

Wolfgang
Johannsen

Information und ihre Bedeutung in der Natur



Das Leben
erfindet die Welt



Springer

Information und ihre Bedeutung in der Natur



Dr. phil. nat. Wolfgang Johannsen, ist Informatiker. Nach einer Forschungstätigkeit bei einem führenden Informatikunternehmen, unterschiedlichen Management-Positionen in einem großen deutschen Bankhaus und einer Unternehmensberatung ist Wolfgang Johannsen seit 2006 selbständig in der Ausbildung von IT-Managern tätig. Als Dozent an der Frankfurt School of Finance & Management in Frankfurt am Main, der Hochschule Darmstadt und der französischen Hochschule CNAM bildet er Studierende in der strategischen Steuerung der Informationstechnik großer Unternehmen aus. Er ist Mitveranstalter von

Management-Seminaren zu den Themen der strategischen Informationsverarbeitung. Mit Publikationen und Vorträgen beteiligt er sich kontinuierlich an der Fachdiskussion in seinem Gebiet. Er ist Autor von Fach- und Sachbüchern. Neben seiner beruflichen Tätigkeit beschäftigt er sich mit naturwissenschaftlichen Fragen und mit europäischer Geschichte.

Wolfgang Johannsen

Information und ihre Bedeutung in der Natur

Das Leben erfindet die Welt

Wolfgang Johannsen
Bensheim
Deutschland

ISBN 978-3-662-50254-9 ISBN 978-3-662-50255-6 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-50255-6

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

© Springer-Verlag GmbH Deutschland 2016

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.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

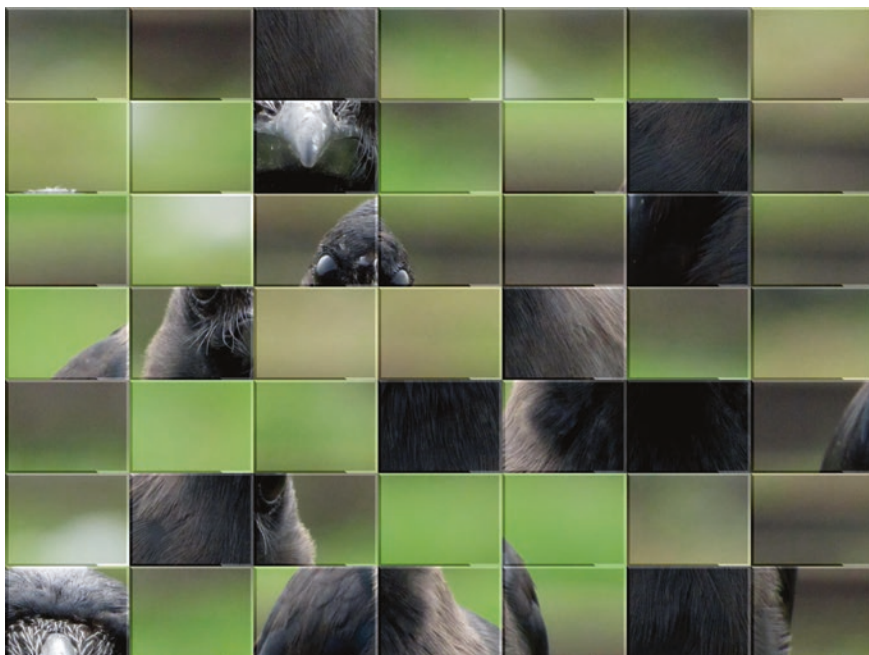
Planung: Margit Maly
Einbandentwurf: deblik, Berlin
Einbandabbildung: © deblik, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Deutschland
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

Das Leben erfindet die Welt? Ja, jede biologische Art und jedes individuelle Leben auf seine Weise. Klugen Geistern blieb dieses Wissen nie verborgen. Platon und Goethe gehören dazu. Auch Christian Morgenstern, der den Ausruf „Erst das Auge erschafft die Welt“ als Quintessenz eines seiner Gedichte nahm.



Was ist Information, woher kommt sie, und wie kommt sie zu Bedeutung? Wir gehen, um Antworten zu finden, interdisziplinär vor. Die Evolution, das Leben, aber auch die Thermodynamik und die Quantenphysik sowie die Grundlagen zu den Theorien der Information und der Informationsverarbeitung, ergänzt um historische Aspekte, helfen uns Antworten zu finden. Aus einem „kubistischen“ Bild

wie das eines aufmerksam in die Welt schauenden Vogels wird auf der Suche nach dem Ursprung semantischer Information wieder ein ganzes Bild, wie es auf dieser Seite zu finden ist (Abb. 1).

In einer antiken Fabel des griechischen Dichters Äsop erhöhte eine Krähe mit Steinen den Wasserstand in einem Krug so, dass sie schließlich daraus trinken konnte. In einem aktuellen Experiment haben Wissenschaftler Neukaledonische Krähen (*Corvus moneduloides*) trainiert, um dies nachzuahmen. Sie hatten Erfolg. Kürzlich wurde über Raben berichtet, die sich in andere Artgenossen hineinversetzen können. Sie verhielten sich in einem Raum mit Gucklöchern, durch die sie vorher selbst geschaut hatten, anders als im Raum ohne die Möglichkeiten selbst beobachtet zu werden.

Da Krähenvögel zu erstaunlichen kognitiven Leistungen fähig sind, müssen sie über eine recht präzise Wahrnehmung der Welt und ihrer Zusammenhänge verfügen. Und mehr noch, sie sind dazu in der Lage, komplizierte Aufgaben mit Hilfe von Werkzeugen und abstrakten Schlussfolgerungen zu lösen. Erstaunlich finden wir diese Leistung hauptsächlich deshalb, weil wir Derartiges bis vor kurzem noch für unsere eigene Gattung reserviert hatten. Immer deutlicher wird jedoch, wie komplex und reichhaltig auch die kognitiven und sonstigen informationsverarbeitenden Leistungen der Tiere sind. Da wir und die Tiere die gleichen evolutionären Wurzeln haben, sollten uns ihre Fähigkeiten nicht allzu sehr wundern.

Ich werde in diesem Buch darstellen, wie die Information – der Ursprung des Wortes ist das lateinische „in-formare“ und steht für gestalten und sich etwas vorstellen – in die Welt kam und sich in ihr entwickelte. Ich werde auch skizzieren, welche Rolle die Bedeutung von Information als Gegenstand wissenschaftlicher



Abb. 1 Weltwahrnehmung und Erkenntnis setzen eine intensive Informationsaufnahme aus der Umgebung voraus, und zwar bei allen Lebewesen. (© Vaikoover/CC BY 3.0)

Betrachtungen einnahm und heute einnimmt. Dabei wird allerlei auftauchen, das auf den ersten Blick seltsam erscheinen mag. Dämonen beispielsweise (drei sind es), schrumpfende Garagen, Fliesen, die sich selbst verlegen, und einiges mehr. Dennoch haben Sie kein Kuriositätenkabinett vor sich, sondern ernsthafte Auseinandersetzungen mit – teilweise epochalen – wissenschaftlichen Entwicklungen der Physik, der Quantenmechanik, der Evolution, der Genetik und auch der Informatik. Nicht zuletzt gehören auch der Ursprung des Lebens und weitreichende philosophische Erkenntnisse, die sich aus all dem ergeben und die den Aufbau der Welt und des Lebens erklären, mit dazu.

Dahinter steckt, so die Kernthese dieses Buches, eine allgemeine Entwicklungsleistung der Evolution. Sie gilt für das gesamte Leben und – je nach biologischer Gattung oder Art – auf unterschiedliche Weise. Diese Unterschiede sind groß und beruhen auf Millionen von Jahren an Entwicklungs- und Optimierungsleistungen. Und doch gibt es einen gemeinsamen Ursprung. Der Beginn des Lebens war auch der Beginn von bedeutungstragender, semantischer Information. So elementar und einfach sie auch anfangs war, so komplex und reichhaltig ist sie heute.

Ich gehe damit über die bekannte Informationstheorie von Claude E. Shannon und Warren Weaver hinaus. Beide hatten die in diesem Buch behandelten inhaltlichen „semantischen“ Gesichtspunkte nie im Visier. Bereits in seiner zentralen Veröffentlichung der „Mathematischen Theorie der Kommunikation“ stellte Shannon fest (1949):

Häufig haben die Nachrichten Bedeutung; d. h. sie beziehen sich auf oder sind korreliert mit einem System aus physischen oder konzeptuellen Einheiten. Diese semantischen Aspekte der Kommunikation sind irrelevant für die Fragestellungen von Ingenieuren. Der signifikante Aspekt ist vielmehr, dass eine aktuelle Nachricht aus einer Menge möglicher Nachrichten selektiert wird. Ein Kommunikationssystem muss so entworfen werden, dass es für jede mögliche Auswahl – nicht nur die aktuelle – betrieben werden kann.

