

Daten, Prozesse und Information

R. Schaback

Version January 30, 2016

Im Anschluß an den Artikel *Definitionen von Information* [17] in diesem Band soll hier ein Weg skizziert werden, zu einem möglichst breiten Informationsbegriff zu kommen, obwohl, wie schon a.a.O. zitiert, C.E. Shannon 1953 feststellte:

“It is hardly to be expected that a single concept of information would satisfactorily account for the numerous possible applications of this general field.” [18]

In diesem Beitrag wird *Information* als Zustandsänderung eines *Prozesses* definiert, die durch *Daten* bewirkt ist. Dazu sind im wesentlichen nur die Begriffe *Daten* und *Prozeß* zu definieren. Von Ereignissen, Entropie, Algorithmen, Komplexität, *beliefs*, Interpretation und Semantik braucht man nicht zu reden, diese Begriffe sind nachgeordnet.

Eine Reihe von Beispielen zeigt, wie sich dieser Informationsbegriff in verschiedenen Disziplinen anwenden läßt und wie er die anderen Begriffe von Information subsumiert. Das ist eine Möglichkeit, die Arbeit der Akademiekommission ‘Die Natur der Information’ zusammenzufassen.

1 Definitionen

Definition 1

Daten *sind* Strukturen, *entweder auf einem* physikalischen Medium *oder* abstrakt, *z.B. als Werte mathematischer Variablen.*

Sie können zeitlich und räumlich variabel sein. Um nicht in eine infinite Rekursion von Definitionen zu kommen, bleiben die Begriffe *Struktur*, *abstrakt* und *physikalisches Medium* undefiniert, ebenso wie Raum und Zeit.

Definition 2

1. Ein Prozeß ist ein Objekt, das Zustände hat und in zeitkontinuierlicher oder diskret sequentieller Abfolge Änderungen dieser Zustände im Rahmen eines Repertoires an möglichen Zuständen zuläßt.

2. *Ferner hat ein Prozeß eine Umgebung als Kollektion von Daten.*
3. *Der Prozeß hat eine Eingabe und eine Ausgabe. Er kann Daten aus der Umgebung als Eingabe verwenden, und er kann Daten aus der Umgebung als Ausgabe verändern, ebenso sich selbst.*
4. *Ist ein Prozeß P in einem Zustand Z , so wählt er mit gewissen Wahrscheinlichkeiten Daten aus der Umgebung aus, deren Eingabe dann mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit zu einem Zustandsübergang $Z \rightarrow Z'$ führt.*
5. *Jeder Zustandsübergang $Z \rightarrow Z'$ führt mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit Änderungen an Daten der Umgebung durch.*
6. *Die oben genannten Wahrscheinlichkeiten hängen von Z und von früheren Zuständen des Prozesses und von den eingegebenen Daten ab.*
7. *Jeder Zustandsübergang $Z \rightarrow Z'$ führt mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit Änderungen dieser Wahrscheinlichkeiten und an dem Repertoire der Zustände des Prozesses durch.*

Diese Definition lehnt sich eng an die der *Automaten* der Informatik an [9]. Sie erhalten eine Folge von Zeichen als Eingabe, und dadurch werden Zustandsübergänge ausgelöst. Automaten wie die *Turingmaschine* erlauben es, Begriffe wie *Algorithmus* oder *Komplexität* mathematisch sauber zu fassen, und definieren eine sehr wichtige Klasse von Prozessen. Ihre Prozeßumgebung besteht nur aus je einem Schreib- und Leseband. Genaueres über Turingmaschinen und ihren Einfluß auf die Modellierung von Kognitionsprozessen findet man in [12] in diesem Band.

Weil Prozesse im Sinne der Disziplin *Betriebssysteme* der Informatik deutlich komplexere Umgebungen haben, wurde dieser nützliche Begriff auch hier verwendet. Die Umgebung eines Prozesses kann man als den Teil einer allgemeinen 'Umwelt' verstehen, zu dem der Prozeß überhaupt in Kontakt treten kann. Prozesse können sich selbst und die Umwelt verändern, letztere aber nur durch ihre Ausgabe. Die Daten der Umwelt können laufend durch parallel ablaufende Prozesse verändert werden. Konkurrenz und Adaptation sind möglich. Eine direkte Kommunikation zwischen Prozessen wird nicht angenommen. Stattdessen tauschen Prozesse Daten über die Umwelt aus, wie bei Schallwellen, Post und Telefon.

