die Wahrnehmung des eigenen Körpers auch nur ein Konstrukt unseres Gehirns?	316
12.7.7	Wahrnehmung ist abhängig von unserer Aufmerksamkeit	318
12.7.8	Selektive Aufmerksamkeit führt zur Blindheit für andere Reize	318
12.7.9	Aufmerksamkeit verändert die Physiologie des Gehirns	319
12.7.10	Wahrnehmungsexperten der besonderen Art	321
12.7.11	Im Gleichschritt zur Wahrnehmung	322
12.7.12	Was wir von Patienten mit Wahrnehmungsstörungen lernen können	324
	Literatur	326

13	Anhang	327
13.1	Herstellung von Masken	328
13.2	Die versteckte Maus	328
13.3	Die Täuschung nach Koffka	328
13.4	Suchbilder	328
13.5	Gedankenlesen aus der Ferne	328
	Glossar	333
	Stichwortverzeichnis	345

Die Sinne – unsere Fenster zur Welt

1.1 Wahrnehmung findet im Gehirn statt – 2

1.1.1 Gefangen in der Maskenwelt – 2

1.1.2 Das Gehirn, das rätselhafte Organ der Wahrnehmung – 2

1.2 Wie kommt die Welt in unseren Kopf? – 4

1.2.1 Von der Sinneszelle zur Wahrnehmung – 4

1.2.2 Wahrnehmung ist ein Urteilsakt des Gehirns – 5

1.3 Sinneswelten – 6

1.3.1 Sinneswelt, die erste! – 6

1.3.2 Sinneswelt, die zweite! – 7

1.3.3 Sinneswelt, die dritte! – 8

1.4 Vom Sinn der Sinne – 9

Nichts ist für uns normaler, als unsere Sinne jederzeit zu benutzen. Sie begleiten nicht nur unser Leben, sie bestimmen es sogar wesentlich mit, denn alles, was wir wissen, alles, was wir erfahren haben, wurde uns von unseren Sinnen vermittelt. Unsere Sinne funktionieren so effizient und schnell, dass wir uns normalerweise nie Gedanken darüber machen, wie sie ihre Aufgabe erledigen – und das heißt, wie wir uns eigentlich in der Welt zurechtfinden. Und doch lohnt es sich, gerade darüber nachzudenken. Gewinnen wir dabei doch weniger Erkenntnis über die Welt als vielmehr über uns selbst. Wie kommt das Wissen über die Welt in unseren Kopf? Welche Sinne nutzen wir dafür? Wie funktionieren sie? Was fängt unser Gehirn mit der Sinnesinformation an? Nach welchen Kriterien entscheidet es, was zu tun ist? Wie unterscheiden sich unsere Sinne von denen der Tiere? Wenn Sie Antworten auf diese spannenden Fragen möchten, folgen Sie uns auf eine Reise durch die Welt der Sinne.

1.1 Wahrnehmung findet im Gehirn statt

1.1.1 Gefangen in der Maskenwelt

Ein Moment der Unachtsamkeit reichte, um das Leben von Thomas Braun radikal und für immer zu verändern. Es geschah auf der Baustelle, auf der Thomas Braun arbeitete. Die Ladung des Krans war schlecht gesichert und löste sich. Thomas Braun wurde durch einen herabstürzenden Balken getroffen, und sein Schutzhelm wurde heruntergerissen. Bei dem Unfall verletzte sich Thomas Braun schwer am Kopf. Es kam zu Blutungen im Gehirn und zu Schädigungen der Großhirnrinde im rechten und linken Schläfenlappen. Als Thomas Braun nach langer Zeit das Bewusstsein wiedererlangte und seine Frau an das Krankenbett trat, zögerte sie einen Moment, denn sie war sich nicht ganz sicher, was sie erwartete. Würde ihr Mann sprechen können, würde er wissen, was passiert war? Was sie sofort irritierte, war, dass ihr Mann sie zwar ansah, aber keinerlei Reaktion zeigte. Erst als sie ihn ansprach, sagte er: »Ach, Du bist es.« Im Gespräch zeigte er sich nicht nur deprimiert, sondern auch etwas benommen. Er sähe alles irgendwie verschwommen und unklar,

aber die Ärzte meinten, das könnte sich nach einiger Zeit auch wieder legen. Sein Sehvermögen erholte sich nach und nach. In den Sehtests konnte er selbst kleine Objekte und Buchstaben erkennen, konnte Farben unterscheiden und bewegten Objekten problemlos mit den Augen folgen. Alles wäre normal erschienen, hätte sein Sehvermögen nicht bei einer ganz bestimmten Aufgabe versagt: Thomas Braun konnte keine Gesichter mehr erkennen.

Wenn eine Krankenschwester den Raum betrat, wusste er nie, welche der Stationsschwestern es war. Schlimmer noch: Er erkannte selbst die Menschen nicht mehr, mit denen er seit vielen Jahren aufs engste verbunden war: seine Frau und seine beiden Töchter. Es wurde schnell klar, dass es sich nicht um ein Gedächtnisproblem handelte. Thomas Braun hatte weder seine Familie noch seine Freunde vergessen. Er erkannte seine Frau, seine Töchter und Freunde an der Stimme, an bestimmten persönlichen Verhaltensweisen und Bewegungen oder auch an der Kleidung. Er erinnerte sich an alle Begebenheiten, die sie zusammen erlebt hatten. Er sah Augen, Nase und Mund in ihren Gesichtern. Er sah, dass alle Menschen um ihn herum Gesichter hatten – aber diese Gesichter hatten ihre persönliche Individualität verloren. Sie waren nicht mehr identifizierbar – unpersönlich wie Masken.

1.1.2 Das Gehirn, das rätselhafte Organ der Wahrnehmung

Auch wenn die Geschichte unseres Herrn Braun erfunden ist, die Krankheit, Gesichter nicht erkennen zu können, existiert. Man spricht von Gesichtsbblindheit oder Prosopagnosie (mehr dazu finden Sie in ► Kap. 7 und 12). Sie kann wie in unserem Beispiel nach Gehirnschädigungen auftreten, die durch Schlaganfälle, Tumore oder Verletzungen ausgelöst wurden. Wie kann man eine so unvorstellbare Krankheit erklären? Wie kann es sein, dass die Augen eines Menschen vollkommen perfekt funktionieren, er eine ganz normale Sehschärfe hat, problemlos lesen kann, Objekte des Alltags erkennt, ein Auto durch den Großstadtverkehr bewegen kann, ohne einen Unfall zu verursachen, aber bei einer so »einfachen« Aufgabe versagt, das Gesicht eines Verwandten oder Bekannten zu erken-



■ **Abb. 1.1** Im Laufe unseres Lebens lernen wir Hunderte oder Tausende von Menschen kennen. Normalerweise fällt es uns leicht, jeden Einzelnen an seinem Gesicht zu erkennen. (privat und © Cheryl E. Davis/ shutterstock, © fotofrankyat/ photos.com, © olly/ fotolia.com, © Sutayagin/ shutterstock, © ForsterForest/ photos.com, © Anja Mataruga, Forschungszentrum Jülich)

nen? Etwas, was wir alle ständig und »nebenbei« im Bruchteil einer Sekunde erledigen (■ Abb. 1.1).

Die Antwort ist simpel: Die Aufgabe, Gesichter zu erkennen, ist alles andere als einfach. Bis heute tun sich Computer schwer damit, Gesichter zu identifizieren. Wenn wir das »so nebenbei erledigen«, heißt das nicht, dass der Vorgang einfach ist. Es bedeutet nur, dass die Vorgänge in unserem Gehirn, die unserer Wahrnehmung zugrunde liegen, im Normalfall so schnell und effizient erfolgen, dass wir sie nicht bemerken. In Wirklichkeit liegt dem Erkennen von Gesichtern ein komplizierter Prozess zugrunde, in dem eine Fülle von Informationen ausgewertet werden muss. Uns wird erst dann klar, dass es diesen neuronalen Auswerteprozess geben muss, wenn er ausgefallen oder gestört ist und das Gesichtererkennen nicht mehr funktioniert – so wie im Fall von Thomas Braun. Die Tatsache, dass Thomas Braun sehr spezifisch nur beim Erkennen von

Gesichtern Probleme hatte, nicht aber bei anderen visuellen Aufgaben, zeigt uns auch, dass Wahrnehmungsprozesse auf verschiedenen Ebenen erfolgen.

Aber wie? Viele Menschen glauben, um sehen zu können, würde es ausreichen, die Augen zu öffnen. Dann – so die Vorstellung – entsteht ein Bild der Umwelt auf der Netzhaut, wo es in Nervenimpulse umgewandelt und über den Sehnerv an das Gehirn geschickt wird. Aus den Nervenimpulsen entsteht wie auf einer Kinoleinwand ein neues Bild im Gehirn, das dann irgendwie analysiert wird. Dieses Modell scheitert an einer einfachen Frage: Wer soll das Bild analysieren? Wir haben kein kleines Männchen im Gehirn, das diese »Leinwand« betrachten könnte. Und wäre dies der Fall, dann würden wir das Problem der Bildanalyse von unserem Sehsystem lediglich in das Sehsystem des Männchens verlagern. Nein, Sehen erfolgt anders, und der Weg vom Lichtreiz zur Wahrnehmung ist kompliziert.