Diese Abgrenzung Shannons wurde in der Folgezeit allzu oft ignoriert. Der Gegenstand der Informationstheorie ging als „Information“ in die Wahrnehmung von Wissenschaft und Technik ein, obwohl die Theorie ja – worauf ihr Erfinder bereits hinwies – lediglich einen Teil des Wesens der Information adressierte – den Teil nämlich, der sich auf die denkbaren Erscheinungsmuster in einem technischen Kommunikationskanal bezieht.

Wir wollen hier die von der Informationstheorie nicht behandelten, eigentlichen Wesensmerkmale der Information untersuchen, insbesondere die der semantischen Information, der Bedeutung also. Um der Sache auf den Grund zu gehen, gehen wir zentralen Fragen nach: Kam die Bedeutung erst später, also mit der biologischen Evolution, in die Welt, oder war sie schon immer da, also seit dem Urknall? Und wenn sie später in die Welt kam, wodurch wurde das bewirkt? Kann die Welt ohne Bedeutung überhaupt sein oder gedacht werden? Wie hat die Bedeutung mit Information zu tun? Kann es Bedeutung ohne Information und Information ohne Bedeutung geben? Würde Bedeutung existieren, wenn es keine Menschen, keine Tiere und keine Pflanzen, kurz keine biologische Evolution gäbe?

Der Begriff „Bedeutung“ selbst hat schon mehrere Bedeutungen. Mit dem Begriff „Information“ ist es ähnlich. Wir wollen neues Licht in diese schon jahrzehntelang geführte und immer noch hochaktuelle Debatte in Wissenschaft und Philosophie bringen. Bedeutung bedeutet vieles – vom simplen Verstehen eines Wortes über die Sinnerfüllung eines individuellen Lebens bis hin zum Existenzgrund des gesamten Universums. Und das Verständnis von Information umfasst ebenfalls ein breites Spektrum, von „statistischem Maß“ bis hin zu „Fundament der Welt“.

Soll all dieses hier erklärt werden? Nein, mein Anspruch als Autor ist bescheidener. Ich möchte meinen Leserinnen (im Buch wird zwischen der femininen und maskulinen Form zwanglos gewechselt) primär zeigen, wie Bedeutung aus naturwissenschaftlicher Sicht in die Welt kam. Damit ist die erste These schon ausgesprochen: Es gab sie nicht immer. Und die zweite These sei auch gleich genannt: Bedeutung ist als semantische Information mit der biologischen Evolution entstanden und sie wurde von ihr weiterentwickelt. Es ist die biologische Information, die die semantische Information, also die, die Bedeutung trägt, entwickelt und hervorgebracht hat. Vor Beginn der Evolution gab es sie nicht und außerhalb der Evolution gibt es sie immer noch nicht.

Erscheint Ihnen dies kurios, spannend, interessant? Sie sind herzlich dazu eingeladen, weiterzulesen und sich mit der Geschichte der Information und damit ihrer Bedeutung auseinanderzusetzen. Ein Kessel Buntes? Ja, in gewisser Weise. Das liegt in der Natur von Information und Bedeutung, die sich in all diesen Gebieten wiederfindet. Sofort drängt sich die Frage auf, ob diese Begriffe dann auch überall das Gleiche bedeuten. Die Antwort ist „nein“. Es gibt viele Erklärungen und Meinungen zur Information und der Bedeutung, die sie trägt oder eben nicht trägt. Dass es Information überhaupt nicht gibt, ist eine Auffassung an einem Ende des Spektrums, und dass sie alles ist, was es gibt, eine Position am anderen Ende. Dass es eine gültige Informationstheorie gibt, in der Bedeutung keine Berücksichtigung findet, ist hingegen Konsens, wenn auch bei Wissenschaftlern oft nicht präsent. Dennoch kann man in der Physik, auch in anderen Wissenschaften, und in der Technik hervorragend damit arbeiten. Dass jedoch vor allem in der Evolutionsbiologie die Frage nach der Bedeutung der Information besonders häufig gestellt wird, ist nicht weiter erstaunlich. Schließlich wird nach allgemeinem Verständnis mit den Genen Erbinformation übertragen. Was die Information hier bedeutet, ist für die Wissenschaft von brennendem Interesse.

Information und mit ihr die Bedeutung ist überall dort, wo wir – damit sind alle Arten gemeint, die die Evolution hervorgebracht hat – auch sind. Auch da, wo die biologische Evolution mittelbar gewirkt hat wie in Bibliotheken, Büchern und elektronischen Medien. Aber auch in den vielen Kommunikationsmustern, derer sich die Tiere bedienen. Schaut man genauer hin, ist sie aber auch überall in uns selbst. Jede Zelle jedes Lebewesens in der gesamten biologischen Evolution speichert und verarbeitet Information, und zwar in verblüffenden Mengen. Oder ist diese Erkenntnis nur Illusion, und es gibt Information und damit Bedeutung ebenso wenig wie den Äther, der ja schließlich auch einmal als unverzichtbar galt, um die Welt zu erklären?

Lassen Sie uns der Sache also auf den Grund gehen. Damit jedoch die Exkursion in verschiedene Wissensgebiete und Wissenschaften nicht ins Dickicht führt, kommt Ockhams Rasiermesser zum Einsatz. Wir wollen uns, dem Prinzip dieses mittelalterlichen Mönches folgend, auf das Wesentliche konzentrieren und das Unwesentliche wegschneiden. Inhaltliche Vertiefungen, die Sie ergründen, aber auch umgehen können, ohne dabei den roten Faden aus dem Blick zu verlieren, werden verhindern, dass es dabei zu oberflächlich zugeht.

Wir werden uns also vor allem mit dem Wesen der Information auseinandersetzen und schließlich, dies ist das Kernziel dieses Buches, herausarbeiten, was die Bedeutung – die Semantik – in der Information ausmacht. Gleichzeitig betrachten wir zwei weitere Eigenschaften, die unzertrennlich mit Bedeutung zusammenhängen, nämlich die Syntax und die Pragmatik. Diese Drei, Syntax, Semantik und Pragmatik, sind seit langem eingeführte Kategorien der Sprachwissenschaft. In der Erkenntnistheorie der biologischen Evolution wurden sie in dieser Dreiheit – als Tripel – jedoch bisher noch nicht verortet.

Ein halbes Jahrhundert rasanter Fortschritte in der Computer- und Kommunikationstechnik – zusammen mit bedeutenden naturwissenschaftlichen Erkenntnisfortschritten – wirft die Frage auf, wie Information und die maschinelle Informationsverarbeitung mit der Natur, der Evolution und dem Leben in Beziehung stehen. Wir werden sehen, dass die Informationsverarbeitung, die Mathematik und Algorithmen der Natur nicht fremd sind, sondern von ihr intensiv angewendet werden. Wir finden sie in der Physik ebenso wie in der Biologie. Die naturwissenschaftlichen Entwicklungen der jüngeren Vergangenheit sind ohne ein neues Verständnis der Information nicht nachvollziehbar.

Das Bild von der Welt hat sich dramatisch gewandelt. Erstaunlicherweise hat es jedoch in dieser neuen Form das Gros der Menschen in unseren Gesellschaften überhaupt noch nicht erreicht. Allzu oft halten wir an den alten Bildern von der Materie als Kügelchen, von dem Raum als Bühne, auf der sich alles abspielt, und der Zeit als gerichtetem Strahl fest. Und so ist es den meisten von uns bisher entgangen, dass auch Information und Informationsverarbeitung neu verstanden werden müssen, nicht nur, um physikalische und biologische Phänomene interpretieren, sondern auch, um Realität und Leben im 21. Jahrhundert reflektieren und bewusst gestalten zu können. Materie – Raum – Zeit: Was tritt an die Stelle dieser drei uns aus dem Leben so vertrauten Konstituenten unserer Welt? Welcher Rolle kommt der Information zu? Dies ist auch vor dem Hintergrund einer globalisierten Welt, in der Information und Informationsverarbeitung die zentralen Schlüsselrollen der Entwicklung übernommen haben, wichtig.

Es wird uns Anstrengungen kosten, auf der Grundlage neuer Erkenntnisse künftige gesellschaftliche Entwicklungen zu gestalten ohne einige bisher konsensbildende Wahrheiten seit der Aufklärung über Bord zu werfen. Denn schon heute erklären wir uns partiell die Welt mit so viel „altem“ Wissen, dass es immer schwieriger werden könnte, unsere Zukunft erfolgreich zu gestalten, wenn wir dies auch weiterhin so tun. Aber dies ist ein anderes, weites Feld.

Bei meinen Überlegungen über das Wesen, die Verarbeitung und die Bedeutung der Information in der Natur stelle ich in diesem Buch drei Fragen in den Mittelpunkt:

Ist Information physisch?