Determinismus liegt vor, wenn die genannten Wahrscheinlichkeiten immer Null oder Eins sind. Indem man gewisse Wahrscheinlichkeiten auf Null setzt, kann man z.B. Ausgabe oder Eingabe unterbinden.

Definition 3 Gegeben sei ein Prozeß P im Zustand Z und ein Datum D aus der Prozeßumgebung $U(P)$. Die Information des Datums D in bezug auf den Prozeß P im Zustand Z besteht aus den sämtlichen durch Eingabe von D bewirkten Änderungen am Prozeß und seinem Zustand.

Letzteres betrifft

1. die möglichen Zustandsübergänge $Z \rightarrow Z'$ von P bei Eingabe von D und die Eintretenswahrscheinlichkeiten dieser Zustandsübergänge,
2. alle Änderungen am Prozeß selbst, d.h.
 - Veränderungen am Zustandsrepertoire und
 - Veränderungen an den Übergangswahrscheinlichkeiten.

Information ist ein Attribut eines Eingabedatums, aber relativ zum Prozeß und seinem aktuellen Zustand. Es gibt keine prozeß- und zeitabsolute Information.

Es kann sein, daß ein Prozeß P in einem Zustand Z ist, in dem das Datum D nur mit Wahrscheinlichkeit Null zur Eingabe benutzt wird. Dann hat D keine Information in Bezug auf P und Z , und dies ist ein Beispiel für die Prozeßrelativität von Information. Das Datum wird 'nicht zur Kenntnis genommen', der Prozeß ist in diesem Zustand 'auf D unaufmerksam' oder 'nimmt D nicht wahr'. Ignorierte Daten haben keine Information.

Um nicht einen versteckten Interpretationsprozeß anzunehmen, der aus einer Ursache eine Wirkung macht, wird Information nicht als etwas definiert, was eine Änderung 'bewirkt', sondern mit der Änderung selbst gleichgesetzt. Das *Eingabedatum* bewirkt etwas, nicht die Information, die diesem Datum relativ zum Prozeß und seinem aktuellen Zustand zukommt. Die durch das Eingabedatum ausgelöste Veränderung von Zuständen *ist* die Information.

Information verändert deshalb auch nicht die Umgebung. Das tun nur Prozesse, auf Grund der Informationen in den Eingabedaten.

Wenn zwei Eingabedaten D_1 und D_2 in bezug auf den Prozeß P im Zustand Z dieselben Änderungen zur Folge haben, haben sie dieselbe Information, auch wenn sie verschieden sind.

Definition 4 *Das Verhalten eines Prozesses in jedem Zustand Z und bei jedem Eingabedatum D ist festgelegt durch eine prozeßinterne abstrakte Datenstruktur $R_P(Z, D)$, die als interne Repräsentation des Prozesses bezeichnet wird. Bei nichtdeterministischem Verhalten des Prozesses sind die entsprechenden Wahrscheinlichkeiten Bestandteil der internen Repräsentation.*

Die Information eines Datums D in bezug auf den Prozeß P im Zustand Z besteht dann aus der durch D bewirkten Änderung $R_P(Z', D') \rightarrow R'_P(Z', D')$ der internen Repräsentation des Prozesses, für alle möglichen Folgezustände Z' und Eingabedaten D' .

Die *internen Repräsentationen* von Prozessen sind aus den Sprach- und Kognitionswissenschaften entlehnt. Sie dienen lediglich dazu, die ‘Änderungen am Prozeß’ der Definition 3 konkreter zu verorten und der Simulation auf einem Computer Vorschub zu leisten. Die interne Repräsentation sagt dem Prozeß, ‘was zu tun ist’.

Es wird nicht behauptet, daß die hier gegebene Informationsdefinition neu sei. Zum Beispiel beginnt K. Bachmann sein Manuskript [1] mit

“In Ermangelung einer allgemein akzeptierten Definition benutze ich Information hier im Sinne von Struktur, die von einem Empfänger erkannt wird und im Empfänger programmierte informations-abhängige (“bedingte”) Reaktionen steuert. Die steuernde Einheit ist die Nachricht. Information impliziert eine selektive und subjektive Wahrnehmung und Interpretation von Strukturen, abhängig vom Empfänger.”