Das Gehirn muss beim Sehen eine gigantische Informationsflut bearbeiten. Auf der Netzhaut entsteht ein komplexes Mosaik aus Millionen von Bildpunkten, und das Gehirn muss herausfinden, welche der Mosaikbausteine zueinander gehören und ein Objekt ergeben. Das Gehirn muss Größe, Form und Farbe von Bildpunkten, ihre Lage, Entfernung und Bewegung relativ zueinander und zu uns auswerten. Weil diese Auswertung so komplex ist, haben sich verschiedene Gehirnareale darauf spezialisiert, jeweils nur bestimmte Aspekte unserer Umwelt zu bearbeiten: Farbe, Bewegung, Objekte oder Gesichter.

Die Tatsache, dass Gesichter eine besondere Stellung im Katalog der Objekte einnehmen, denen wir im Alltag begegnen, ist leicht verständlich. Wir sind soziale Lebewesen und leben mit anderen Menschen in einer Gemeinschaft zusammen. Es sind die Gesichter, die andere Individuen eindeutig erkennbar machen. In der Entwicklung der Menschheit wurde es deshalb besonders wichtig, Gesichter erkennen und analysieren zu können. Durch das Gesichtererkennen konnten unsere Vorfahren Mitglieder der eigenen Gruppe von Fremden unterscheiden – Freund von Feind. Das blitzschnelle Erkennen des Gesichtsausdrucks konnte lebensrettend sein, wenn man der Attacke eines aggressiv dreinblickenden Zeitgenossen rechtzeitig aus dem Weg gehen wollte. Es wundert deshalb nicht, dass Teile unseres Gehirns sich besonders der Aufgabe widmeten, Gesichter und Mimik zu erkennen. Bei Thomas Brauns Unfall wurde ein Teil dieser Auswertemaschinerie in seinem Gehirn zerstört. So kam es zu diesem charakteristischen, sehr selektiven Funktionsausfall, der Prosopagnosie.

1.2 Wie kommt die Welt in unseren Kopf?

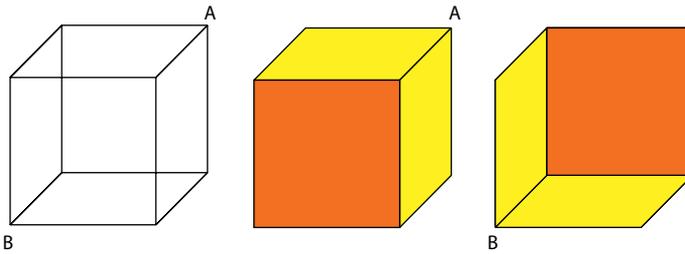
1.2.1 Von der Sinneszelle zur Wahrnehmung

Um zu verstehen, was bei Menschen wie Thomas Braun passiert, müssen wir wissen, mit welcher Art von Information unsere Sinnesorgane das Gehirn versorgen und wie verschiedene Gehirnareale

miteinander kommunizieren. Dies funktioniert im Prinzip ähnlich wie die Kommunikation zwischen Menschen.

Nehmen wir an, wir möchten einen Freund wissen lassen, was auf einem bestimmten Bild zu sehen ist, können ihm aber keine Kopie davon schicken. Kein Problem, für solche Zwecke haben wir die Sprache entwickelt. Wenn wir ihm das Bild am Telefon oder in einem Brief beschreiben, kann er sich eine Vorstellung davon machen, was darauf zu sehen ist. Wir verwenden dazu einen Code, die Sprache. Die Elemente dieses Codes, die einzelnen Wörter, haben keinerlei Ähnlichkeit mit den Objekten auf dem Bild. Es sind lediglich Symbole dafür. Wir codieren die Information, der Empfänger decodiert sie wieder. Eine ähnliche Codierungsarbeit leisten auch unsere Sinne. Sie benutzen zwar keine Worte, aber dafür einen anderen Code, den des Nervensystems. Die Aufgabe des Gehirns besteht darin, diesen Code zu decodieren und die Information herauszulesen.

Um zu verstehen, was unserer Wahrnehmung zugrunde liegt, müssen wir also ganz am Anfang anfangen – bei den Sinneszellen in unseren Augen, Nasen und Ohren. Wir wollen in diesem Buch zeigen, wie Sinnes- und Nervenzellen funktionieren, wie Sinneszellen auf Reize reagieren und sie in die Sprache des Nervensystems übersetzen. Wir werden uns ansehen, wie die Information in das Gehirn weitergeleitet wird, wie sie dort analysiert und verarbeitet wird. Schon jetzt müssen wir Sie vorwarnen, denn das, was Sie dabei entdecken werden, könnte Sie irritieren: Ihre Sinnesorgane sind alles andere als nüchterne und neutrale Beobachter, deren Ziel es ist, Ihnen die Wirklichkeit objektiv und genau zu präsentieren. Vielmehr führt die Arbeitsweise Ihrer Sinnes- und Nervenzellen dazu, dass Ihr Gehirn Sie anlügt, immer und immer wieder. Es lügt Sie an, um Ihnen genau die Information zu geben, die Sie in einer bestimmten Situation brauchen. Dies mag zunächst widersprüchlich oder verwirrend klingen. Keine Sorge, der scheinbare Widerspruch wird sich auflösen, wenn wir uns in den folgenden Kapiteln ansehen, wie die Evolution die Arbeitsweise unserer Sinne formte und warum sie deshalb so und nicht anders funktionieren.



■ **Abb. 1.2** Der Necker-Würfel ist eine sogenannte Kippfigur. Unser Gehirn kann seine dreidimensionale Struktur auf mehrere Arten interpretieren. Da es sich nicht entscheiden kann, ändert es immer wieder, meist im Abstand von mehreren Sekunden, seine Interpretation. Dabei kippt jedes Mal unsere Wahrnehmung. Wahrnehmung ist ein Entscheidungsakt des Gehirns. (© Anja Mataruga, Forschungszentrum Jülich)

1.2.2 Wahrnehmung ist ein Urteilsakt des Gehirns

Aber allein das Studium der Sinnes- und Nervenzellen und das Entschlüsseln eines Codes reichen nicht aus, um Wahrnehmung zu verstehen. Wir müssen auch die Seite des Empfängers betrachten, denn Wahrnehmung ist viel mehr als nur eine Reaktion auf einen Sinnesreiz. Jedes Mal, wenn der Arzt mit seinem Hämmern auf die Sehne unterhalb unserer Kniescheibe schlägt, schnellert der Unterschenkel reflektorisch nach vorn. Dieser Patellarsehnenreflex ist eine einfache Reaktion unseres Nervensystems auf einen Sinnesreiz – gleicher Reiz, gleiche Reaktion. Wäre Wahrnehmung ebenfalls nur eine einfache Reaktion, müsste ein gleich bleibender Reiz auch immer die gleiche Wahrnehmung auslösen. Dies ist aber nicht der Fall, wie ■ **Abb. 1.2** zeigt.

Der in ■ **Abb. 1.2** dargestellte schematische Würfel wird auch Necker-Würfel genannt. Der Schweizer Kristallograf Louis Albert Necker de Saussure entdeckte ein interessantes Phänomen, als er Kristalle studierte. Schauen Sie diesen Würfel eine Zeit lang ganz ruhig an. Die meisten Betrachter können die dreidimensionale Struktur des Würfels auf zwei Arten wahrnehmen: entweder so, dass die Ecke A nach hinten zeigt (wie in der mittleren Abbildung), oder so, dass die Ecke B hinten ist (rechte Abbildung). Dabei springt die Wahrnehmung zwischen diesen möglichen Zuständen hin und her. Die Information in der linken Abbildung reicht nicht aus, um die Ausrichtung des Würfels im Raum eindeutig festzulegen. Das Gehirn ana-

lysiert die Daten, die unsere Augen liefern, und interpretiert sie. Es fällt aufgrund der unzureichenden Datenlage das Urteil, dass Ecke A hinten ist. Genau so nehmen wir den Würfel auch wahr. Dann analysiert es die Daten erneut und fällt ein anderes Urteil: Es könnte auch Ecke B hinten sein. Und schon hat sich unsere Wahrnehmung verändert! Diese »Urteilsverkündungen« wiederholen sich immer wieder, oft im Takt von etwa drei Sekunden. Blinzeln mit den Augen oder eine Augenbewegung können das Fällende eines neuen Urteils auslösen.

Wir wollen dieses Phänomen an dieser Stelle nicht weiter ergründen, sondern nur zwei wichtige Tatsachen festhalten: Der eigentliche Sinnesreiz ändert sich nicht – trotzdem kippt jedes Mal unsere Wahrnehmung zugunsten des neu gefällten Urteils. Selbst bei einem so einfachen Objekt wie dem Necker-Würfel hängt unsere Wahrnehmung entscheidend davon ab, wie unser Gehirn die Daten interpretiert. Wir können also erwarten, dass bei komplexeren Objekten und Ereignissen die Wahrnehmung noch stärker von der Interpretation durch unser Gehirn abhängen wird. Und: Zu jedem Zeitpunkt können wir den Würfel nur auf die eine oder die andere Weise sehen. Ein Urteil schließt das andere in der Wahrnehmung aus. Wahrnehmung ist ein Entscheidungsakt des Gehirns.