Die Information weist Eigenschaften auf, die man üblicherweise physischen Objekten zuschreibt: So hat sie eine maximale Geschwindigkeit, und sie kann quantifiziert werden. In der Physik spielte Information jedoch lange Zeit keine bedeutende Rolle. Die Auseinandersetzungen um den Maxwellschen Dämon und damit um Eigenschaften der Entropie, um die Informationstheorie und schließlich um die Quantenphysik änderten dies. In der Quantenphysik – der Begriff „Quant“ steht für das Diskrete im Gegensatz zum Kontinuierlichen – wurde und wird eine Diskussion darüber geführt, inwieweit der Wille, und damit der Austausch von Information zwischen Geist und physikalischer Realität, Auswirkungen auf das physikalische Geschehen hat. Für quantenphysikalische Zustände wurde eine neue Information, die Quanteninformation, postuliert. Der – noch nicht komplett verstandene – Übergang von Quantenzuständen mit ihren merkwürdigen Eigenschaften in klassische Zustände, wie wir sie in unserer erfahrbaren Alltagswelt erwarten, transformiert auch die Information von Quanteninformation zur klassischen Information. Das dahinterstehende Potenzial des Rechnens bzw. der Informationsverarbeitung mit sogenannten Qubits (oder Qbits) anstelle der Bits der klassischen Welt führt zum Quantencomputing und eröffnet neue Perspektiven. Quanteninformationen werden es – sofern gravierende technische Probleme sich als handhabbar herausstellen – in der Zukunft ermöglichen, bestimmte Probleme ungleich schneller zu lösen als bisher. Dazu gehören z. B. die parallele und somit schnellere Berechnung massiv rechenintensiver Algorithmen und auch die Entschlüsselung von Codes. Die Existenz der Quanteninformation führte auch dazu, sie als die Grundlage der physischen Welt zu verstehen (Baeyer 2005). Die Quantenphysiker Johannes Kofler (Max-Planck-Institut für Quantenoptik) und Anton Zeilinger (Universität Wien) betonen, dass es keinen Sinn mache, über Realität zu sprechen ohne die in ihr vorhandene Information zu berücksichtigen (Kofler und Zeilinger 2006).

Auch die Kosmologie blieb nicht unberührt von fundamentalen Fragen zum Wesen der Information. Einer kosmologischen Theorie zufolge, die, nach einer verlorenen Wette, auch vom Physiker Stephen Hawking anerkannt wurde, bleibt bei dem „Verdampfen“ eines Schwarzen Loches nichts übrig – außer der darin enthaltenen Information.

Das Verständnis von Information deckt sich mit dem Informationsbegriff der Informationstheorie wie er von Claude E. Shannon und Warren Weaver 1948 eingegrenzt wurde.

Sind die Strukturen unserer Welt informatorisch?

Information hat, so der Nobelpreisträger Manfred Eigen bereits vor über vierzig Jahren, offenbar Fähigkeiten, sich selbst zu organisieren (Eigen 1971). In der Informatik, Mathematik und Physik häufen sich die Beispiele von strukturbildenden Prozessen, in denen offenbar Informationen durch spezifische Instruktionen bearbeitet werden. Wir werden die Art dieser Befehle u. a. an sogenannten zellulären Automaten und an sich selbst organisierenden Molekülen bei der Entstehung von Viren näher betrachten.

Selbstorganisation wird besonders in der Fähigkeit bestimmter Moleküle – wie die als Ikone der Genetik bekannte DNA – zum Speichern, Modifizieren, Replizieren und Aggregieren von Information deutlich. Diese Fähigkeiten sind selbst informationsgesteuert und erklären in gewisser Weise die Fähigkeit der Evolution zur Selbstoptimierung. Pflanzen und Lebewesen sind „bestrebt“, sich ihren Lebensräumen bestmöglich anzupassen. Dabei entsteht die Vielfältigkeit lebender Organismen, wie z. B. von Lebewesen mit herausragenden Optimierungserfolgen. Das uns am meisten vertraute Beispiel: der Mensch. Eine der zentralen Fragen ist dabei die nach der Komplexität der Vorgänge. Wo liegt ihr Ursprung, wie ist sie bei der Entwicklung des Universums entstanden, und wie entwickelten sich Information und Komplexität eigentlich grundsätzlich weiter?

Ist bedeutungstragende Information ein Element des Lebendigen?

Die biologische Evolution macht sich die Information offenbar auf verschiedenen Ebenen zunutze. Über die molekulare Ebene hinaus spielt die Fähigkeit zum Speichern, Modifizieren, Replizieren und Aggregieren von Informationen auch in der makroskopischen Evolution eine entscheidende Rolle. So hebt z. B. besonders die Evolutionäre Erkenntnistheorie darauf ab, dass unsere Erkenntnis über die Welt – also die Fähigkeit unseres Gehirns, die äußere Welt richtig zu interpretieren, damit wir uns darin zurechtfinden können – ein Ergebnis der Evolution ist. Ebenso wie die gesamte biologische Vielfalt sonst. Biologen wie der Mitbegründer der Evolutionären Erkenntnistheorie Gerhard Vollmer wiesen schon vor geraumer Zeit darauf hin, dass unsere Erkenntnis von der Welt mit den realen Strukturen weitgehend übereinstimmen muss, weil nur eine solche Übereinstimmung das Überleben ermöglicht hat (Vollmer 2002). Die subjektiven Erkenntnisstrukturen passen in die Welt, weil sie sich im Laufe der Evolution in Anpassung an diese reale Welt herausgebildet haben. Mithin waren sie nicht a priori da, sondern wurden entwickelt. Und weil sich die Evolution nicht geradlinig und ohne Brüche entwickelt hat, darf man schließen, dass die Erkenntnis von Menschen und Tieren auch nicht bruchlos entstand.

Mehr und mehr rückt damit die Frage nach der Rolle der bedeutungstragenden Information in die Mitte der Überlegungen. Wie äußert sich Bedeutung im Prozess der Vererbung, der Anpassung und Genetik? Finden wir sie in den Molekülen wieder und vererbt sie sich? Trägt sie zur Gestaltbildung des Phänotyps eines Organismus bei und wie macht sie das? Wie können wir bedeutungstragende Information modellieren bzw. beschreiben, sodass sie wissenschaftlich „dingfest“ gemacht wird?

Auf der Makroebene erscheint der Umgang der Organismen – nicht nur der menschlichen Organismen – mit Information plausibler als auf der Mikroebene. Die Evolution schafft Erkenntnis durch ständigen Abgleich der Organismen mit der Realität, durch Auswahl der besten Optimierungserfolge und durch zufällige Variation der Erbinformation. Die Nutzung der Information in diesem Geschehen ist nicht zu übersehen. Das Lernen einer biologischen Spezies ist unmittelbar mit der Extraktion und Bewertung nützlicher Information verbunden. Die Evolution selbst lernt auf der genetischen Ebene, indem die Gesamtheit eines Organismus –

z. B. eine Vogelart – sich durch Selektion stetig besser an die Lebensumwelt anpasst. Die bestangepassten Spezies und ihr – gegebenenfalls durch Mutation veränderter – Genpool haben die besten Chancen und vererben ihre Erbinformation inklusive dieser vorteilhaften Mutationen. Auf einer anderen Ebene führt individuelles Lernen zur Eroberung von Nischen und damit gleichfalls zur Verbesserung der Ausgangsposition des eigenen Genpools. Diese beiden Ebenen stehen allerdings nicht so eng in Verbindung miteinander, dass individuelle Erfolge sich in genetische Programmierung umsetzen ließen. Die langen Hälse der Giraffen sind also nicht deswegen entstanden, weil einige Vorfahren die Hälse reckten, sich einen Vorteil bei der Nahrungssuche verschafften und flugs ihre Gene neu programmierten. Vielmehr haben Zufälle Exemplare mit leicht längeren Hälsen geschaffen, und diese erwiesen sich in dem Umfeld, in dem Giraffen leben – ihrer Nische – als besser angepasst, und so konnten sie besser leben und überleben. Dadurch wiederum sicherten sie sich die Chance, ihren „Erbfehler“ weiter zu vererben.

Wie wir sehen werden, bieten sich unter Einbeziehung des Faktors Information auch für die Entstehung des Lebens selbst neue Erklärungsmodelle an. Denn ohne die Fähigkeit, Erbinformation zu erzeugen, weiterzugeben und weiterzuentwickeln, lässt sich der Anfang des Lebens nicht verstehen. Ohne Biochemie selbstverständlich auch nicht, nur deutet heute nahezu alles darauf hin, dass die wunderbaren Vorgänge der Biochemie als Mittel zum Zweck eingesetzt wurden. Zu welchem Zweck? Um Leben und Evolution zu ermöglichen und zu „betreiben“. Nicht etwa, um ein fernes – teleologisches – Ziel zu erreichen.