Hier ist zwar die Information mit den Eingabedaten gleichgesetzt, aber im Wesentlichen geht es um die dadurch bewirkte Steuerung des empfangenden Prozesses. Wie K. Bachmann mit diesem Informationsbegriff an Evolution herangeht, wird im Rahmen anderer Beispiele unten dargestellt.

2 Andere Informationsbegriffe

Die mathematische Informationsdefinition wird hier ignoriert, weil sie mit dem mathematischen Wahrscheinlichkeitsbegriff bis auf eine eindeutige Umrechnung übereinstimmt und somit wissenschaftlich redundant ist. Ebenso wird der algorithmische Informationsbegriff ausgeklammert, denn er beschreibt Komplexität, nicht Information.

Wie bei der bayesianischen Informationsdefinition in [17] ist Information genau dann vorhanden, wenn sich die interne Repräsentation des interpretierenden Prozesses ändert, d.h. ein *change of beliefs* eintritt, und sie besteht aus diesem. Also ist die bayesianische Informationsdefinition ein Spezialfall.

Die semantische Informationsdefinition aus [17] rekurriert auf *Interpretation* und *Semantik*, und die Information kommt *strukturierten Daten* zu. Auch hier ist die Information ein Attribut eines Datums, aber Daten sind hier mit Strukturen synonym. Deshalb sind Daten immer *well-formed* im Vergleich zur Informationsbegriff von *Floridi*. [4]. Eingabedaten und Information sind hier immer relativ zu einem Prozeß und seinem momentanen Zustand. Wenn man den Prozeß als Interpretationsprozeß eines Eingabedatums sieht, kommen sich die Definitionen sehr nahe, aber hier ist *semantic content* nicht explizit definiert. Der Interpretationsprozeß verändert die Prozeßrepräsentation und löst gegebenenfalls eine Aktion des Prozesses durch Modifikation der Umgebung oder seiner selbst aus. Mehr ‘Semantik’ oder *meaning* ist nicht da. Im zweiten Fall könnte man im Sinne von [4] von *instructional information* reden, im ersten Fall von *factual information*, und die Modifikation betrifft entweder das ‘prozedurale Gedächtnis’ oder das ‘deklarative Gedächtnis’ im Sinne kognitiver Architekturen, vgl. [20]. Mischformen sind erlaubt, und die “Interpretation durch Aktion” aus [17] ist ein Spezialfall.

Diese Sichtweise läßt die ‘Semantik’ eines Eingabedatums mit der zugehörigen Information zusammenfallen, weil beide aus den Änderungen am Prozeß bestehen. Dadurch wird Semantik prozeßrelativ, aber das ist nicht verwunderlich. Es gibt keine absolute Semantik und kein absolutes Wissen. Beide sind immer relativ zum verarbeitenden Prozeß und sind durch die prozeßinterne Repräsentation determiniert.

Die Information verändert nur den Empfängerprozeß. Wenn man Kommunikation modelliert, ist das Versenden von Daten durch einen Senderprozeß ein Bestandteil des Senderprozesses allein, und es ist zu untersuchen, ob dieser so geartet ist, daß man ihm unterstellen kann, er habe ‘Bedeutung’ in die Daten gelegt, was ‘Bedeutung’ auch immer sein soll. Werden diese Daten zu Eingabedaten eines anderen Prozesses, und wird dieser durch diese Daten verändert, so liegt Information dieser Daten in bezug auf den Empfängerprozeß vor, und diese Prozeßänderung kann definitorisch mit einer ‘Bedeutung’ für den Empfängerprozeß identifiziert werden. So läßt sich ‘Semantik’ modellieren, aber primär nur im Empfängerprozeß.

Den hier vorgestellten Informationsbegriff kann man nicht transitiv verwenden wie in

“If A carries the information that B , and B carries the information that C , then A carries the information that C ” [2]

weil er nur aus der Wirkung eines Eingabedatums auf einen Prozeß besteht und sonst nichts. Was das Eingabedatum mit anderen Dingen, Objekten oder Sachverhalten zu tun hat, ist irrelevant. Der Versuch, über ‘Information’ Epistemologie zu betreiben, geht bei diesem Informationsbegriff ins Leere. Man hat den Erkenntnisprozeß und seine Modifikation durch Eingabedaten zu untersuchen.

