

Lienhard Pagel

Information ist Energie

Definition und Anwendung
eines physikalisch begründeten
Informationsbegriffs

2. Auflage

 Springer Vieweg

Information ist Energie

Lienhard Pagel

Information ist Energie

Definition und Anwendung eines
physikalisch begründeten Informations-
begriffs

2., erweiterte Auflage

Lienhard Pagel
Ribnitz-Damgarten, Deutschland

ISBN 978-3-658-31295-4 ISBN 978-3-658-31296-1 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-31296-1>

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

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2013, 2020

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 allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

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. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Reinhard Dapper

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

In diesem Buch wird ein Informationsbegriff begründet und eingeführt, der durch Objektivität und Dynamik gekennzeichnet ist und der zu einem Informationserhaltungssatz führt.

Erste Gedanken zu dieser Thematik liegen weit zurück. Während meines Studiums im Jahr 1967 habe ich begonnen, das Verhältnis zwischen Entropie und Information zu untersuchen. Anlass war eine Vorlesung über Thermodynamik, die damals für Elektrotechniker obligatorisch war. Das war ein Glücksfall.

Das Konzept dieses neuen Informationsbegriffes wurde in meinem Buch „Mikrosysteme“ [68] im Jahr 2001 vorgestellt. Nun wird der Informationsbegriff umfassender begründet und verifiziert.

Dieses Buch ist für Elektrotechniker, Informatiker und Naturwissenschaftler geschrieben. Deshalb wird die in allen drei Disziplinen verwendete, aber jeweils etwas unterschiedlich interpretierte Größe der Entropie noch einmal grundlegend beschrieben. Diese Beschreibungen mag als redundant empfunden werden. Die Entropie ist und bleibt eine zentrale Größe der Informationstheorie und damit auch dieses Buches. Auch im Bereich der Quantenmechanik werden grundlegende Zusammenhänge beschrieben, die in Lehrbüchern zu finden sind. Das gilt insbesondere für die einführenden Beschreibungen der Darstellung von Quantenbits mit dem Formalismus der Quantenmechanik und der Theorie der abstrakten Automaten. Physiker mögen diese Ausführungen überflüssig finden und können sie überfliegen. Dieses Buch soll aber für Leser aus allen angesprochenen Disziplinen lesbar sein.

Das Buch ist kein reines Lehrbuch. Aufgaben werden deshalb nicht gestellt. Für Studierende höherer Semester ist die Lektüre zur Vertiefung und zur Auseinandersetzung mit dem Informationsbegriff geeignet.

Im Wesentlichen wird das Konzept eines physikalisch begründeten und objektiven Informationsbegriffes vorgestellt, dessen Verträglichkeit mit der Thermodynamik gezeigt und dessen Nützlichkeit demonstriert. Das Buch wirft sicher mehr Fragen auf, als beantwortet werden können. Auch werden kaum Beweise geliefert. Die Argumentation folgt plausiblen Annahmen, und das nicht ohne Risiken.

Die Argumentation führt in einigen Punkten zum Widerspruch mit gängigen Auffassungen und wird deshalb zum Widerspruch herausfordern. Wenn dies den Meinungsstreit zum Thema Information bereichert, wäre zumindest ein Ziel des Buches erreicht.

Die physikalischen Grundlagen, auf die sich die Argumentation stützt, sind seit etwa 1930 oder weit davor bekannt. Das sind die NEWTONSche Mechanik, die auf der SCHRÖDINGER-Gleichung basierende Quantenmechanik, die Elektrodynamik und die Thermodynamik. Auch werden Meinungen über den Begriff Information aus diesem Zeitraum behandelt, weil sie zumindest bei Ingenieuren heute teilweise noch präsent sind.

Im letzten Kapitel werden Erkenntnisse der letzten Jahrzehnte berücksichtigt. Insbesondere wird der Blick auf den Bereich der Kosmologie erweitert.

Obwohl in diesem Buch eine Reihe von physikalischen, mathematischen, kosmologischen und auch philosophischen Aspekten angesprochen wird, ist und bleibt es doch ein Buch, das von einem Ingenieur geschrieben ist. Ich will und kann die Sicht- und die Herangehensweise eines Ingenieurs nicht verlassen, auch wenn sich die Argumentation oft auf physikalische Sachverhalte stützt. Ingenieure sind ausdrücklich eingeladen, das Buch zu lesen. Der Begriff des Ingenieurs darf hier auch im erweiterten Sinne der Ingenieurgesetze (IngG) verwendet werden, wonach sich alle Naturwissenschaftler Ingenieure nennen dürfen.