Zu den drei aufgeworfenen Fragen, ob Information physisch ist, ob die Strukturen der Realität informatisch sind und ob bedeutungstragende Information ein Element des Lebendigen ist, werde ich in diesem Buch die aktuelle Diskussion wiedergeben und auch – auf der Basis von aktuellen Erkenntnissen aus der Informatik, der Physik und der Biologie – Antworten zu diesen Fragen bieten. Angesichts der Fülle neuer Erkenntnisse bleibt beides unvermeidlich ausschnittshaft – allerdings in faszinierenden Ausschnitten. Ich verfolge dabei, wie gesagt, prinzipiell das Ziel, nur das Wesentliche wiederzugeben und mich – außer wenn explizit angegeben – jeglicher Spekulationen zu enthalten.

Das Buch soll auch dazu beitragen, eine bestehende Lücke zu schließen. Insbesondere die erkenntnistheoretische Diskussion zu den genannten Themen wird leider eher im angelsächsischen als im deutschsprachigen Raum geführt. Mein Ziel ist es daher, dem interessierten Publikum die Facetten mehrerer faszinierender und aktueller Themen interdisziplinär näher zu bringen. Neben der Darstellung naturwissenschaftlicher Forschungen der Gegenwart sollen auch neue Fragestellungen und Perspektiven eröffnet werden. Als Ergebnis der Auseinandersetzung mit diesen Wissenschaftsfeldern stelle ich ein Modell vor, das das bekannte Modell der Informationstheorie ergänzt. Mit ihm zeige ich, wie Bedeutung in die Welt kam, wie sie weiterentwickelt wurde und wird, dass Energie und semantische Information eng zusammenhängen und schließlich, dass die Evolution die Verursacherin all dieser Phänomene ist.

In der Quintessenz würde es mich freuen, wenn ich Sie am Ende meines Buches davon überzeugen konnte, dass wir Information in der Informatik (meinem primären Wissensgebiet), aber auch in der Physik, der Biologie und der Philosophie vorfinden. Bedeutung und Information sind zwei Querschnittsthemen, die in einer Reihe von Wissensgebieten ganz aktuell diskutiert werden. Vieles wird Ihnen vielleicht bereits aus den einzelnen wissenschaftlichen Disziplinen bekannt sein – als Querschnittsthema jedoch hoffe ich Ihnen die Dimensionen von Bedeutung und Information in neuem Licht zeigen zu können.

Bei der Suche nach einem Ansatz mit möglichst wenigen Hypothesen zugunsten einer „einfachen“ Theorie konzentriere ich mich auf naturwissenschaftliche Sachverhalte, die mir eine Definition der Information erlauben, mit der ich zeigen kann, welche Eigenschaften Information besitzt und wie aus ihr in der Evolution Bedeutung und Wissen entstehen kann. Aspekte der Informationsgesellschaft, den neuen Medien, der Psychologie und den vielen gesellschaftlichen Aspekten klammere ich aus. Albert Einstein wird das folgende bekannte Zitat zugeschrieben, das meinen Arbeitsansatz gut beschreibt: „Man muss die Dinge so einfach wie möglich machen. Aber nicht einfacher.“ Machen wir uns auf den Weg!

An dieser Stelle noch ein Eingeständnis. Ich bin Informatiker und kein Physiker, Biologe oder Philosoph. Und dennoch wage ich mich in diese Gebiete hinein und hoffe, dass mir keine gravierenden Fehler in meinen Darstellungen unterlaufen. Meine Kernthese, das Zusammenhängen von Bedeutung, Information und Evolution, habe ich jedoch in einer von Gutachtern kommentierten internationalen Veröffentlichung und in einem Beitrag auf einer gleichfalls internationalen Konferenz auf die Probe gestellt. Frei von Risiko ist mein Unterfangen mehrfacher Interdisziplinarität nicht, das ist mir bewusst. In einem Buch des Historikers Norman Davies fand ich die Skrupel eines anderen interdisziplinär argumentierenden Autors folgendermaßen formuliert:

Heute „spezialisieren“ sich die meisten Historiker. Sie wählen eine Epoche, manchmal eine sehr kurze Zeitspanne, und innerhalb dieser Epoche bemühen sie sich in einem aussichtslosen Kampf mit den ständig wachsenden Quellenbergen, alle Fakten zu kennen. So gerüstet, können sie bequem jeden Amateur niedermachen, der es wagt ... in ihr schwer bewachtes Territorium einzufallen. Ihre Welt ist statisch. Sie sind wirtschaftlich autark, haben eine Maginot-Linie und große Vorräte ... aber eine Philosophie haben sie nicht. Eine Geschichtsphilosophie ist nämlich mit so engen Grenzen nicht vereinbar. Sie muss auf die Menschheit aller Epochen anwendbar sein. Um sie zu prüfen, muss ein Historiker sich über die Grenzen wagen, auch auf feindliches Terrain; um sie darzulegen, muss er bereit sein, Aufsätze zu Themen zu schreiben, über die er vielleicht nicht gut genug Bescheid weiß, um ganze Bücher zu füllen (Hugh Trevor Roper zitiert in „Verschwundene Reiche“ von Norman Davies (2011)).

Zum Glück kann der Mensch auf die Unterstützung anderer bauen. So ging es erfreulicherweise auch mir. Ich habe viel Hilfe erfahren und die Schuld des Dankes nehme ich gerne als Verpflichtung etwas zurückzugeben – wenn auch vielleicht nicht immer direkt und unmittelbar.

Dr. Roman A. Englert war mir ein sehr geschätzter Diskussionspartner in einem früheren Stadium der Entwicklung von Gedanken zum Wesen der Information (Johannsen und Englert 2012).

Im Sommer 2015 hatte ich das große Glück, dass mein Seminarvorschlag „It from Bit“ für die Sommeruniversität am Evangelischen Studienwerk Villigst in Schwerte den Zuschlag bekam. Zur inhaltlichen Ausgestaltung und damit auch zur Zusammenarbeit mit einer vergleichsweise kleinen Studentengruppe erklärten sich die Professoren und Wissenschaftler Ernst Peter Fischer, der Quantenphysiker Claus Kiefer und der Philosoph Holger Lyre bereit. Diesen prominenten Vertretern ihrer jeweiligen Fachgebiete und auch den sehr engagierten Stipendiaten des Evangelischen Studienwerks danke ich an dieser Stelle nochmals für die inspirierende Arbeit in Villigst.

Für die zahlreichen und konstruktiven Kommentare zu meinem Journal-Beitrag über semantische Information in der Natur (Johannsen 2015) bin ich drei anonymen Gutachtern zu herzlichem Dank verpflichtet.

Studienrätin Barbara Toepfer hat nicht nur mit einem sehr qualifizierten Lektorat zum Fortschritt des Textes beigetragen, sondern auch durch manchen freundschaftlichen Rat an der richtigen Stelle die Motivation befeuert.

Meine Frau Ute Johannsen hat sich mit Gusto der Jagd nach Bildrechten gewidmet und war trotz eines zuweilen schier undurchdringlichen Informationsdickichts sehr erfolgreich dabei.

Frau Daniela Schmidt übernahm im Auftrag des Springer-Verlages die Aufgabe, das Buch zu lektorieren. Sie hat nicht nur mit vielen wichtigen Kleinigkeiten die formale Seite des Textes auf das Anspruchsniveau des Verlages gehoben, sondern auch viele Hinweise gegeben sowie kritische Fragen gestellt. Ihre wertvollen fachlichen Kommentare zum gesamten Kontext Biologie habe ich gleichfalls sehr gerne berücksichtigt.

Christian Thiemann hat es dankenswerterweise übernommen, seine Einsichten in die Molekularbiologie beim Korrekturlesen einzubringen. Für seine Liste mit Fragen, Korrekturen und Vorschlägen bin ich ihm sehr dankbar.

Der Springer-Verlag zeigte sich mir in einer stets freundlichen und konstruktiven Kommunikation. Frau Carola Lerch und Frau Margit Maly bin ich dafür zu bleibendem Dank verpflichtet.

Hinzu kamen viele schulterklopfende Freunde und Kollegen, die mir mit allen Nuancen im Spektrum von Ermutigungen bis Enthusiasmus den Rücken stärkten. Ihnen sei hier auch gedankt.

Bensheim
Deutschland

Wolfgang Johannsen

Literatur

- Baeyer, Hans Christian von. 2005. *Das informative Universum: Das neue Weltbild der Physik*. München: C.H. Beck.
- Davies, Norman. 2011. *Vanished Kingdoms*. London: Penguin Books.
- Eigen, Manfred. 1971. *Self-organization of matter and the evolution of biological macromolecules*. In: *Die Naturwissenschaften*, Bd. 58, 465–523.