3 Beispiele

Es ist klar, daß alle Computerprogramme und alle Automaten der Informatik als Prozesse im Sinne dieses Artikels verstanden werden können. Die Semantik von Programmiersprachen wird durch die Änderung der Verarbeitungsprozesse definiert, die sie beschreiben.

Den *zellulären Automaten* liegt ein Prozeß zugrunde, bei dem die *Zellen* eines *Zellularraums* ihre Zustände in Abhängigkeit von den Zuständen benachbarter Zellen ändern, und damit lassen sich sehr komplexe Vorgänge beschreiben [14]. Man kann sogar postulieren, daß sich das ganze Universum [24] oder alle Wissenschaften [23] damit modellieren lassen.

Bei *künstlichen neuronalen Netzen* findet ein ähnlicher Prozeß statt, der aber nicht nur die Veränderung des Prozeßverhaltens, sondern auch der den Prozeß tragenden Strukturen erlaubt. Sie sind frühe Beispiele für lernfähige Systeme. Das Gebiet *Computational Intelligence* [11] ist noch sehr viel weiter gefaßt und zielt auf das inzwischen sehr erfolgreiche *Maschinelle Lernen*. Weitere Details über neuronale und allgemeinere Netze finden sich in [12] in diesem Band, bezogen auf Kognitionspsychologie und kognitive Neurowissenschaften.

In allen genannten Fällen liegen Daten und Prozesse vor, und die obige Definition von Information ist anwendbar. Die Prozesse sind sämtlich auf Computern ausführbar.

Die “informationsgesteuerte Synthese” [5] in Zellen zur Replikation von DNA oder Produktion von Proteinen ist ein weiteres Beispiel. Die Prozesse

sind biochemische Synthesen, und “jeder biochemischen Reaktion ist ein Enzym und jedem Enzym ein seine Synthese steuerndes Gen zugeordnet” [7]. Deshalb liegt die Information in den Genen, wenn es um Enzymsynthese geht, und in den Enzymen bei allgemeineren biochemischen Reaktionen.

Mikroben zeigen eine Art Sozialverhalten, ausgelöst durch chemische Signale.

“Die Antwort der Zelle auf ein Eingangssignal besteht, neben einem speziellen Verhalten, aus dem Senden eines Ausgangssignals als Input für andere Zellen” [6]

Die Information der Signale als Eingabedaten besteht genau aus den genannten Prozeßveränderungen.

Signalen a priori eine tiefergehende und prozeßinvariante Semantik zuzuschreiben, ist auch in der Ethologie eher fragwürdig als hilfreich. In der klassischen Sichtweise würde man behaupten,

1. ein Warnsignal trüge die ‘Information’, daß ein spezifischer Freßfeind anwesend sei, und zwar womöglich durch eine Intention des warnenden Tieres, und
2. ein das Signal wahrnehmendes Tier unternehme eine Fluchtreaktion, *weil* das Signal diese Information trüge.

Diese sehr anthropomorphe Schlußweise sollte nach Stegmann [19] ersetzt werden durch: Das Tier ergreift die Fluchtreaktion, weil es evolutionär oder durch Lernen dazu disponiert ist, eine Fluchtreaktion zu ergreifen, wenn es das Signal wahrnimmt. Das Signal als Eingabedatum bewirkt eine Prozeßänderung, und *diese* ist die Information, und dem Signal sollte nicht die Semantik ‘Hier ist ein Freßfeind’ unterlegt werden.

Information agents im Sinne von *Floridi* [3] sind Prozesse der hier gemeinten Art, aber auch autopoietische Systeme im Sinne von *Luisi* [13].

Der Beitrag [12] in diesem Band beschreibt detailliert das “Informationsverarbeitungsparadigma” der Kognitionspsychologie:

“Danach sind alle höheren geistigen Leistungen, über die Menschen verfügen, wie z. B. das Entscheiden, Urteilen und Problemlösen, die Aufmerksamkeit und der Wissenserwerb sowie die Gedächtnisnutzung am besten durch Prozesse der Informationsverarbeitung zu beschreiben und zu erklären.”