Lassen Sie uns nun nach diesen einleitenden Gedanken gemeinsam aufbrechen zu unserer Reise durch die faszinierende Welt der Sinne. Wir beginnen unsere Reise in einem Einfamilienhaus in einer kleinen Vorstadtsiedlung. Hier schauen wir uns zunächst einmal an, wozu Sinnesorgane fähig sind.

1.3 Sinneswelten

1.3.1 Sinneswelt, die erste!

Hans Schneider stellt gerade die Sinfonie etwas lauter. Diese Stelle, an der die Holzbläser einsetzen und das Thema von Dur nach Moll wechselt, liebt er besonders. Er schwenkt ein großvolumiges Glas mit Rotwein, bevor er es prüfend gegen das Licht hält. »Was für ein Rot!«, murmelt er. Er führt die Nase dicht über das Glas und atmet tief ein (▣ Abb. 1.3), bevor er einen Schluck von dem Rotwein nimmt und ihn vorsichtig im Mund hin- und herbewegt. Dann atmet er langsam durch die Nase aus, hält kurz inne und lässt den Wein in kleinen Schlucken die Kehle hinunterrinnen. »Dieser Cabernet Sauvignon ist viel besser als der letzte! Dieser fruchtige Körper! Ich erkenne schwarze Johannisbeere, Heidelbeere und einen Anklang von Erdbeere«, sagt er mit Kennermiene. »Angenehmer Abgang, wenig Säure, ideal zu Fleisch und den Rosmarinkartoffeln!« Seine Frau Claudia schmunzelt. Das teure Weinkundeseminar blieb anscheinend nicht ohne Auswirkungen. »Ich bin gleich so weit«, sagt sie, überfliegt schnell das Rezept und gibt dann noch etwas Cognac und eine Prise Cayennepfeffer an die Sauce. Als sie die Schüssel mit den Kartoffeln anfasst, murmelt sie: »Aber die müssen noch mal in die Mikrowelle, die sind kalt geworden.«

Ist das nicht eine eindrucksvolle Demonstration menschlicher Sinnesleistung? Das Gehör kann nicht nur die verschiedenen Instrumente eines Sinfonieorchesters identifizieren. Es erkennt aus ihrem Zusammenklang auch komplexe Harmonien, die in uns Gefühle von Glück, aber auch Melancholie auslösen können. Die Temperatur der Speisen wird schnell abgeschätzt, indem man mit der Hand die Schüssel berührt. Für die Sauce werden die Aromen eines Cognacs raffiniert mit duftenden Kräutern und Gewürzen kombiniert. Als besonderer »Nervenkitzel« dient die Prise einer Substanz, die Schmerzzellen in der Mundhöhle reizt (es handelt sich dabei um das Capsaicin aus dem Cayennepfeffer). Der Geschmacks- und der Geruchssinn werden kombiniert, um das Bouquet aus Hunderten von Inhaltsstoffen in zwei verschiedenen Weinen zu vergleichen – wobei das Aroma einer der beiden Flaschen nur noch aus der Erinnerung heraus abgerufen werden kann! In der Tat erbringen professionelle Weinverkoster dabei er-

staunliche Leistungen. Und schließlich erfordert das Lesen des Kochrezepts die scharfe Abbildung der Buchstaben auf der Netzhaut des Auges, die Analyse ihrer komplexen Formen und ihrer Abfolge, den Vergleich mit gespeicherten Buchstabenfolgen usw.

So wichtig all diese Schritte für das Ehepaar Schneider sein mögen, um sich auf ihr Abendessen vorzubereiten, so eindrucksvoll die Leistung auch anmutet – sie hat nichts mit der ursprünglichen biologischen Funktion der Sinne zu tun. Unsere Sinnesorgane wurden nicht dazu entwickelt, einen Pinot Noir von einem Cabernet Sauvignon zu unterscheiden oder beim Klang einer Mozartsinfonie alles um uns herum zu vergessen. Natürlich ist es wunderbar, dass wir all das können, und es zeugt von der enormen Leistungsfähigkeit unserer Sinne, aber dafür war das Ganze nie gedacht. Alle Organismen auf unserer Erde, auch wir, sind das Produkt einer langen Evolution. Über viele Millionen von Jahren hinweg entwickelten die Organismen Sinnesorgane zu einem einzigen Zweck – um die Überlebenschancen des Organismus und seiner Art zu verbessern. Überleben heißt auf den Punkt gebracht: Nahrung, Gefahrenquellen und Fortpflanzungspartner erkennen zu können und mit dem entsprechenden Verhalten darauf zu reagieren. In unserer hochtechnisierten und weitgehend abgesicherten Welt klingt so eine Aussage vielleicht unangemessen, und manchem »vergeistigten« Zeitgenossen erscheint sie möglicherweise auch »zu biologisch«. Dennoch entspricht sie der Wahrheit. Wir modernen Menschen haben unsere Sinne von unseren wilden Ahnen geerbt, und die sogenannten Naturvölker setzen sie auch heute noch für die gleichen Zwecke ein wie unsere Vorfahren vor Tausenden von Jahren.

Wir Angehörigen der westlichen Zivilisationen leben in einer hochtechnisierten Umwelt und nutzen unsere Sinne meist für Zwecke, die wenig mit der ursprünglichen biologischen Funktion zu tun haben. Wir müssen keine wilden Löwen mehr erspähen, die sich im hohen Gras verstecken. Stattdessen starren viele von uns stundenlang auf Computermonitore. Wir müssen nicht mehr all unsere Sinne aufbieten, um unsere Nahrung mühsam im Wald zu suchen – wir finden sie sorgsam aufgereiht im Supermarktregal. Aber trotzdem funktionieren auch bei uns die Sinne noch genauso wie vor einer Million Jahren, als sie unseren Vorfahren halfen, in der Wildnis zu überleben. Wenn wir verstehen wollen, wie unsere



■ **Abb. 1.3** Bei der Analyse komplexer Aromen, wie man sie z. B. im Wein findet, erbringt unser Riechsystem erstaunliche Leistungen. (© Kzenon/ fotolia.com)

Sinne funktionieren, dann dürfen wir also ihre biologische Funktion nie außer Acht lassen. Denn die ursprüngliche Aufgabe der Sinne, unser Überleben zu sichern, bestimmt auch heute noch, was wir wahrnehmen und wie wir es wahrnehmen. Dies werden wir im Laufe des Buches immer wieder sehen.

Wenn wir nun einen realistischen Eindruck davon erhalten wollen, wozu Sinne entwickelt wurden und wozu sie in der Lage sind, folgen wir doch der Katze der Familie Schneider, die mangels Interesse an Weindegustation und Haute Cuisine in den Garten geflüchtet ist.

1.3.2 Sinneswelt, die zweite!

Während die Katze durch das hohe Gras schleicht, wird sie plötzlich hellwach (■ Abb. 1.4). Ihre Nase hat eine Witterung aufgenommen. Schnuppernd fährt sie mit der Nasenspitze über den Boden. Vor



■ **Abb. 1.4** Die Jagd einer Katze ist nur erfolgreich, wenn alle ihre Sinnesorgane perfekt zusammenarbeiten. Ein Jagdtier schöpft alle Möglichkeiten seines hochentwickelten Sinnesapparats aus. (© Nadine Haase/ fotolia.com)

dem Hintergrund verwirrender Düfte, dem intensiven Geruch des Bodens und den unterschiedlich duftenden Blüten isoliert ihr Riechsystem eine eindeutige Geruchsnote. Eine Maus ist hier vor Kurzem entlang gehuscht. Die Katze bleibt stehen und hebt den Kopf. Ihre Vorderpfoten ruhen mit ihren samtweichen Ballen auf der Erde. Da! Die Tastsinneszellen in den Pfoten haben eine für uns unmerkliche Vibration des Bodens erspürt, die anzeigt, dass sich ein kleines Tier in der Nähe bewegt. Das könnte die Maus sein! Die Ohren der Katze stellen sich auf. Sie sind beweglich, und die Katze dreht sie nach verschiedenen Richtungen, während ihr hochempfindliches Gehör die Geräusche der Umgebung aufnimmt. In ihrem Gehirn ist ein bestimmter Bereich jetzt besonders aktiv. Er verarbeitet die akustische Information, die von den Ohren geliefert wird. Nun ein Rascheln! Das Orten einer Schallquelle ist eine der wichtigsten Aufgaben des Gehörs. Das Hörsystem der Katze bestimmt dazu die Zeitdifferenz, die zwischen dem Auftreffen des Geräuschs am linken und am rechten Ohr liegt. Die Auswertung ergibt, dass das Geräusch von rechts vorn kommt. Die Information, wo die Geräuschquelle zu suchen ist, wird an andere Gehirnteile weitergeleitet, die nun die Regie übernehmen. Sie steuern die Muskeln, die den Kopf der Katze präzise in die entsprechende Richtung drehen.