- Johannsen, Wolfgang. 2015. *On semantic information in nature*. *Information*. 6 (3): 411–431.
- Johannsen, Wolfgang und Roman Englert. 2012. *Information über Information*. Göttingen: Cuvillier Verlag.
- Kofler, Johannes und Anton Zeilinger. 2006. The Information Interpretation of Quantum Mechanics and the Schrödinger Cat Paradox. In: *Sciences et Avenir Hors-Série*, Nr. 148.
- Shannon, Claude E und Warren Weaver. 1949. *The mathematical theory of communication*. Urbana: University of Illinois, I.
- Vollmer, Gerhard. 2002. *Evolutionäre Erkenntnistheorie: Angeborene Erkenntnisstrukturen im Kontext von Biologie, Psychologie, Linguistik, Philosophie und Wissenschaftstheorie*. Stuttgart: S. Hirzel Verlag.

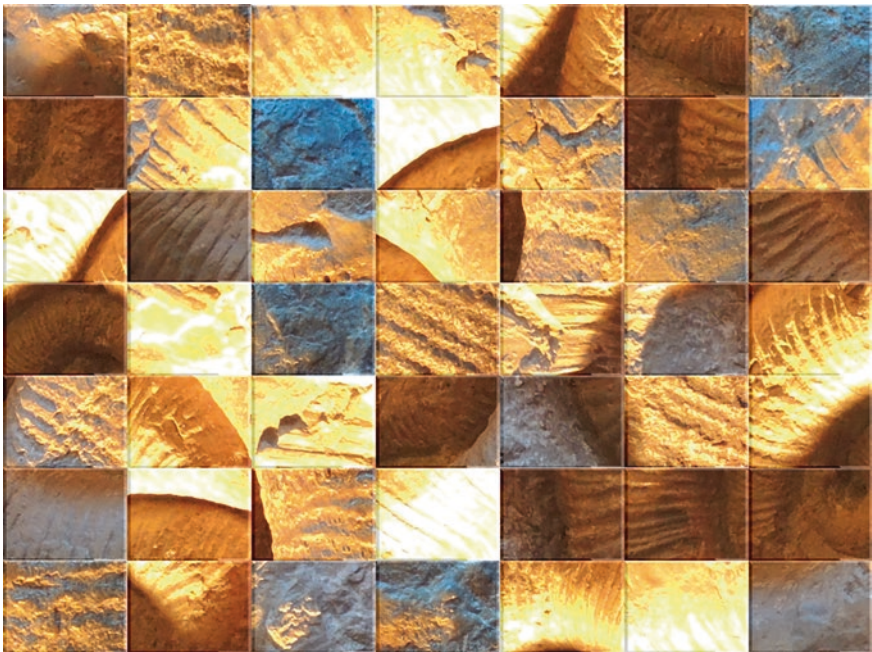
Inhaltsverzeichnis

1 Einführung und Überblick	1
1.1 Kantinengespräche	2
1.2 Interdisziplinär vom Anfang an	6
1.3 Information, ein unverzichtbarer Begriff bei der Suche nach Bedeutung	9
1.4 Denkwege zum Ziel	15
1.5 Was erreicht werden soll	18
Literatur	20
2 Zum Wesen der Information und ihrer Bedeutung	21
2.1 Behandelte Themen und Fragen	22
2.2 Einführung und Kapitelüberblick	22
2.3 Die Shannonsche Informationstheorie	26
2.4 Alternativen und Ergänzungen zur Informationstheorie	37
2.5 Hypothesen zur Rolle der Information in der Natur	39
2.6 Unterm Strich – Kernaussagen dieses Kapitels	60
Literatur	61
3 Management von Information, Bedeutung und Wissen	65
3.1 Behandelte Themen und Fragen	66
3.2 Einleitung und Kapitelüberblick	67
3.3 Information und Bedeutung als Kulturprodukte	67
3.4 Information, Sprache und Struktur	95
3.5 Eine kurze Geschichte der informationsverarbeitenden Maschinen	101
3.6 Turings Modell einer universellen Maschine	109
3.7 Alan Turing – erfahrenes Unrecht	120
3.8 Unterm Strich – Kernpunkte dieses Kapitels	121
Literatur	123

4 Physik der Information	125
4.1 Behandelte Themen und Fragen	127
4.2 Einleitung und Kapitelüberblick	127
4.3 Information in der Physik	129
4.4 Entropie, Information, Energie und Zeit	133
4.5 Bizarre Quantenmechanik	152
4.6 Quanteninformation und -computing	211
4.7 Unterm Strich – Kernpunkte dieses Kapitels	217
Literatur	219
5 Leben, Evolution und Information	223
5.1 Behandelte Themen und Fragen	224
5.2 Einleitung und Kapitelüberblick	225
5.3 Information in der Biologie	227
5.4 Das Leben	232
5.5 Die Evolution	282
5.6 Phylogenese	292
5.7 Unterm Strich	341
Literatur	344
6 Weltwahrnehmung und Erkenntnis	349
6.1 Behandelte Themen und Fragen	350
6.2 Einleitung und Kapitelüberblick	350
6.3 Etwas existiert wenn es zurückschlägt	351
6.4 Was wir erkennen können	354
6.5 Warum wir die Welt erkennen	358
6.6 Evolutionäre Erkenntnistheorie	372
6.7 Unterm Strich – Kernpunkte dieses Kapitels	380
Literatur	382
7 Das Evolutionär-energetische Informationsmodell (EEIM)	383
7.1 Behandelte Themen und Fragen	384
7.2 Einleitung und Kapitelüberblick	384
7.3 Biologische Information	387
7.4 Unterscheidung zur Shannon-Information	396
7.5 Die Modellkomponenten	396
7.6 Falsifizierbarkeit des Modells	400
7.7 Wissenschaftliche Relevanz des Modells	401
Literatur	402
8 Resümee	403
9 Anhang – Wissenschaftliche Modelle der Information	407
9.1 Ure nach Carl Friedrich von Weizsäcker	408
9.2 Unified Theory of Information nach Wolfgang Hofkirchner	410
9.3 Meme nach Richard Dawkins	411
9.4 Ontologie der Information nach Mark Burgin	412

9.5	Konstruktorthorie der Information	
	nach David Deutsch und Chiara Marletto	415
9.6	Biologische Information und Teleosemantik	417
	Literatur.	419
	Stichwortverzeichnis.	421

Der Philosoph Immanuel Kant fordert die Auseinandersetzung mit den Fragen „Was will ich?“ durch den Verstand, „Worauf kommt es an?“ durch die Urteilskraft und „Was kommt heraus?“ durch die Vernunft. Dem fühlt sich der Autor verpflichtet.



In den 40er- und 50er-Jahren des 20. Jahrhunderts waren die Naturwissenschaften dabei, die revolutionären Ergebnisse von Einstein, Bohr, Heisenberg, Schrödinger und anderen Naturwissenschaftlern zu verarbeiten. Kaum als solche



Abb. 1.1 Ein Ammonit. In diesem Fossil wird die Mathematik – hier das Zahlenverhältnis des „Goldenen Schnitts“ – als gestaltende Wirkung des Lebens und der Natur deutlich. Die Bedeutung der Mathematik in der Natur wird ganz unterschiedlich eingeschätzt – bis hin zur Annahme, die Natur selbst sei Mathematik. (© Barbara Toepfer)

bemerkt, bereiteten sich neue wissenschaftliche Umbrüche vor, für die Namen wie Shannon, Turing, wiederum Schrödinger, und Delbrück sowie Watson, Crick und Franklin stehen. Eckpfeiler dieser Umbrüche bildeten die Informationsverarbeitung, weitere Fortschritt in der Physik, die beginnende Molekularbiologie und die Genetik. Der Ammonit in Abb. 1.1 symbolisiert die sich damals verstärkende Emergenz, also das Auftauchen oder Herauskommen mathematischer und informatorischer Ursachen in der Ausprägung auch lebendiger Organismen, nachdem dies in der Physik für nichtlebendige Strukturen längst geschehen war.

In diesem Kapitel skizziere ich die Situation und formuliere eine Leithypothese zur Herkunft und zum Wesen semantischer Information.