Die Formulierungen in diesem Buch sind absichtlich bestimmt und behauptend abgefasst. Ich möchte durch klar formulierte Aussagen, die gelegentlich eher als Hypothesen anzusehen sind, die Fachwelt herausfordern und zur Diskussion anregen. Auch der Titel des Buches, „Information ist Energie“, ist bewusst herausfordernd formuliert.

Das Echo auf die erste Auflage dieses Buches ist ermutigend. Es hat aber meinen Eindruck, dass bei vielen Informatikern eher Desinteresse am Thema Information herrscht, nicht ausräumen können. Die zweite Auflage ist in einigen Punkten erweitert, überarbeitet und klarer formuliert.

Im neuen Kapitel „Bewusstsein“ wird auf die Krone informationsverarbeitender Systeme, auf Systeme mit Bewusstsein, eingegangen. Einige grundlegende Eigenschaften der Logik bis zu den GÖDELSchen Sätzen haben eine hohe Relevanz zum Thema Information. Ich glaube, dass der Begriff der dynamischen Information einen Beitrag zum Verständnis des Bewusstseins leisten kann.

Letztlich möchte ich alle Wissenschaftler und besonders die Ingenieure davon überzeugen, dass Information immer dynamisch und objektiv existent ist. Ich hoffe, dass der Charme des definierten dynamischen und objektiven Informationsbegriffes überzeugt und zu dessen Anwendung und Weiterentwicklung führt.

Danksagung

Mir ist es ein Bedürfnis, allen Diskussionspartnern zu danken. Mein Dank gilt Frau Dr. Ingrid Hartmann für die kritische Diskussion zur Thermodynamik und Strukturbildung. Den Kollegen Hans Röck, Clemens Cap, Karsten Wolf und Ronald Redmer danke ich für die anregenden und kritischen Gespräche, die beigetragen haben, das Konzept zu Schärfen.

Für den Inhalt, insbesondere Fehler und Fehlinterpretationen, bin ich als Autor natürlich selbst verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1	Der Informationsbegriff – eine Einführung	1
1.1	Motivation und Ziele	1
1.2	Informatik und Information	3
1.3	Informationstechnik und Information	4
1.4	Physik und Information	8
1.5	Information in der Biologie	11
1.6	Philosophie und Information	13
1.6.1	Struktur der Information	13
1.6.2	Information über Information	16
1.6.3	Einordnung der Information	17
2	Information – physikalisch und dynamisch begründet	19
2.1	Objektivität der Information	19
2.2	Subjekt und Information	20
2.3	Informationsübertragung	21
2.3.1	Dynamik der Information	22
2.3.2	Quasistatische Information in der Computertechnik	22
2.3.3	Zeit und Raum	23
2.3.4	Energietransfer	24
2.4	Definition der dynamischen Information	25
2.4.1	Quantenmechanische Grenzen der Informationsübertragung	25
2.4.2	Die Unbestimmtheitsrelation	27
2.4.3	Phänomenologische Begründung der dynamischen Information	29
2.4.4	Parallele Kanäle	31
2.4.5	Übertragung 1 aus N	32
2.5	Darstellung von Quantenbits	34
2.5.1	Qubits – Beschreibung mit dem Formalismus der Quantenmechanik	35
2.5.2	Messung	37