Die Katze blickt nun konzentriert in die Richtung, aus der das Geräusch gekommen ist. Auf dem dunklen Boden und zwischen verwelkten Blättern ist die Maus gut getarnt (■ Abb. 1.5), aber irgendwann muss sie sich bewegen. Bewegung zu erken-



■ **Abb. 1.5** Die Maus ist aufgrund ihrer Fellfarbe gut getarnt. Man erkennt sie erst auf den zweiten Blick, oder wenn sie sich bewegt. Bei allen Tieren sind die Sehsysteme darauf ausgelegt, Bewegung zu detektieren. (© elvira gerecht/fotolia.com)

nen – genau dafür sind die Sehsysteme aller Tiere (und natürlich auch unser eigenes) optimiert. Denn Bewegung heißt entweder Futter oder Feind. Es ist für das Überleben unerlässlich, beides schnell zu erkennen. Blitzschnell richten sich die Augen der Katze auf das sich bewegende Objekt aus. Es wird nun auf den zentralen Teil der Netzhaut abgebildet, mit dem die Katze am schärfsten sieht. Wenn die Maus sich bewegt, drehen kleine Muskeln die Augen der Katze so, dass sie die ganze Zeit auf die Maus gerichtet bleiben. Das Sehsystem analysiert Form, Farbe und Größe des Objekts. Das Ergebnis passt zu den abgespeicherten Parametern für das Objekt »Maus« in der Kategorie »Gaumenkitzel«.

Hochaktiv ist gleichzeitig aber auch ein anderer Gehirnteil der Katze. Er ist dafür zuständig, die Informationen aus zwei verschiedenen Sinnen abzugleichen: die akustische Ortung der Schallquelle und die visuelle Lokalisation der sich bewegenden Maus. Die Analyse ist schnell und lässt keinen Zweifel: Geräuschquelle und Maus sind an derselben Stelle! Nun muss das Ergreifen der Beute eingeleitet werden. Da beide Augen der Katze nach vorn gerichtet sind, überlappen sich ihre Gesichtsfelder weitgehend. Aufgrund der verschiedenen Augenpositionen ergeben sich jedoch winzige Unterschiede in den Bildern, die die beiden Augen aufnehmen. Das Sehsystem der Katze kann aus diesen Unterschieden die Entfernung der Maus berechnen. Diese Information wird an andere Bereiche



■ **Abb. 1.6** Um an das Blut ihrer Beute zu gelangen, brauchen Zecken nur wenige Verhaltensschritte, die von einem Minimum an Information ausgelöst werden. Dementsprechend benötigen Zecken nur einen einfachen Sinnesapparat. Große Augen, die gutes Sehen ermöglichen, sucht man deshalb bei Zecken vergeblich. (© Erik Leist, Universität Heidelberg)

des Gehirns weitergeleitet, die die Bewegung der Katze beim Angriff steuern. Die Katze muss mit der richtigen Kraft springen, sonst wird der Sprung zu kurz oder zu weit und gibt der Maus die Chance zu entkommen. Das Gehirn der Katze programmiert die Nervenbahnen vor, die die Muskeln steuern – dann springt sie. Die Maus hat keine Chance. Die Krallen der Katzenpfote bohren sich durch das Fell der Maus, die Katze landet auf ihr und beginnt nach kurzem Beschnupern genüsslich, an ihrer Beute zu lecken. Geruch und Geschmack der toten Maus lösen schnell Verdauungsreflexe aus. Die Sekretion von Speichel und Magensäure steigt sprunghaft an. Und während sich die Katze mit ihrer erlegten Beute beschäftigt, kommt gänzlich unbemerkt der letzte Akteur dieser Gartenszene ins Spiel.

1.3.3 Sinneswelt, die dritte!

Eine Zecke (■ Abb. 1.6) hat sich vor Tagen auf einem hohen Halm in dem Grasbüschel niedergelassen, neben dem jetzt die Katze liegt. Seit dieser Zeit hat sich die Zecke nicht bewegt. Lediglich die vorderen ihrer acht Beine sind langsam hin- und hergeschwungen. An diesen Beinen sitzt die »Nase« der Zecke in Form grubenartiger Organe. Die Zecken-nase reagiert nur auf eine kleine Auswahl chemischer Substanzen, wie sie im Stoffwechsel der Tiere

entstehen, die die Zecke zum Überleben braucht: Kohlendioxid, Ammoniak, Milchsäure und Buttersäure. Sobald unsere Zecke diese Substanzen in der Luft bemerkt, wird sie aktiv. Sie tastet nach der Duftquelle, registriert die Wärme des Katzenkörpers, lässt den Grashalm los, erwischt ein Katzenhaar und klammert sich fest. Im Fell der Katze wird dann der zweite Verhaltensschritt eingeleitet. Wieder sitzen die dafür nötigen Sinnesorgane an den Zeckenbeinen, damit sie die Beschaffenheit der Haut des Opfers registrieren können. Und dort, wo die Haut dünn, warm und feucht ist, bohrt die Zecke ihren Stechapparat durch die Haut der Katze, um Blut zu saugen.

1.4 Vom Sinn der Sinne

Anhand von zwei Beispielen haben wir gesehen, wie die Sinne Aufgaben meistern, für die sie ursprünglich entwickelt wurden. Bei der Katze finden wir den komplexen Sinnesapparat eines hochentwickelten jagenden Säugetieres – spezialisiert darauf, Beute aufzuspüren, zu lokalisieren und mit perfekt kontrolliertem Jagdverhalten zu erbeuten. Es ist interessant, einen Schleichräuber wie die Katze zu beobachten. Noch faszinierender wird es, wenn wir einem schnellen Jäger zuschauen. Die Sinnesleistung, die ein Gepard erbringen muss, um mit der Geschwindigkeit von 100 km pro Stunde eine Gazelle zu erjagen, ist kaum vorstellbar (■ Abb. 1.7).

Das Sinnes- und Nervensystem der Katze ist ein hochentwickelter und leistungsfähiger Apparat. Er nimmt die unterschiedlichsten Reize auf und wertet sie aus, wobei er die Information verschiedener Sinne geschickt kombiniert. Jedes Teilergebnis wird gebraucht, um den nächsten Schritt im Verhalten des Tieres zu steuern. Der Vergleich zwischen Zecke und Katze macht eines klar: Verschiedene Organismen sind sehr unterschiedlich mit Sinnesapparaten ausgestattet. Die Sinneswelt einer Zecke erscheint im Vergleich zum Säugetier geradezu minimalistisch. Das Verhaltensrepertoire der Zecke ist viel einfacher als das eines Säugetieres. Für den Erfolg der Zecke ist es nicht notwendig, den Ort des Opfers und seine Entfernung zur Zecke exakt zu bestimmen. Dementsprechend ist das Sinnessystem einer Zecke gänzlich anders



■ **Abb. 1.7** Ein Gepard erreicht bei der Jagd kurzfristig Geschwindigkeiten von 100 km pro Stunde. Die Jagd kann nur erfolgreich sein, wenn die Sinne und das Nervensystem des Gepards mit absoluter Präzision und höchster Geschwindigkeit arbeiten. (© beckmarkwith/ fotolia.com)

ausgelegt als das der Katze. Zecken reagieren auf Vibrationen, die durch die Bewegung ihrer Wirte ausgelöst werden, auf wenige chemische Schlüsselreize und auf Körperwärme. Um ihr Überleben und das Überleben ihrer Art zu sichern, braucht die Zecke nicht viel mehr, als sich vom Blut eines Wirtes zu ernähren und sich mit anderen Zecken fortzupflanzen. Genau deshalb hat sie auch nur dafür Sinne entwickelt. Die Farbe des Himmels, die detaillierte Beschaffenheit der Umgebung und auch das Aussehen des Wirtes sind für die Zecke vollkommen irrelevant. Stünde ihr dafür ein komplexes Sehsystem wie das der Katze zur Verfügung, wäre das reine Verschwendung. Die Unterhaltung eines Organs kostet den Organismus Energie und Ressourcen, die in diesem Falle anderswo, etwa in Fortpflanzungsorganen, gewinnbringender eingesetzt werden können. Viele Zeckenarten sind in der Tat blind oder besitzen lediglich einfache Augen, die bestenfalls Licht und Schatten unterscheiden können. Die Sinneswelten von Katze und Zecke sind also extrem unterschiedlich.

Ein Organismus ist somit nicht dann optimal mit Sinnesorganen ausgestattet, wenn er die empfindlichsten Sinneszellen und die genauesten Auswerteparate besitzt, sondern wenn sein Überleben am besten gesichert ist! Immer geht es beim Überleben um zwei Aspekte: zum einen um das eigene Überleben (»Fressen und nicht selbst gefressen werden«) und zum anderen um die Er-

haltung der Art (»Fortpflanzung ja oder nein«). Genau dafür wurden die Sinne entwickelt. Diesen Zusammenhang dürfen wir beim Studium der Sinne nie aus den Augen lassen, auch nicht, wenn es um unsere eigene Wahrnehmung geht.