1.1 Kantinengespräche

Frühling 1943 im US-amerikanischen Bundesstaat New Jersey. In der Cafeteria der legendären Bell-Laboratorien (Abb. 1.2) unterhalten sich angeregt zwei Wissenschaftler über wahre Jahrhundertfragen. Der Krieg, der auch ihr Leben bestimmt, ist für kurze Zeit in den Hintergrund getreten. Es sind der Amerikaner Claude E. Shannon (1916–2001) und der Brite Alan Turing (1912–1954), der aus



Abb. 1.2 Die Einfahrt zu den Bell-Laboratorien in New Jersey, USA, etwa 1943. (© Library of Congress, Gottscho-Schleisner Collection)

a



b



Abb. 1.3 Alan Turing, Claude E. Shannon. **a** Die Büste Turings (mit einer „Enigma“ vor ihm) befindet sich im Bletchley Park Museum. Im Hintergrund ist sein Foto zu sehen. (© Jon Callas CC BY 2.0 /mit freundlicher Genehmigung Bletchley Park), **b** Shannon ist als bereits renommierter Ingenieur und Wissenschaftler in den 1950er-Jahren abgebildet. (© Estate of Francis Bello/ SPL/Agentur Focus)

England in das südlich von New York gelegene Labor der Bell-Telefongesellschaft angereist ist (Abb. 1.3). Sie debattieren über die Frage, ob Maschinen eines Tages denken, Kultur verstehen, Musik hören, ja vielleicht sogar das Gehirn nachbilden und schließlich dessen Aufgaben übernehmen können. Ihre eigentliche Aufgabe,

derentwegen sie sich treffen und die unter Geheimhaltung steht, ist allerdings, die Übertragung von alliierten und die Dechiffrierung von feindlichen Nachrichten zu verbessern. Wie sich zeigen soll, leisten beide Männer wesentliche Beiträge hierzu und weit darüber hinaus.

Vor dem Krieg 1936, hatte Turing bereits bedeutende Meriten erworben. Er stellte einen überaus kreativen Weg vor, das Entscheidungsproblem, eine offene Frage in der Mathematik, zu lösen. Dafür konstruierte er eine „Gedankenmaschine“, ein virtuelles Gebilde, das es nur auf dem Papier gab, und zeigte mit ihr, dass es damals keine positive Antwort auf dieses Problem gab (Turing 1936). Grundsätzlich existieren Probleme, die ihrer Natur nach unentscheidbar sind. Dieses Entscheidungsproblem wurde 1928 von dem vielleicht einflussreichsten Mathematiker seiner Zeit, dem in Göttingen lehrenden David Hilbert, als eines von 23 zentralen Probleme der damaligen Mathematik neu formuliert. Vor Hilbert hatte sich in verwandter Form bereits Gottfried Wilhelm Leibniz im 18. Jahrhundert damit befasst. Turings Leistung war aus zwei Gründen schlicht genial. Er hatte den Beweis zur Lösung des Entscheidungsproblems erbracht, und er hatte dazu eine Maschine konstruiert. Diese Maschine wiederum war derart originell, dass sie als gedankliches Urbild aller heutigen Computer gelten kann und – fast selbstverständlich unter seinem Namen – als Turingmaschine bekannt wurde.

Alan Turing wurde mit Kriegsbeginn von der britischen Regierung auf die Entschlüsselung der deutschen Chiffriermaschine Enigma angesetzt. Die Enigma – griechisch für „das Rätsel“ – war derartig ausgereift, dass sich das gesamte deutsche Militär auf sie verließ und die Alliierten lange Zeit in der Tat vor einem Rätsel standen. Ihre aufwendigste Variante wurde von der deutschen Marine im U-Boot-Krieg, der besonders im Nordatlantik tobte und den gesamten alliierten Nachschub gefährdete, genutzt. Um die Enigma dennoch zu enträtseln bzw. zu entschlüsseln, hatte man nördlich von London, etwa auf halbem Weg zwischen den Akademikerzentren Cambridge und Oxford, in Bletchley Park, ein umfangreiches Labor eingerichtet. Turing startete seine Arbeit dort am Tag nach der Kriegserklärung Englands. Er war für Hütte 8 und damit für die Entschlüsselung der Enigma-Version der deutschen Marine verantwortlich. Das Ziel der Arbeiten in Bletchley Park war es, die Kommunikation der deutschen U-Boote abzuhören und so die Verluste der Alliierten an Schiffen auf dem Atlantik zu reduzieren. Schließlich gelang dies auch, nachdem einige Exemplare der Enigma und Codebücher aus aufgebrachten U-Booten geborgen worden waren.

Bei seinem Besuch in den USA hatte Turing Regierungsstellen in Washington dazu gedrängt, die Lieferung von Baugruppen, sogenannten „Bomben“, für seine Entschlüsselungsanlagen in Bletchley Park zu beschleunigen. „Bomben“ deshalb, weil diese Rechenmaschinen tickende Geräusche von sich gaben. Nicht wenige Menschen meinten später, Turings elektronische Bomben hätten mehr zur Beendigung des Krieges beigetragen als die nuklearen Bomben, die Hiroshima und Nagasaki zerstörten.

Alan Turing ging mangels präziserer Informationen von einer praktisch unendlich großen Anzahl infrage kommender Codes aus, die mit einer Enigma generiert

werden konnten. Aus seinen Analyseergebnissen konnte er ein rudimentäres Bild davon gewinnen, was die Enigma tatsächlich an Codes produzierte. Schließlich fand er noch einen Mechanismus, die aus dem deutschen Funkverkehr aufgenommenen Codes strukturell zu analysieren. Als dann dem britischen Geheimdienst Verzeichnisse mit „Wetterkurzschlüsseln“ in die Hände fielen, war der zentrale Schlüssel bald gefunden und die entscheidende Wende im Seekrieg ermöglicht. Aufgrund der hohen Geheimhaltungsstufe, die das gesamte Projekt in Bletchley Park nebulös erscheinen ließ, blieb auch die große kryptografische Leistung von Turing und seinen Kollegen lange Zeit recht unbekannt und wurde selbst viele Jahre später noch völlig unterschätzt.

Alan Turing fand in Claude E. Shannon einen Gesprächspartner, der gleichfalls wegweisende Gedanken verfolgte. 1936, als Turings „On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem“ erschien, schloss Shannon gerade seine Master-Arbeit am Massachusetts Institute of Technology, dem MIT, ab (Shannon 1936). Mit seiner darin definierten „Schaltalgebra“ wurde er zum Mitbegründer der Digitaltechnik. Er zeigte nämlich, dass die prinzipiellen Eigenschaften von elektrischen Serien- und Parallelschaltungen – von Schaltern und Relais – mit der zweielementigen Booleschen Algebra besonders gut beschrieben werden können.

Shannon trug in jenen Tagen auch wesentlich zur Verbesserung der Verfahren zur Verschlüsselung von Daten, der Kryptografie, bei. In seinem Aufsatz „A Mathematical Theory of Cryptography“ definierte er die Grundlagen für die mathematische Kryptografie (Shannon 1948). Dieser Beitrag blieb zunächst geheim und wurde schließlich 1949 unter dem Titel „Communication Theory of Secrecy Systems“ im *Bell System Technical Journal* veröffentlicht (Shannon 1949). Aufgrund dieser Arbeit konnte man von mechanischen Verschlüsselungssystemen Abschied nehmen und stattdessen Elektronik, die auf den Anwendungen mathematischer Verfahren beruhte, einsetzen.

Bekannt wurde Shannon jedoch vor allem durch seine Auseinandersetzung mit dem Wesen von Information in Kommunikationsnetzen, also seiner „Informations- und Kommunikationstheorie“. Shannon schaffte es 1948 erstmals, Information formal zu definieren und quantitativ zu erfassen. Er gab dabei der kleinsten Informationseinheit auch ihren Namen: Bit. Das heute so geläufige Wort steht für „binary digit“, also Binärzahl. Ein Bit repräsentiert eine zweiwertige Maßeinheit wie „ja/nein“, „aus/ein“, „fahren/anhalten“, „Kopf/Zahl“ etc. Shannons Theorie machte Information handhabbar, exakt fassbar, kontrollierbar und präzise.

Auch von ihrem Wesen her müssen sich Shannon und Turing gut entsprochen haben. Der zuweilen exzentrische britische Mathematiker und der eher philosophisch veranlagte Ingenieur, wie Turings Biograf Andrew Hodges sie charakterisierte, bewegten sich beide auf einer inspirierenden Gesprächsebene (Hodges 1983). Sie waren dabei, mit ihren Visionen, Einsichten und Konzepten die Welt zu verändern, auch wenn sich dies für sie selbst vielleicht noch gar nicht klar abzeichnete. Konkret gesagt – mit ihnen begann die Umwandlung der Industriegesellschaft in eine Informationsgesellschaft.

Diese Einschätzung ist – auch wenn sie nicht die Einzigen waren, die für die großen Umwälzungen der damaligen Jahre Beiträge leisteten – sicher nicht übertrieben. Was das skizzierte Gespräch betrifft, nun ja – vielleicht waren die beiden bei ihren wiederholten Kantinengesprächen auch mit ganz anderen Themen beschäftigt, mit Themen, die ihnen durch ihre jeweiligen Regierungen gesetzt worden waren. Das wissen wir nicht so genau. Ein solches Thema könnte z. B. ein geheimes Projekt gewesen sein, in dem damals ein Verfahren zur sicheren Übertragung von Telefongesprächen entwickelt wurde. Der Wunsch, Telefonate vertraulich führen zu können war angesichts intensiver Spionage an allen Kriegsfrenten verständlicherweise stark ausgeprägt. Und tatsächlich wurde in dieser Zeit die erste Sprachübertragung unter Verwendung des Pulse-Code-Modulation(PCM)-Verfahrens entwickelt. Hierbei werden zu übertragende Audiosignale in Zahlen verwandelt und diese dann als elektrische Signale übertragen. Dies ähnelt sehr der heutigen digitalen Repräsentation von Audiosignalen in Mobiltelefonen, CD-Playern oder Computern. Die Digitalisierung der Welt hatte endgültig begonnen.