2.5.3	HADAMARD-Transformation	39
2.5.4	Polarisation von Photonen	42
2.5.5	Systeme aus zwei Quantenbits.	43
2.5.6	Qbits – Beschreibung mit dem Formalismus der Automatentheorie	45
2.5.7	No-Cloning-Theorem	48
2.5.8	Quantencomputing.	49
2.5.9	Physikalische Realisierungen von Quantenbits.	51
2.6	Eigenschaften der dynamischen Information.	53
2.6.1	Dynamische Information und Quantenbits	53
2.6.2	Signal und Information	55
2.6.3	Bewertung der Entropie durch die Transaktionszeit	56
2.6.4	Bewertung der Entropie durch die Energie	56
2.6.5	Objektivität von Energie und Information.	59
2.6.6	Informationserhaltung	61
2.6.7	Vernichtung und Erzeugung von Zuständen und Teilchen	64
2.6.8	Variable Verhältnisse zwischen Information zu Energie?	65
2.6.9	Redundanz	66
3	Vergleichende Betrachtung zum Informationsbegriff.	71
3.1	SHANNONSche Information	71
3.2	Definition von JAGLOM	72
3.3	Algorithmische Informationstheorie	73
3.4	Information und Wissen.	75
3.5	Potenzielle und aktuelle Information.	75
3.6	Syntaktische und semantische Information	76
3.7	Interpretationen durch CARL FRIEDRICH VON WEIZSÄCKER	77
3.8	Die Theorie der Uralternativen	78
3.9	Pragmatische Information	79
3.10	Transinformation	80
3.11	Information in den Wirtschaftswissenschaften	80
3.12	Relationale Informationstheorie.	81
3.13	Entropie und Information.	82
3.14	Äquivalenz Information und Energie.	83
3.15	Weitere Definitionen	84
3.16	Was ist Information?	85
4	Entropie und Information	89
4.1	Entropie in der Informationstechnik – Grundlagen	89
4.1.1	Zum Begriff der Entropie.	89
4.1.2	RENYI-Information	90
4.1.3	Entropie eines Wahrscheinlichkeitsfeldes	91
4.1.4	Entropie eines Wahrscheinlichkeitsfeldes von Worten	94

4.1.5	Erweiterungen des Entropiebegriffes.	95
4.1.6	Anwendbarkeit der Entropie	96
4.1.7	Negentropie	97
4.2	Entropie in der Thermodynamik	99
4.2.1	Grundlagen der Thermodynamik.	99
4.2.2	Entropie, Energie und Temperatur.	100
4.2.3	Komponenten der Entropie: Energie und Volumen.	104
4.3	Entropie in der Quantenmechanik	106
4.3.1	Entropie der Wellenfunktion	106
4.3.2	Dichtematrix und Entropie	108
4.3.3	BRUKNER-ZEILINGER-Information	109
4.3.4	Information über einen Zustand.	109
4.4	Computer und Thermodynamik.	110
4.4.1	Übertragung bei Vorhandensein von thermischem Rauschen	110
4.4.2	Das LANDAUER-Prinzip	111
4.4.3	Reversibles Computing	113
4.4.4	Energieumsatz in Computern.	113
4.5	Entropie-Flow in der Informationstechnik.	116
4.5.1	Stationäre Information in der klassischen Mechanik.	116
4.5.2	Bits und Quantenbits	117
4.5.3	Entropie Übertragung	118
4.5.4	Entropie-Flow	120
4.5.5	Freiheitsgrade und Freiheit	122
5	Dynamische Information und Thermodynamik	125
5.1	Elementare Informationsübertragung in thermodynamischen Systemen	125
5.2	Asynchroner Energie- und Entropie-Transfer	125
5.3	Erster Hauptsatz und dynamische Information	126
5.4	Adiabatische Prozesse – Skalierung	127
5.4.1	Klassisches ideales Gas	127
5.4.2	Reale Gase	130
5.4.3	Quantensysteme.	131
5.4.4	Der Fluss von dynamischer Information bei adiabatischen Prozessen	133
5.4.5	Parallelisierung von Datenströmen	135
5.4.6	Serialisierung von Datenströmen.	141
5.5	Isotherme Prozesse – Phasenumwandlung in Festkörpern	142
5.6	Temperaturabhängigkeit der Entropie	143
5.7	Rauschen	145
5.7.1	Rauschen als Störgröße	145
5.7.2	Rauschen und Information.	146