Im folgenden Kapitel wollen wir genauer betrachten, wie es zur Entwicklung der Sinne – nicht zuletzt auch der menschlichen Sinne – kam.

Die Evolution der Sinne

2.1 Die Sinne des Menschen und wie er dazu kam – 12

2.1.1 Wie viele Sinne hat der Mensch? – 12

2.2 Die Evolution der Sinne – 14

2.2.1 Die Evolution ist der Motor für die Weiterentwicklung des Lebens – 14

2.2.2 Das Prinzip der Zucht – die künstliche Auswahl – 16

2.2.3 Das Prinzip der Evolution – die natürliche Auslese – 17

2.2.4 Die Eigenschaften unserer Sinnessysteme und die Verarbeitungsstrategien unseres Gehirns sind ein Produkt der Evolution – 19

2.2.5 Kinder der Evolution – 24

2.2.6 »Wer hat's erfunden?« – 25

2.3 Jeder auf seine Art – die Leistungen unserer Sinne sind höchst unterschiedlich – 26

2.3.1 Zwei Sinne im Vergleich – 26

2.3.2 Vom Sinnesreiz zum Verhalten – 29

Literatur – 30

Wenn wir erleben, welche Sinnesleistungen manche Tiere vollbringen, könnten wir manchmal vor Neid erblassen. Hunde können der Spur eines Menschen noch nach Stunden quer durch die ganze Stadt folgen, Fledermäuse und Schleiereulen lokalisieren in absoluter Dunkelheit ihre Beutetiere mithilfe des Gehörs, Zugvögel finden ihr Ziel in Tausenden von Kilometern Entfernung ganz ohne moderne Orientierungstechnik. Bei jeder Tierart sind bestimmte Sinne besonders leistungsfähig, andere weniger. Offensichtlich ist die Ausstattung mit Sinnesorganen und deren Leistungsfähigkeit bei den verschiedenen Organismen höchst unterschiedlich. Aber stets ist sie optimal an die Lebensweise des Organismus angepasst. Wie kam es dazu?

2.1 Die Sinne des Menschen und wie er dazu kam

2.1.1 Wie viele Sinne hat der Mensch?

Wir lernen schon als kleine Kinder, wie wichtig es ist, unsere »fünf Sinne« beisammen zu haben: Sehen, Hören, Riechen, Schmecken und Tasten bzw. Fühlen (■ Abb. 2.1). Diese Einteilung geht auf den griechischen Philosophen Aristoteles zurück, der im 4. Jahrhundert vor Christus lebte und die Naturlehre begründete. Niemand wird bezweifeln, dass wir Menschen mit diesen fünf Sinnen ausgestattet sind. Wir setzen sie täglich bewusst und unbewusst ein. Auf diesen fünf Sinnen beruht unser Verständnis für eine sinnlich fassbare Welt. Jeder kennt die Organe, die die Sinneszellen – wir nennen sie auch Rezeptoren – für die fünf Sinne beherbergen: Augen, Ohren, Nase, Zunge und Haut. Die Neuroanatomie zeigt uns, dass jeder der fünf Sinne seine Information über eigene, von den anderen Sinnen abgetrennte Bahnen an spezifische Zielgebiete im Gehirn schickt (darauf werden wir in späteren Kapiteln noch ausführlicher eingehen). Aber sind das alle Sinne? Oder gibt es mehr? Wenn wir ein bisschen nachdenken, werden wir feststellen, dass diese fünf Sinne nicht ausreichen können, um all unsere Sinnesempfindungen zu erklären.

Wer von uns hatte nicht schon einmal Schwindelanfälle, z. B. nach einer Innenohrentzündung, bei Durchblutungsproblemen oder nach einer

Achterbahnfahrt Die Welt scheint sich dann um uns zu drehen, und es gibt nirgendwo einen festen Punkt, an dem man sich orientieren könnte. Wenn wir wahrnehmen können, dass sich die Welt um uns dreht, müssen wir einen Drehsinn haben. Seine Aufgabe besteht im Normalfall darin, uns anzuzeigen, ob und wie wir den Kopf bewegen. Nur bei außergewöhnlicher Belastung oder bei Erkrankungen des Sinnes nehmen wir Schwindel wahr. Auch dieser Sinn hat ein eigenständiges Sinnesorgan: das Vestibularsystem im Innenohr mit den sogenannten Bogengängen. Dort befinden sich spezialisierte Sinneszellen, die mit spezifischen Gehirnarealen verbunden sind. In der Nähe der Bogengänge sitzen auch die beiden Maculaorgane. (Nicht zu verwechseln mit der Macula im Auge! – Der Begriff »Macula« stammt aus dem Lateinischen und bedeutet »Fleck«.)

Die Maculaorgane enthalten die Sinneszellen des Lagesinnes, der die Lage des Kopfes bestimmt. Er sagt unserem Gehirn, ob wir aufrecht stehen oder waagrecht liegen, er ist quasi eine Art Wasserwaage in unserem Kopf. Aber wozu muss unser Gehirn das überhaupt wissen? Die Lage und die Bewegung des Kopfes sind ungemein wichtig, wenn das Gehirn die Information aus den Augen oder Ohren interpretieren will. Ein Beispiel: Wenn sich das Bild eines Objekts auf der Netzhaut unseres Auges verschiebt, kann das ganz verschiedene Ursachen haben. Entweder das Objekt bewegt sich selbst – dann könnte es z. B. ein Tier sein, das uns gefährlich werden kann –, oder aber wir bewegen unseren Kopf und damit die Netzhaut – dann bewegt sich das Objekt nur scheinbar. Unser Gehirn muss diese Unterscheidung zu jedem Zeitpunkt treffen können. Deshalb haben wir einen Sinn entwickelt, der unsere Kopfbewegung detektiert und diese Information dem Gehirn zur Verfügung stellt. Und es geht noch weiter: Wenn wir den Kopf drehen, ein Objekt aber weiterhin im Auge behalten wollen, nutzt das Gehirn direkt die Information, die es vom Drehsinn erhält, um die Augen in die Gegenrichtung zu drehen. Dadurch bleiben sie exakt auf das Objekt ausgerichtet. Wir bezeichnen diese Kompensation als vestibulookulären Reflex.

Welche Sinne gibt es noch? Während der Untersuchung durch einen Neurologen mussten Sie vielleicht schon einmal mit geschlossenen Augen Ihre



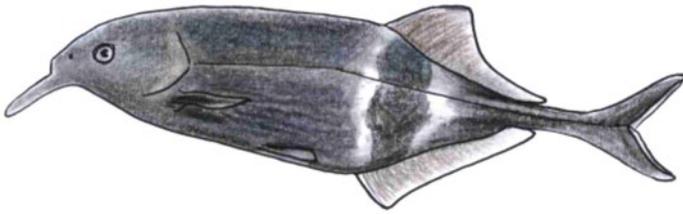
■ **Abb. 2.1** Unsere fünf klassischen Sinne: Schmecken, Tasten, Hören, Riechen und Sehen. Reichen diese Sinne aus, um die Welt zu erkunden? (© fredredhat/ fotolia.com)

Nasenspitze mit dem Zeigefinger berühren. Interessanterweise gelingt das im Normalfall sehr gut, obwohl Sie die Bewegung Ihrer Hand nicht visuell kontrollieren können. Ihr Gehirn muss ein anderes »Bild« Ihres Körpers benutzen, um die Hand an die Nasenspitze zu bewegen. Dieses Bild wird von Sinneszellen in Muskeln und Gelenken vermittelt, die die Stellung der Körperteile und Gelenke genau registrieren. Wir nennen diese Sinneszellen »Propriozeptoren« (vom lateinischen *proprius* für »eigen«), weil sie nicht auf Reize von außen reagieren, sondern die eigene innere Welt repräsentieren. In den meisten Fällen verarbeiten wir die Information der Propriozeptoren gar nicht bewusst. Die Rezeptoren in unserem Bewegungsapparat sind in wichtige Regelkreise und Rückkopplungsprozesse eingebunden, ohne die wir keine kontrollierten Bewegungen durchführen, ja noch nicht einmal stehen könnten, ohne umzufallen. Das glauben Sie nicht? Stehen Sie einmal auf und bleiben ganz ruhig stehen. Achten Sie jetzt darauf, wie Ihr Körper beständig versucht, durch kleine Ausgleichsbewegungen sein Gleichgewicht zu halten. Dies funktioniert auch mit geschlossenen Augen, allerdings nicht ganz so gut wie mit offenen Augen. Unsere Körperhaltung ist also nicht absolut von einer visuellen Kontrolle abhängig. Die Regelkreise, die die Information der Propriozeptoren nutzen, leisten im Normalfall gute Arbeit, wenn es darum geht, unseren Körper in seiner Haltung zu stabilisieren. Aber wir kennen alle die Folgen, die eintreten, wenn diese Regelkreise durch Alkoholkonsum gestört werden und der Betroffene mehr schlecht als recht nach Hause wankt.