1.2 Interdisziplinär vom Anfang an

Etwa zur gleichen Zeit, 1944, schrieb der österreichische Quantenphysiker Erwin Schrödinger (1887–1961) in seinem Exilort Dublin eine Abhandlung mit dem Titel „What is Life?“. Es wurde inzwischen vielfach neu aufgelegt, auch unter dem deutschen Titel „Was ist Leben?“ (Schrödinger 1989). Schrödinger setzte sich darin mit einem ganz anderen Forschungsbereich als seinem eigentlichen auseinander. Ihn interessierten komplexe Moleküle, die ihm geeignet schienen, Erbinformationen zu tragen und weiterzugeben. In diesen Molekülen, so schrieb er, seien die Gene als Träger der Erbinformation enthalten. Gene hätten als zentrale Aufgabe das Speichern und das Weiterreichen dieser Informationen, damit der Ordnungszustand, den das Leben in einem Organismus erreicht hat, in der Folgegeneration neu entstehen kann. Erwin Schrödinger sah voraus, dass sich die Vererbung als molekularer Prozess herausstellen würde. Seine Weitsicht sorgte dafür, dass sein Buch auch heute noch aktuell ist.

Schrödinger (Abb. 1.4) war eine zentrale Figur der Quantenphysik und setzte mit der nach ihm benannten Wellengleichung eine der einflussreichsten und zugleich rätselhaftesten mathematischen Formeln der Physik in die Welt. Seine Schrödinger-Katze, ein Gedankenexperiment, mit dem er die vermeintlichen und tatsächlichen Absurditäten der Quantenphysik illustrierte, erlangte regelrechten Kultstatus. Sowohl dieses berühmte Gedankenexperiment als auch die – bis heute nicht frei von Kontroversen vorgenommene – Interpretation seiner „Schrödingergleichung“ führten schließlich dazu, dass unser grundsätzliches Verständnis von Realität in Frage gestellt wurde. Beispielsweise entstanden hieraus die viel diskutierten Multiversen, denen die Annahme zugrunde liegt, dass jeder Übergang von einem Quantenzustand in die „Realität“ zur augenblicklichen vollständigen und realen Aufspaltung der Welt in unterschiedliche Welten führt – im Katzenex-



Abb. 1.4 **a** Das Bild zeigt Schrödinger etwa im Jahr 1933. (© dpa/picture-alliance), **b** Das Foto von Delbrück entstand Anfang der 1940er-Jahre. (Jonathan Delbrück/Wikimedia Commons)

periment von einer Welt mit einer lebenden Katze in eine mit einer lebenden und einer toten Katze. Die Quantenphysik erzwingt es, die Existenz sich wechselseitig ausschließender Möglichkeiten anzunehmen, was in der klassischen Physik nicht erlaubt ist. Aristoteles Forderung, dass dieselben Attribute nicht zur selben Zeit zu einem Subjekt gehören und zu ihm nicht gehören können, müssen wir aufgeben, oder das moderne physikalische Verständnis von der Realität, der Raumzeit und auch der Information, zurückweisen (Arndt et al. 2009). Davon später mehr.

Schrödinger und Delbrück

Darüber hinaus führte Erwin Schrödinger den Begriff der negativen Entropie ein. Der Begriff „Entropie“ ist aus dem altgriechischen Wort „entrepein“ für „umkehren“ abgeleitet. Leben verstand Schrödinger als einen Prozess, der negative Entropie (Negentropie, wie sie später genannt wurde) aufnimmt und speichert. Dies schafft, so die daraus folgende Argumentation, die wir später vertiefen werden, aus Unordnung neue Ordnung und Strukturen. Interpretiert man die sogenannte negative Entropie als ein Maß für Ordnung, ist man vom Begriff der Information, die oft mit Negentropie gleichgesetzt wird, nicht mehr weit entfernt. In der Tat, so betont Ernst Peter Fischer, fand mit Schrödinger die Idee der Information Ein-

gang in die Biologie und eröffnete in der Mitte des 20. Jahrhunderts einen neuen Zugang zur Analyse der Ordnung von Lebewesen (Schrödinger 1989).

Und noch ein Wissenschaftler muss hier erwähnt werden: Max Delbrück (1906–1981), der spätere Nobelpreisträger (Abb. 1.4). Er hatte über seinen Bruder Justus, ihre gemeinsame Schwester Emmi Bonhoeffer, deren Mann Klaus Bonhoeffer und dessen Bruder Dietrich Bonhoeffer Berührung mit Widerstandskreisen. 1937 verließ er Deutschland. Delbrück war theoretischer Physiker und wurde vom dänischen Quantenphysiker und Nobelpreisträger Niels Bohr (1885–1962) dazu angeregt, sich mit Biologie auseinanderzusetzen. In diesem Sinne war er ein Geistesverwandter von Erwin Schrödinger, der sich in „Was ist Leben?“ explizit auf Delbrücks Arbeiten bezog. Dieser setzte sich mit Genetik, speziell der Reproduktion von Viren, auseinander und schaffte so wesentliche Voraussetzungen für einen neuen Zweig der Wissenschaft, die Molekularbiologie, als deren Mitbegründer ihn Ernst Peter Fischer im Vorwort einer späteren Ausgabe von Schrödingers einflussreichem Buch über das Leben (Schrödinger 1989) einordnet. Nach dem Krieg besuchte Delbrück Deutschland und übte erheblichen Einfluss auf die Richtung der wissenschaftlichen Forschung aus. Unter anderem gründete er das Institut für Molekulargenetik an der Universität zu Köln.

Watson und Crick

Schrödinger und Delbrück wurden mit ihren Thesen nicht nur zu Mitbegründern der Molekularbiologie, sondern beeinflussten und inspirierten, wie sich später herausstellte, James D. Watson und Francis Crick (Abb. 1.5) bei ihren Forschungen. Diese führten wenige Jahre später (1953) zur Entdeckung des Aufbaus der Desoxyribonukleinsäure, DNS, besser bekannt unter der Abkürzung DNA für die englische Form *deoxyribonucleic acid*. Die dreidimensionale Struktur des DNS-Moleküls, das mit seiner Doppelhelix-Struktur an eine in sich verdrehte Leiter erinnert, wurde zu einer Ikone der Wissenschaft. Wie sich erst später zeigte,

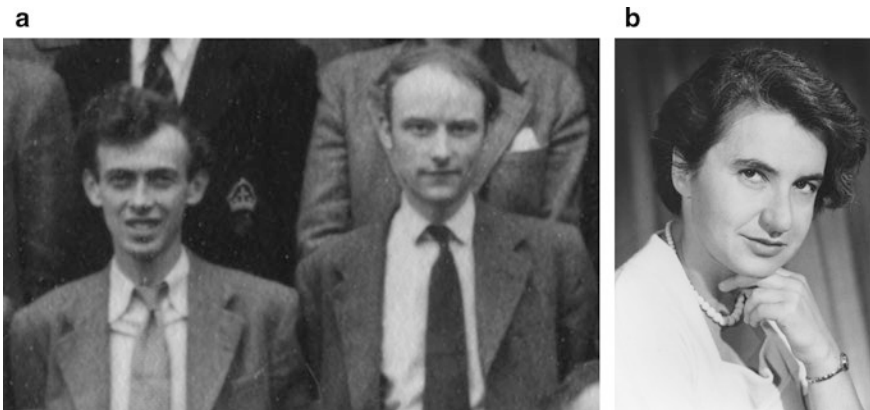


Abb. 1.5 a James D. Watson, Francis H. C. Crick. (© Wellcome Library for the History and Understanding of Medicine, London), b Rosalind Franklin. (Mit freundlicher Genehmigung von Jenifer Glynn/NLM, US)

waren die Erkenntnisse aus der Shannonschen Informationstheorie sehr nützlich, um die Vorgänge der biologischen Informationsverarbeitung, insbesondere in der Vererbung und damit in den DNA-Molekülen, zu verstehen. Ebenfalls als sehr nützlich hatten sich die Daten der Untersuchungen zur Doppelhelix-Struktur der DNA von Rosalind Franklin (Abb. 1.5) erwiesen, einer jungen britischen Wissenschaftlerin, deren Erkenntnisse Watson und Crick – ohne jedoch Franklins Erlaubnis einzuholen – für ihre Untersuchungen freizügig verwendeten (Ulrich 2015).