Dazu sind “*cognitive maps*” und “kognitive Architekturen” geeignet, und letztere “... verfügen über Wissensbasen vom eigenen System sowie über Repräsentationen von der Umwelt.” Das entspricht ziemlich genau den hier gemeinten internen Prozeßrepräsentationen, die auch in der ‘Diskursrepräsentationstheorie’ [10, 22] der Sprachwissenschaften auftreten.

In den kognitiven Neurowissenschaften stellt sich die Frage “Welche Hirnstrukturen ermöglichen kognitive Leistungen wie z. B. das Denken oder das Lernen?” [12]. Es liegen *zwei* Prozesse vor, ein biologisch-neuronaler und ein mental-kognitiver, und das Verhältnis dieser Prozesse ist das Problem. Jeder der beiden hat seine typischen Eingabedaten, die den Prozeß verändern, und die jeweiligen Veränderungen sind die jeweiligen Informationen, die den Eingabedaten relativ zu den Prozessen zukommen. Schon im Bereich der Wahrnehmung tritt dieses ‘Leib-Seele’-Problem in voller Schärfe auf, und es kann nur durch Erforschung der Parallelität der Prozesse sinnvoll angegangen werden. Das wird in [12] detailliert beschrieben.

Mentale und neuronale Prozesse sind Spezialfälle der hier vorgeschlagenen Begriffssystematik, aber es ist weder zwingend noch beabsichtigt, der Definition von Prozessen einen Positivismus oder Reduktionismus zu unterlegen, indem mentale Prozesse auf neuronale reduziert werden. Beide sind wissenschaftlich interessant, und insbesondere ihr Verhältnis zueinander. Dazu zwei konträre Beispiele.

Bereits das Studium der Wahrnehmung [15] zeigt, daß neuronale Prozesse, die eng mit den Sinnesorganen verbunden sind, auf komplexe Weise auf höhere mentale Prozesse wirken (“Sensory System” versus “Perceptual System”), die komplexe “conceptual forms (such as ‘perceptual object’, ‘surface’, ‘food’, ‘enemy’, ‘tool’, and ‘causal event’)” als Objekte verarbeiten. Ähnlich geht Treue [21] vor, indem er zunächst Wahrnehmung auf der Basis einer vom Nervensystem erzeugten Repräsentation der Umwelt entstehen läßt, und “zudem müssen dann noch Entscheidungssysteme existieren, die eine[r] zweckmässige[n] Auswahl der Handlungen des Organismus zu Grunde liegen”.

Hier ‘dienen’ die neuronalen Systeme den mentalen. Man kann aber mit Metzinger [16] auch fragen, ob die neuronalen Prozesse eine so starke Wirkung auf die mentalen Prozesse haben, daß unser mental erlebtes ‘Selbst’ ein Produkt der neuronalen Ebene sind. Jetzt beherrschen die neuronalen Systeme die mentalen.

Die mehrfach aufgeworfene Frage der Kommission nach dem Spannungsfeld zwischen Materie und Geist transformiert sich im obigen Kontext in die Frage, ob menschliches Bewußtsein sich rein auf materielle Repräsentationen im Nervensystem stützt oder andere ‘mentale’ Repräsentationen vorliegen. Man hat nach der ‘Natur der kognitiven Repräsentation’ zu fragen, wenn man Kognition sehr allgemein definiert. Und das ist ein weites Feld. Diverse Beiträge in der Kommissionsarbeit verfolgten Nervenimpulse von den Sinnesorganen in den Cortex, und es gibt offenbar gewisse Hirnregionen, die für gewisse Repräsentationen erforderlich sind, aber das ist keine Antwort auf die oben sehr prinzipiell gestellte Frage. Man hat zu untersuchen, welche Repräsentationen kognitive und neuronale Prozesse haben, und wie diese Repräsentationen korreliert sind.