Andere Sinneszellen in unserem Körper überwachen wichtige Stoffwechselwerte. Zu diesen physiologischen Parametern gehören z. B. der Blutdruck oder die Konzentration von Kohlendioxid im Blut. Auch diese Sinneszellen, die Endorezeptoren,

sind wichtige Bestandteile in Regelkreisen unseres Körpers, arbeiten aber weitgehend unbemerkt. Wir werden all diese Sinneszellen und ihre Funktion in ► Kap. 11 ausführlicher behandeln.

Dass wir einen Temperatursinn haben, wissen wir aus eigener Erfahrung. Wir prüfen damit, ob das Badewasser zu warm oder zu kalt ist, ob wir frieren oder unsere Kinder Fieber haben. Und schließlich gibt es einen Sinn, der ungemein wichtig ist, auch wenn er keineswegs angenehme Eindrücke vermittelt, sondern uns leiden lässt: der Schmerzsinne. In der Tat kann man den Schmerz als eigenständigen Sinn von den anderen Sinnen unterscheiden. Das angenehme Gefühl im warmen Badewasser (etwa bis 37°C) vermittelt der Temperatursinn. Ist das Wasser jedoch heißer, werden die Schmerzzellen aktiv – wir empfinden Schmerz und ziehen schnell die Hand aus dem Wasser. Schmerzzellen melden uns auch mechanische Verletzungen wie Stiche, Schnitte und Quetschungen. Auch bei entzündlichen Vorgängen sind Schmerzzellen hochaktiv. Die Aufgabe des Schmerzsinnes ist es, uns vor gefährlichen Situationen zu warnen oder dafür zu sorgen, dass wir z. B. unseren schmerzenden, weil verstauchten, Knöchel schonen. Trotzdem haben wir uns sicher alle schon einmal gewünscht, ein Leben ohne Schmerzen führen zu können. Es gibt tatsächlich Menschen, die aufgrund eines genetischen Defekts keine Schmerzen wahrnehmen. Im ersten Moment mag man denken, wie glücklich diese Menschen sein müssen. Aber die Erfahrung lehrt das Gegenteil! Die meisten der Betroffenen sterben noch als Kind, weil es keine Instanz in ihrem Körper gibt, die sie vor Gefahren warnt. Sie verbrühen sich mit kochend heißen Getränken oder ziehen sich schwerste Verbrennungen am Herd oder am Ofen zu. Sie lassen schwere Verletzungen nicht behandeln, weil sie sie gar nicht wahrnehmen.



▣ **Abb. 2.2** Der Elefantenrüsselfisch ist ein gutes Beispiel für eine uns gänzlich fremde Art von Sinneswahrnehmung. Er erzeugt um sich herum ein schwaches elektrisches Feld und kann registrieren, wenn sich dieses Feld verändert. Möglicherweise ist er somit in der Lage, sich in seiner Umgebung zu orientieren oder auch mit anderen Tieren zu kommunizieren. Welcher Art die Sinnesindrücke sind, die das Tier dabei hat, wird uns für immer verborgen bleiben. (© Michal Rössler, Universität Heidelberg)

Sie überlasten ihre Gelenke und ihre Wirbelsäule, weil kein Schmerzsignal sie daran hindert. Diejenigen, die das Erwachsenenalter erreichen, sind oft schwer gezeichnet und haben manchmal ausgeprägte Schädigungen des Bewegungsapparats.

Summa summarum bringen wir es also locker auf zehn Sinne. Diese Sinne erschließen uns unsere innere und unsere äußere Welt. Im Vergleich mit anderen Tieren belegen wir beim Sehen einen Spitzenplatz. Bis auf die Raubvögel mit ihren sprichwörtlichen Adler- und Falkenaugen sind uns die meisten Tiere deutlich unterlegen, wenn es um die Sehschärfe oder das Erkennen von Farben geht. Auf anderen Sinnesgebieten schneiden wir weniger gut ab. Hundenasen sind viel empfindlicher als unsere Nasen. Und zu bestimmten tierischen Sinnesleistungen, die wir in den späteren Kapiteln besprechen werden, sind wir überhaupt nicht in der Lage. Viele Tiere können Dinge wahrnehmen, für die wir (im übertragenen Sinne) blind sind. Zugvögel orientieren sich beispielsweise bei langen Wanderungen am Magnetfeld der Erde – sie haben einen Magnetsinn. Manche Fische orten andere Fische, indem sie mit spezialisierten Sinneszellen die schwachen elektrischen Felder wahrnehmen, die jeder Körper erzeugt (▣ Abb. 2.2). Wir sind dazu nicht imstande – Sinneszellen, die diese Leistungen ermöglichen, gehören nicht zu unserer sinnesphysiologischen Ausstattung. Wir sind von diesen Reizen, die genauso zu unserer Wirklichkeit gehören wie sichtbares Licht oder Geräusche, abgekoppelt.

Aber ist es nicht unfair, dass uns die Natur stiefmütterlich behandelt und nicht auch mit einem Magnet- oder einem Elektrosinn gesegnet hat?

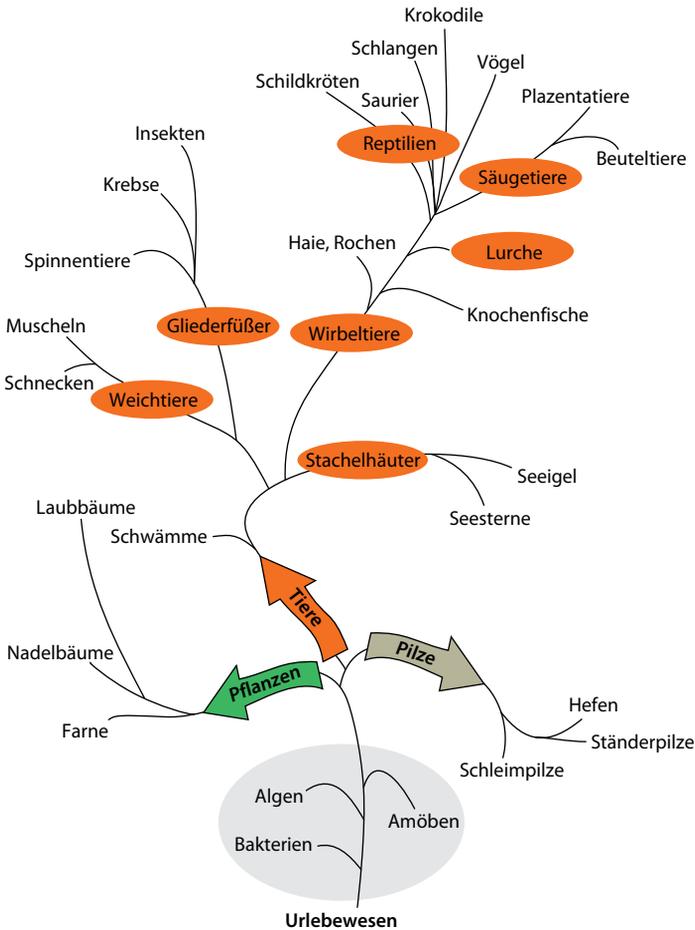
Wer hat darüber zu entscheiden? In den folgenden Abschnitten werden wir sehen, dass das, was wir wahrnehmen können und wie wir es wahrnehmen, die Folge einer Jahrmillionen langen Evolution ist.

2.2 Die Evolution der Sinne

2.2.1 Die Evolution ist der Motor für die Weiterentwicklung des Lebens

Evolution findet statt, weil das Leben auf dieser Welt stetigen Veränderungen unterworfen ist. In einem Wechselspiel zwischen Umwelt und Organismus passt sich eine Lebensform im Laufe von Generationen immer besser ihren Lebensbedingungen an. Diese Entwicklung erfolgt schrittweise und baut beständig auf dem auf, was vorhanden ist.