An dieser Stelle wird eine hochinteressante Querbeziehung zwischen Shannon und Turing, Delbrück und Schrödinger sowie Watson und Crick sichtbar. Sie erstreckt sich von den Informationswissenschaften über die Quantenphysik bis hin zur Molekularbiologie und damit zur Evolution. Diese Art Brücke mit ihren sie stützenden Pfeilern spannt im Folgenden den inhaltlichen Bogen dieses Buches. Die sechs Wissenschaftler waren Zeitgenossen, um die herum Wissenschaft und Technik mit ihren Entdeckungen und Hypothesen geradezu „brodelten“. Nicht jede Entwicklung, wie z. B. die vom Transistor (1954) oder die des ersten Computers, der nach den Prinzipien John von Neumanns arbeitete, erschloss sich damals den Menschen sofort in ihrer ganzen Bedeutung. Die Jahrzehnte vor, während und nach dem Zweiten Weltkrieg waren jedoch – obwohl von undenkbarem Grauen und nie gekannten Verbrechen gekennzeichnet – eine wissenschaftlich ungemein innovative Zeit.

1.3 Information, ein unverzichtbarer Begriff bei der Suche nach Bedeutung

Es dauerte nur wenige Jahrzehnte nach Shannons und Turings Arbeiten, bis sich in den 1970er-Jahren eine neue Wissenschaft, die Informatik, herausbildete. Ihre Anwendungsfelder liegen in nahezu allen Lebensbereichen und sie erweitern sich bis heute in großer Geschwindigkeit. Ähnlich schnell, wenn auch zunächst weniger spektakulär, entwickelte sich die Mikrobiologie, deren Start wir mit Delbrück, Schrödinger, Watson und Crick in Verbindung bringen.

Trotz – oder wegen – des schnellen Fortschritts der Informationstechnologie und der Mikrobiologie empfanden die beteiligten Wissenschaftler und Entwickler es zuweilen als unbefriedigend, dass das zentrale Objekt der Informatik, die Information selbst, nicht hinreichend klar definiert war.

Die Antworten auf die Frage nach dem Wesen der Information fallen jedoch bis heute überraschend vage aus. Sie sind beunruhigend vielfältig und teilweise widersprüchlich. Wissenschaftler in der Informatik, wie auch in den anderen Natur-, Struktur- und Geisteswissenschaften, konnten sich bisher nicht auf ein konsistentes und umfassendes Verständnis, geschweige denn auf eine Definition der Information einigen.

1.3.1 Information – ein „Stoff“ und viele Meinungen

Einen konzeptionellen Meilenstein in diesem Forschungsbereich setzte Claude Shannon mit der Trennung von Informationen ohne und mit Bedeutung. Die Informationen im Sinne von Daten und Signalen können dabei als bedeutungsfreie Bits und Bytes gelten, während die Informationen mit Bedeutung in seiner Betrachtung ausgeklammert sind. Die Gleichsetzung von „Information“ mit „Bedeutung“ oder „übertragenem Wissen“ ist allerdings im allgemeinen Sprachgebrauch so fest verankert, dass die „Informationstheorie“ und ihr zentraler Begriff „Entropie“ von Anfang an für Missverständnisse in diesem Punkt sorgten.

Der amerikanische Anthropologe, Biologe und Philosoph Gregory Bateson (1904–1980) hob vor allem den dynamischen Aspekt der Information hervor (Bateson 1979). Die Information sei das, was einen Unterschied ausmache und in der Folge für einen Unterschied sorgen werde, so Bateson. So reagiert seiner Meinung nach eine Nervenzelle weniger auf einen eintreffenden Energieimpuls als auf den dadurch entstandenen Unterschied zum Zustand ohne Impuls. Der Unterschied ist also das entscheidende Merkmal, nicht das Medium, das ihn erzeugt. Ähnliches gilt auf allen Ebenen der Kommunikation. Geistige Prozesse beruhen danach wesentlich auf der Wahrnehmung von Unterschieden. Diese Unterschiede sind nichts anderes als Informationen, die das Erzeugen neuer Information anstoßen, die sich mit Informationen anderer Quellen austauschen, also Kommunikation damit betreiben. Ähnliche Prinzipien findet man, Bateson zufolge, bis hin zu den elementarsten Ebenen der Evolution.

Bei der Suche nach einer haltbaren Definition für Information stößt man auf sehr unterschiedliche Beschreibungen. So wird sie als Teilmenge von Wissen aufgefasst, die von einer bestimmten Person oder Gruppe in einer konkreten Situation benötigt wird und häufig nicht explizit vorhanden ist. Der Aspekt der Verringerung von Unwissenheit spielt also eine wichtige Rolle, und auch die Kommunikation als Transfer von Wissen. Information wird auch hinsichtlich ihrer Dynamik betrachtet und als Wissen in Aktion aufgefasst.

Andere gebräuchliche Definitionen, die unterstreichen, wie verschieden der Begriff interpretiert wird, zählt beispielsweise der Wissenschaftsautor Ernst Peter Fischer in seinem Buch zur Information auf (Fischer 2010):

- Information ist ein Muster, das mitgeteilt und wahrgenommen werden kann.
- Information ist etwas, das verstanden wird und dabei Informationen erzeugt.
- Information ist eine Botschaft, die ein Sender einem Empfänger zukommen lässt.
- Information besteht aus Bits (oder Bytes) und kann quantifiziert werden.
- Information in der Biologie meint die Reihenfolge (Sequenz) der genetischen Bausteine in einem DNA-Molekül.
- Information im Gehirn setzt sich aus Frequenzen von Nervenimpulsen und davon ausgelösten chemischen Reaktionen zusammen.

Aufgrund der Vielzahl an heterogenen Beschreibungen ist es nicht verwunderlich, dass in der Fachliteratur gerne betont wird, dass Information ein breit verwendeter und schwer abzugrenzender Begriff ist. Der so entstandene Facettenreichtum wird durch die vielen Themen, die mit ihm verbunden sind, weiter erhöht. Ganz verschiedene Struktur- und Geisteswissenschaften – im Wesentlichen natürlich die Informatik – betrachten die Informationstheorie oder die Informationswissenschaft, die Nachrichtentechnik, die Informationsökonomik oder die Semiotik als wichtige Arbeitsfelder. „Information“ kann also z. B. ein mathematischer, philosophischer oder empirischer (etwa soziologischer) Begriff sein. Eine derartige Vielfalt weckt natürlich auch das Interesse an den verbindenden Elementen und damit an einem gemeinsamen Verständnis von „Information“.

Der uruguayische Informationswissenschaftler und Philosoph Rafael Capurro hat die verschiedenen Verwendungsformen der Information analysiert. Im Resultat stellt er fest, dass der Begriff „Information“ in höchst unterschiedlichen Bedeutungen verwendet wird. Diese Uneinigkeit hat er klassifiziert und in der Konsequenz ein dreifaches Dilemma, das als „Capurrosche Trilemma“ bezeichnet wird, herausgearbeitet (Fuchs und Hofkirchner 2002):

Synonymie (genau dasselbe)

Der Informationsbegriff bedeutet in allen Bereichen dasselbe. Wären die in den verschiedenen Wissenschaften gebräuchlichen Informationsbegriffe synonym, dann müsste das, was „Information“ genannt wird, etwa auf die Welt der Steine (Physik) im selben Sinne zutreffen wie auf die Welt der Menschen (Psychologie etc.). Dagegen sprechen aber gute Gründe, die die qualitativen Unterschiede zwischen diesen Welten berücksichtigen. Diese Möglichkeit scheidet damit aus.

Analogismus (etwas ähnliches)

Der Informationsbegriff bedeutet in jedem Bereich nur etwas Ähnliches. Angenommen, die Begriffe seien analog. Welcher der verschiedenen Informationsbegriffe sollte dann das *primum analogatum*, der Vergleichsmaßstab für die übrigen sein, und mit welcher Begründung? Wäre es z. B. der Informationsbegriff einer Wissenschaft vom Menschen, müsste anthropomorphisiert werden, wenn nicht-menschliche Phänomene behandelt werden sollen. Dann würden Begriffsinhalte von einem Bereich – hier dem menschlichen – auf einen anderen übertragen, ohne zu passen. Man müsste dann beispielsweise behaupten, dass die Atome miteinander reden, wenn sie sich zu Molekülen verbinden. Dies wäre eine absurde Konsequenz. Daher kommt auch diese Möglichkeit nicht in Betracht.

Äquivokation (jeweils etwas ganz anderes)

Der Informationsbegriff bedeutet jeweils etwas anderes. Wenn die Begriffe äquivok wären, es also gleichlautende Worte für unvergleichbare *Designate* gäbe, stünde es schlecht um die Wissenschaft. Sie gliche dem Turmbau zu Babel, die Disziplinen könnten nicht miteinander kommunizieren, so wie Thomas Kuhn das auch von einander ablösenden Paradigmen annimmt. Die Erkenntnisobjekte wären