In enger Anlehnung an K. Bachmann [1] kann die Anwendung des hier beschriebenen Informationsbegriffs auf Evolution damit beginnen, daß die lebenden Systeme bei ihrer Fortpflanzung auch eine Kopie ihres Prozesses weitergeben, und diese Kopien evolvieren dann. “Darwinsche Evolution ist ein unvermeidlicher Nebeneffekt des Lebensvorgangs”. Die Notwendigkeit der Lebenserhaltung zwingt die Prozesse, geeignete Rezeptoren für Umwelt-Eingabedaten zu entwickeln, “... neben den Rezeptoren, mit denen sie sich selbst interpretier[en]. Aus den Mechanismen zur Wahrnehmung und Verarbeitung von Umwelt-Information ergibt sich eine Beeinflussbarkeit von Organismen durch Nachrichten (Signale) aus der Umwelt, bei der die Kommunikation zwischen Organismen mit der Zeit in der Evolution eine immer größere Bedeutung relativ zum Einfluss der unbelebten Umwelt bekommt. Organismen werden von anderen Organismen als Ressource oder Konkurrent wahrgenommen, und das wirkt als starker Darwinscher Selektionsfaktor.”

4 Erweiterungen

Will man Leben modellieren, braucht man als mögliche Zustände eines Prozesses

1. einen ‘Gebärzustand’, der einen neuen Prozeß mit einem Standard-Zustandsrepertoire an die Umgebung abliefern, und
2. einen ‘Todeszustand’, in dem alle Wahrscheinlichkeiten Null sind.

Man kann mit K. Bachmann [1] die Vererbung als Übergabe eines Standard-Zustandsrepertoires an den neu erzeugten Prozeß sehen. Das hat Ähnlichkeit mit genetischen oder evolutionären Algorithmen [8].

Bei Prozessen als belebte Organismen ist ein Teil des Prozesses (der ‘Körper’) Bestandteil der Umwelt und deshalb für andere Prozesse als Eingabedatum möglich, d.h. ‘wahrnehmbar’. Im Todeszustand bleibt nur dieser Teil im System und ist innerhalb dessen veränderbar. Verwesung und Gefressenwerden sind modellierbar.

Prozesse, die in der Lage sind, sich selbst bzw. ihre internen Repräsentationen in der gleichen Weise wie ihre Umgebung wahrzunehmen, könnte man ‘reflektorische’ Prozesse nennen. Dann sollten kognitive Prozesse reflektorisch sein und zu einer Selbstwahrnehmung führen, die möglicherweise nicht von der neuronalen Körperwahrnehmung determiniert ist, im Gegensatz zu Metzinger [16].

5 Fazit

Dieser Ansatz vermeidet die Begriffe *Semantik* und *Interpretation*. Sie werden durch *Prozeß* ersetzt. Das kann man als billigen Taschenspielertrick sehen, der nichts erklärt. Stimmt, bei vordergründiger Sichtweise. Aber es ist wie ein Wechsel des Koordinatensystems oder des Bezugssystems in Mathematik oder Physik. Inhaltlich hat sich nichts getan, aber man sieht klarer und kann sich besser zurechtfinden. Genau wie wenn man eine neue Landkarte verwendet, die ja auch nicht inhaltlich die Landschaft verändert.

Die inhaltliche Frage nach der ‘Natur der Information’ verwandelt sich in die Frage nach Struktur und Verhalten von Prozessen, die Daten ‘von außen’ erhalten und damit irgendwie umgehen. Die verwirrende Vielfalt der Erscheinungsformen von Information wird etwas klarer benannt als Vielfalt von Prozessen, die Nachrichten ‘verarbeiten’, kognitiv, mental oder mechanisch, durch Aktion oder Zustandsänderung.

Die Analyse der einzelnen Prozesse bleibt als zentrale Aufgabe bestehen, aber der Informationsbegriff wird dabei zum Randthema.

References

- [1] K. Bachmann. Information und Evolution: Überblick. Begleitmanuskript zum Vortrag “Information und Evolution: Das C-Wert-Paradox und das Genom der Eukaryonten” in der Akademiekommission ‘Die Natur der Information’, 18.04.2008.