Nach unseren heutigen Erkenntnissen entstanden vor etwa drei bis vier Milliarden Jahren erste primitive einzellige Lebensformen auf dieser Erde. Sie vermehrten sich, veränderten sich weiter und entwickelten sich zu immer komplexeren Organismen. Jeder Organismus – gleich ob Bakterium, Tier, Pflanze oder Mensch, den wir heute auf der Erde antreffen – entwickelte sich aus diesen Urahnen (▣ Abb. 2.3). Dies mag erstaunen, wenn man die Vielfalt der irdischen Organismen betrachtet. Auf den ersten Blick scheinen eine Eiche, ein Fisch und ein Bakterium wenig Gemeinsames zu haben. Aber auf der Ebene der Zelle und der Moleküle sind bei allen Organismen, die wir auf der Erde finden, die Grundmechanismen des Lebens gleich. Der



■ **Abb. 2.3** Alle Organismen auf dieser Welt sind miteinander verwandt. Ausgehend von den ursprünglichen Lebensformen, die sich vor drei bis vier Milliarden Jahren auf der Erde bildeten, entwickelte sich eine enorme Organismenvielfalt. In diesem Stammbaum wurde nur eine sehr grobe Einteilung in Pflanzen, Tiere und Pilze vorgenommen. Es wurden nur einige Organismengruppen als Beispiele genannt, andere Gruppen, z. B. die verschiedenen Würmer, wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht aufgeführt. (© Anja Mataruga, Forschungszentrum Jülich)

Aufbau einer Pflanzenzelle unterscheidet sich nicht grundlegend von dem einer menschlichen Zelle. Alle Organismen speichern ihre Erbinformation in Form von DNS (Desoxyribonukleinsäure; auch DNA, abgekürzt für die englische Bezeichnung *deoxyribonucleic acid*) und nutzen den gleichen genetischen Code. Die Erbinformation von Menschen und Schimpansen z. B. ist zu fast 99 % identisch. Selbst mit Organismen wie der Bäckerhefe oder der Fruchtfliege teilen wir bei bestimmten Genen 30 bis 50 % der Erbinformation. Alle Organismen verwenden in ihren Zellen bestimmte

Zellbausteine, die Proteine, um biochemische Reaktionen durchzuführen. Alle Organismen verwenden Kohlenhydrate als Energiequelle und setzen das körpereigene Molekül ATP (Adenosintriphosphat) als universelle Energiemünze für die verschiedenen Stoffwechselprozesse ein. Wir finden viele Beweise dafür, dass wir nach demselben Muster gestrickt sind wie die anderen Organismen auf dieser Erde und von gemeinsamen Urnahmen abstammen.

Man schätzt, dass es heute ca. 100 Mio. Arten von Lebewesen auf der Erde gibt, die wir in die Reiche der Tiere, Pflanzen, Pilze oder Bakte-



▣ **Abb. 2.4** Es gibt mehr als 300 Hunderassen. Obgleich sie alle vom Wolf abstammen, unterscheiden sie sich erheblich in ihren Erbinformationen und damit in ihren Merkmalen – eine Folge jahrelanger intensiver Zuchtauswahl. (Bearbeitet nach © biglama/ fotolia.com)

rien einordnen können. Unzählige Arten starben im Laufe der Evolution aus. Wir wissen nur, dass es sie gab, weil wir von ihnen Fossilien in Form versteinerner Überreste finden können. Die spektakulärsten Beispiele sind sicherlich die Dinosaurier. Sie beherrschten 150 Mio. Jahre lang die Erde, bevor sie vor ca. 65 Millionen Jahren verschwanden – übrigens lange bevor es Menschen gab. Die Idee, dass sich Arten ständig verändern und heute existierende Arten aus primitiveren Ahnen hervorgegangen sind, steht natürlich im Gegensatz zur wörtlich genommenen biblischen Schöpfungsgeschichte. Die Frage »Schöpfung oder Evolution?« wurde im 18. und 19. Jahrhundert kontrovers und sehr emotional diskutiert – auch heute noch gibt es Gegner der Evolutionslehre. Manche von ihnen akzeptieren zwar, dass nicht alle Arten in einem einzigen Schöpfungsakt erschaffen wurden, sehen aber eine lenkende schöpferische Kraft in der scheinbar so zielgerichteten Entwicklung von einfachen zu immer komplexeren Organismen. Wenn man genauer hinsieht, stellt man allerdings fest, dass die Entwicklung längst nicht so zielgerichtet war, wie es manchmal scheint. Auch die Ergebnisse der Evolution sind bei Weitem nicht immer perfekt! Sie sind nicht der große, einmalige Wurf eines genialen Ingenieurs, sondern das Ergebnis eines langen und wechselhaften Optimierungsprozesses, der in unendlich vielen kleinen Schritten erfolgt ist. Was ist nun Evolution? Wie läuft sie ab?

2.2.2 Das Prinzip der Zucht – die künstliche Auswahl

Um das zu verstehen, betrachten wir zuerst, nach welchen Prinzipien der Mensch seit langer Zeit als Züchter in die Entwicklung bestimmter Tier- oder Pflanzenarten eingreift. Nehmen wir einen Hundezüchter. Wenn er seine Hundemeute betrachtet, entdeckt er viele Unterschiede zwischen den Tieren (▣ Abb. 2.4). Einige sind größer, manche schlauer als die anderen, einige können besonders schnell laufen. Die Unterschiede kommen daher, dass die Tiere unterschiedliche Erbinformationen besitzen, die ihre Eigenschaften bestimmen. Diese Erbinformationen sind auf bestimmten Abschnitten der Hunde-DNS gespeichert, und diese Abschnitte werden Gene genannt. In jeder Gemeinschaft, egal ob es sich dabei um die Hundemeute des Züchters, um einen Fischschwarm oder um die Menschen in einer Stadt handelt, finden wir solche Variationen. Die verschiedenen Erbanlagen sorgen unter anderem dafür, dass kein Mensch dem anderen gleicht – abgesehen von eineiigen Zwillingen, deren Erbgut identisch ist. Und da selbst bei eineiigen Zwillingen beim Aufbau und Erhalt des Körpers das Erbgut nicht hundertprozentig gleich umgesetzt wird, finden wir auch hier feinste Unterschiede, beispielsweise in der Ausprägung der Nasenflügel oder der Anordnung der Haare. Bei nahe verwandten Individuen, wie Eltern und Kindern, ist ein Teil der

Erbanlagen identisch. Deshalb sind sie einander im Aussehen und im Verhalten oft relativ ähnlich.

Die Unterschiede in der Erbinformation zwischen den verschiedenen Individuen entstanden in der Evolution spontan, zufällig und ohne Ziel. Bei jeder Zellteilung, auch bei der Bildung von Eizellen und Spermien, muss die Erbinformation verdoppelt werden, damit jede Tochterzelle eine komplette Kopie enthält. Bei diesem Kopiervorgang kommt es gelegentlich zu »Schreibfehlern«. Wir nennen sie Mutationen. Wie wirken sie sich aus? Die meisten Gene enthalten den Bauplan für Proteine. Dies sind Zellbausteine – molekulare Maschinen, die einen Organismus überhaupt erst in die Lage versetzen, sich auszubilden und zu erhalten (darauf werden wir in ► Kap. 3 eingehen). Eine Mutation in einem Gen, das für ein Protein codiert, bedeutet, dass sich der Aufbau dieses Proteins verändert. Die Folgen sind zum Glück oft wenig dramatisch. So sorgen sie z. B. dafür, dass es eine große Vielfalt von Haarfarben gibt. Manche Mutationen aber wirken sich negativ aus, weil sie die Funktion des Proteins erheblich stören. Sie können zu charakteristischen Krankheitsbildern führen. In einigen Fällen ist die Fehlfunktion gravierend und schränkt die Lebensqualität stark ein. Im schlimmsten Fall bewirkt die Mutation, dass der Organismus nicht mehr lebensfähig ist. Und dann gibt es natürlich noch den Fall, dass Proteine durch Mutationen besser funktionieren. Dies kann vorteilhaft für den Organismus sein.

Aber zurück zu unserem Züchter. Nehmen wir an, er will schnell laufende Hunde für die Jagd züchten. Dann geht er vielleicht so vor: Er wählt aus seinem Rudel die Tiere aus, die am schnellsten laufen können, und kreuzt sie miteinander. Sie geben ihre Gene an die Nachkommen weiter. Darunter sind auch die Gene, die z. B. für feste Muskulatur und einen vorteilhaften Knochenbau sorgen und so die Tiere zu guten Läufern machen. Aus diesem Wurf werden wieder die schnellsten Tiere ausgesucht und weitergekreuzt usw. So wird in jeder Generation die Eigenschaft, schnell laufen zu können, an die Nachkommen weitervererbt. Da der Züchter immer nur die schnellsten Tiere zur Zucht auswählt, »sammeln« sich die Gene, die schnelles

Laufen begünstigen, in seiner Zucht an. Nach einigen Generationen werden alle Hunde in dieser Zucht schneller und ausdauernder laufen können als normale, durchschnittliche Hunde eines anderen Züchters. Dieses Ergebnis ist also eine Folge der Auswahl durch den Züchter.

Der Erste, der erkannte, dass eine solche Auslese oder Selektion auch unter natürlichen Bedingungen stattfindet, ohne dass jemand lenkend eingreifen muss, war Charles Darwin (▣ Abb. 2.5). Er beobachtete, dass es bei den meisten Tier- und Pflanzenarten zwar viele Nachkommen gibt, die meisten jedoch sterben, bevor sie zur Fortpflanzung kommen. Und er erkannte, dass die Auswahl der Überlebenden nicht zufällig erfolgte. Er beschrieb den Mechanismus der natürlichen Auslese als wesentlichen Motor der Evolution. Was ist mit natürlicher Auslese gemeint?

2.2.3 Das Prinzip der Evolution – die natürliche Auslese

Betrachten wir eine Gazellenherde in einem abgelegenen Tal in der afrikanischen Savanne (▣ Abb. 2.6). In dem Tal gibt es durch eine glückliche Fügung keine Raubtiere. Auch in dieser Gazellenherde sind nicht alle Tiere gleich. Wir finden große und kleine Tiere, manche mit hellerem oder dunklerem Fell und auch Tiere, die etwas schneller laufen können als der Rest. Solange genügend Nahrung da ist und die Gazellen ungestört leben können, ist es aber relativ egal, ob sie schnell oder langsam laufen oder besonders klein oder groß sind. Sie können alle genügend fressen und haben somit gute Überlebenschancen. Folglich pflanzen sie sich alle fort und geben dabei ihre Gene – und damit ihre Eigenschaften – an die Nachkommen in der Herde weiter.

Nun nehmen wir an, dass sich die Umweltbedingungen ändern. Ein Löwenrudel wandert in das Tal ein, und die Gazellen stehen ganz oben auf ihrem Speiseplan (▣ Abb. 2.7). Die Gazellen, die besonders schnell laufen können, haben jetzt auf einmal einen Vorteil. Sie entkommen den Löwen eher als die langsamen Tiere. Diese werden

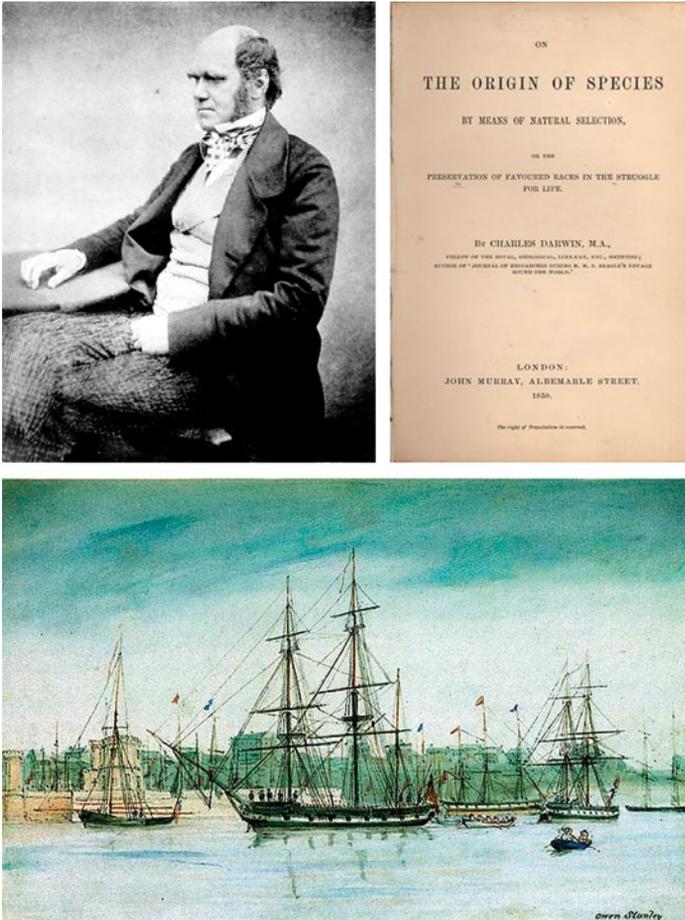


Abb. 2.5 Charles Robert Darwin (1809–1882) war ein britischer Naturforscher. Ende 1831 begann er eine fünf Jahre dauernde Reise mit der HMS Beagle (*unten*). Sie führte ihn nicht nur einmal um die Welt, sondern ermöglichte ihm vor allem tiefe Einblicke in die Artenvielfalt und die Unterschiede zwischen den Arten. Darwin war fasziniert von der Frage, wie es zu dieser Artenvielfalt kam. Aufgrund seiner Studien kam Darwin zu dem Schluss, dass sich jede Art durch Variation und natürliche Auslese an ihren Lebensraum anpasst. Sein Hauptwerk *On the Origin of Species (Über die Entstehung der Arten)* bildet die Grundlage der modernen Evolutionsbiologie. Die Evolutionslehre hat das Weltbild der Menschheit grundlegend verändert. Darwin gilt deshalb zu Recht als einer der bedeutendsten Naturwissenschaftler. (Links oben: © Maull und Fox, Wikimedia Commons; rechts oben: © Wikimedia Commons; unten: © Owen Stanley, Wikimedia Commons)

leichter erbeutet und als Erste gefressen. Der Rest ist simpel: Im Durchschnitt überleben mehr von den schnellen als von den langsamen Gazellen. Sie kommen deshalb häufiger zur Fortpflanzung als die langsamen Tiere. Ähnlich wie bei der oben beschriebenen Hundezucht wird die Fortpflanzung der schnellsten Tiere innerhalb der Population begünstigt – allerdings allein durch den Druck der natürlichen Auslese. Sie wird durch die Umweltbedingungen bestimmt, in diesem Fall durch das

hungrige Löwenrudel. Es wird zwar länger dauern als bei einer gezielten Zucht, aber über viele Generationen hinweg werden die Gazellen in diesem Tal immer schneller. Eine bestimmte Eigenschaft ist zum Überlebensvorteil für die Gazellen geworden und setzt sich von Generation zu Generation immer mehr durch. Da sich diese Eigenschaft in der Gemeinschaft ausbreitet, sorgt sie dafür, dass die Tiere besser an die veränderte Umweltbedingung »Löwenrudel im Tal« angepasst sind.



■ **Abb. 2.6** Thomson-Gazellen in der afrikanischen Savanne. (© Oleg Znamenskiy/ fotolia.com)



■ **Abb. 2.7** Bei den Löwen jagen die Weibchen im Rudel. Durch ihre ausgeklügelte Jagdstrategie sind sie sehr erfolgreich darin, ein Tier aus einer Herde zu isolieren und zu erbeuten. (© Gerard McDonnell/ fotolia.com)

Dies gilt auch für andere Eigenschaften, vorausgesetzt, sie bringen einen Vorteil beim Überleben und bei der Fortpflanzung. Die Gazellen beispielsweise, die durch ihre Fellfarbe am besten getarnt sind, werden am seltensten von den Raubtieren erkannt und erjagt. Auch diese Eigenschaft wird sich also durchsetzen. Deshalb weist das Fell der meisten Tiere Farben und Muster auf, die das Tier gut tarnen. Selbstverständlich gelten die Regeln der natürlichen Auslese auch für die Löwen. Langsame oder schwache Jäger erbeuten kein Wild

und verhungern. Die Tiere, die schnell und stark genug sind, um ihre Beute zu erlegen, werden ihre Brut besser aufziehen können und sich stärker fortpflanzen. Sie vererben ihre positiven Eigenschaften an die Nachkommen des Löwenrudels. Evolution beruht also auf der Kombination zweier Vorgänge: erstens der spontanen Veränderung der Erbinformation – sie erfolgt zufällig – und zweitens der Auslese durch die Umweltbedingungen – sie erfolgt ganz und gar nicht zufällig, wie wir an unserem Beispiel gesehen haben. Vielmehr zwingt die natürliche Auslese – der Selektionsdruck – die Eigenschaften der Organismen langsam, aber sicher in eine bestimmte Richtung.

2.2.4 Die Eigenschaften unserer Sinnessysteme und die Verarbeitungsstrategien unseres Gehirns sind ein Produkt der Evolution

Es ist leicht einzusehen, dass gerade Sinnesleistungen unter einem starken Selektionsdruck stehen und dadurch optimiert werden. Schließlich nehmen die Gazellen in unserem Beispiel, wie alle Lebewesen, ihre Umwelt mit ihren Sinnen wahr. Diese Wahrnehmung ermöglicht es, der Gefahr durch die Löwen zu entgehen. Umgekehrt benöti-



■ **Abb. 2.8** Bei vielen Tieren stehen die Augen seitlich. Dadurch ist es ihnen möglich, einen großen Teil ihrer Umgebung gleichzeitig zu beobachten und bei Gefahr frühzeitig zu fliehen. Das Chamäleon ist ein Spezialfall. Seine Augen sind extrem beweglich. Es kann sogar ein Auge nach vorn und das andere gleichzeitig nach hinten drehen. Es hat einen »Rundumblick«. (© Erik Leist, Universität Heidelberg)

gen Raubtiere, wie die Löwen, hochentwickelte Sinnesorgane, um Beute aufzuspüren und zu erjagen. Die uralte Geschichte vom Fressen und Gefressenwerden führte also zu einem Wettrüsten der Sinnes- und Gehirnleistungen. Und: Da praktisch jede Tierart auf dem Speiseplan einer anderen Spezies steht, gilt diese Entwicklung für alle Tierarten. Tiere, die gejagt werden, setzen besonders auf Frühwarnsysteme. Ihre Augen sitzen meist seitlich am

Kopf und erlauben ihnen fast einen Rundumblick (■ Abb. 2.8). Für Tiere, die in der Steppe leben, ist es sinnvoll, den Horizont immer gut zu überwachen, um anschleichende Jäger schnell zu erkennen. Deshalb enthält der Teil ihrer Netzhaut, auf den der Horizont abgebildet wird, besonders viele Sinneszellen und liefert so ein besonders gutes Bild.

Im Gegensatz dazu haben die jagenden Tierarten ihre Sinnesorgane für die Jagd optimiert. So