- [2] F.I. Dretske. *Knowledge and the Flow of Information*. MIT Press, 1981.
- [3] L. Floridi. *The Ethics of Information*. Oxford University Press, 2013.
- [4] L. Floridi. Semantic Conceptions of Information. In E.N. Zalta, editor, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <http://plato.stanford.edu/archives/spr2014/entries/information-semantic>, 2014.
- [5] H.-J. Fritz. Informationsgesteuerte Synthese - eine Blockbuster-Erfindung der Evolution. Vortrag in der Akademiekommission ‘Die Natur der Information’, 10.03.2006.
- [6] H.-J. Fritz. Nachricht und Information in der belebten Welt. Plenarvortrag in der Akademie, 21.01.2011.
- [7] H.-J. Fritz. Datenträger und informationsfluß in der Molekularen Biologie. Vortrag in der Akademiekommission ‘Die Natur der Information’, 30.03.2006.
- [8] I. Gerdes, K. Klawonn, and R. Kruse. *Evolutionäre Algorithmen: genetische Algorithmen - Strategien und Optimierungsverfahren - Beispielanwendungen*. Vieweg, Wiesbaden, 2004.
- [9] J.E. Hopcroft, R. Motwani, and Ullman J.D. *Einführung in Automaten- und Formalen Sprachen*. Pearson Studium IT, 2011. Dritte Auflage.
- [10] H. Kamp and U. Reyle. *From Discourse to Logic: Introduction to Model-theoretic Semantics of Natural Language, Formal Logic and Discourse Representation Theory*. Dordrecht, 1993.
- [11] R. Kruse, C. Borgelt, F. Klawonn, C. Moewes, G. Ruß, and M. Steinbrecher. *Computational Intelligence: Eine methodische Einführung in Künstliche Neuronale Netze, Evolutionäre Algorithmen, Fuzzy-Systeme und Bayes-Netze*. Vieweg+Teubner Verlag, 2011.
- [12] G. Lüer and U. Lass. Informationsverarbeitung in der Kognitionspsychologie und in den kognitiven Neurowissenschaften. In diesem Band, 2016.
- [13] P.L. Luisi. Autopoiesis: a review and a reappraisal. *Naturwissenschaften*, 90:49–59, 2003. DOI 10.1007/s00114-002-0389-9.

- [14] K. Mainzer and L. Chua. *The Universe as Automaton. From Simplicity and Symmetry to Complexity*. Springer, Heidelberg, 2011.
- [15] R. Mausfeld. Intrinsic Multiperspectivity: Conceptual Forms and the Functional Architecture of the Perceptual System. In W. et. al. Welsch, editor, *Interdisciplinary Anthropology*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. Begleitmanuskript zum Vortrag “Information und Bedeutung in der Wahrnehmung” in der Akademiekommission ‘Die Natur der Information’ am 18.01.2013.
- [16] T. Metzinger. *Empirische Perspektiven aus Sicht der Selbstmodell-Theorie der Subjektivität: Eine Kurzdarstellung mit Beispielen*. Selbstverlag, ePUB, EAN 9783845016177, 2015. Begleitmanuskript zum Vortrag “Körperrepräsentation, das minimale phänomenale Selbst und die Erste-Person-Perspektive: Was ist die einfachste Form von Ichgefühl?” in der Akademiekommission ‘Die Natur der Information’ am 07.06.2013.
- [17] R. Schaback. Definitionen von Information. in diesem Band, 2016.
- [18] C.E. Shannon. The lattice theory of information. *Transactions of the IRE Professional Group on Information Theory*, 1:105–107, 1953.
- [19] U. Stegmann. Information in ethology. Vortrag in der Akademiekommission ‘Die Natur der Information’, 20.04.2012.
- [20] W.H. Tack. Kognitive Architekturen. Vortrag in der Akademiekommission ‘Die Natur der Information’, 20.04.2007.
- [21] S. Treue. Die Verarbeitung von visueller Bewegungsinformation in der Grosshirnrinde. Öffentlicher Plenumsvortrag am 21. Januar 2011.
- [22] G. Webelhuth. Diskursrepräsentationstheorie. Vortrag in der Akademiekommission ‘Die Natur der Information’, 02.11.2007.
- [23] S. Wolfram. *A new kind of science*. Wolfram Media Inc., 2002.
- [24] K. Zuse. *Rechnender Raum*. Schriften zur Datenverarbeitung Band 1. Friedrich Vieweg & Sohn Braunschweig, 1969.