5.7.3	Rauschquellen	147
5.7.4	Quantenmechanisches Rauschen	148
6	Irreversible Prozesse und Strukturbildung	151
6.1	Irreversible Prozesse	151
6.1.1	Zeitsymmetrie und Irreversibilität	151
6.1.2	Thermodynamisches Gleichgewicht	152
6.1.3	Irreversibilität und Objektivität	153
6.1.4	Dissipation	162
6.1.5	Informationserhaltung und Irreversibilität	169
6.2	Strukturbildung	169
6.2.1	Chaos-Theorie – Interpretation von Information	169
6.2.2	Strukturbildung und Entropie	171
6.2.3	Ordnung, Ordnungsparameter und Entropie	177
7	Bewusstsein	179
7.1	Bewusstsein und die starke KI-Hypothese	179
7.2	Bewusstsein: Überblick und Einführung	181
7.2.1	Bewusstsein im Sprachgebrauch und Abgrenzungen	181
7.2.2	Bewusstsein in der Philosophie	182
7.2.3	Bewusstsein und Information	184
7.2.4	Begrenzte Selbsterkenntnis	185
7.2.5	Ist Bewusstsein definierbar?	186
7.3	Komponenten des Bewusstseins	187
7.4	Formale logische Systeme	189
7.4.1	Definition	189
7.4.2	Widersprüche in formalen logischen Systemen	191
7.4.3	Widersprüche in Systemen mit Bewusstsein	192
7.4.4	Attraktivität widersprüchlicher Systeme	193
7.5	Der Selbstbezug in der Mathematik	194
7.6	Grenzen der Selbsterkenntnis durch Selbstbezug	198
7.7	Selbstbezug in der Elektronik	199
7.8	Algorithmische Betrachtungen	201
7.8.1	Selbstbezug in Algorithmen	201
7.8.2	Schleifen in Algorithmen	203
7.8.3	Algorithmische Anforderungen für Bewusstsein	203
7.8.4	Bewusstsein und Leben	205
7.9	Bewusstsein und Zeit	206
7.10	Zusammenfassung	207
8	Astronomie und Kosmologie	209
8.1	Relativistische Effekte	209
8.2	Lichtkegel	211

8.3	Ereignishorizont	212
8.4	Entropie Schwarzer Löcher	212
8.5	Das Weltall und seine Entwicklung	217
9	Resümee	221
	Literaturverzeichnis	223
	Stichwortverzeichnis	229

Abkürzungsverzeichnis

Bit	Wortschöpfung aus <i>binary digit</i>
CBit	Klassisches Bit in der Darstellung abstrakter Automaten
Qbit	Quantenbit in der Darstellung abstrakter Automaten
Qubit	Quantenbit
EPR	EINSTEIN-PODOLSKY-ROSEN-Paradoxon
KI	Künstliche Intelligenz
min...	Die Funktion: Minimum von
max...	Die Funktion: Maximum von
NAND	Logische Funktion des negierten ‚UND‘, Wortverknüpfung aus NOT AND
Negentropie	Kurzbezeichnung für: negative Entropie
Pixel	Wortschöpfung aus <i>Picture Element</i>
Voxel	Wortschöpfung aus <i>Volumetric Pixel</i> oder <i>Volumetric Picture Element</i>
Ur	Eine „Ja/Nein“-Entscheidung in C. F. V. WEIZSÄCKERS Ur-Theorie

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

δ	Winkel
C^2	Vektorraum
ϕ	Winkel
ϑ	Winkel
$\langle \dots $	Bra-Darstellung einer Wellenfunktion
Δ	LAPLACE-Operator
ΔE	Energiedifferenz
Δt	Transaktionszeit, allgemein Zeitintervall
\hbar	PLANCKSches Wirkungsquantum/ 2π
$ \dots\rangle$	Ket-Darstellung einer Wellenfunktion
$ \psi_{EPR}\rangle$	EPR-Wellenfunktion
λ	Wellenlänge
μ	chemisches Potenzial
μ	erwartete Rendite, Wirtschaftswissenschaften
Ω	Basismenge
ω	Kreisfrequenz, elementares Ereignis
Φ	Wellenfunktion
Ψ	Wellenfunktion
Σ	Symbol für Summe, Menge von Untermengen
σ	Volatilität eines Kurses, Wirtschaftswissenschaften
τ	Zeitkonstante, Relaxationszeit
a, b, c, d	Konstanten, auch komplex
a^*, b^*, c^*, d^*	Konstanten, konjugiert komplex
C	Kondensator, Kapazität
c	Lichtgeschwindigkeit
E	Energie
G	Gravitationskonstante
g	Erdbeschleunigung
H	HADAMARD-Transformation
h	PLANCKSches Wirkungsquantum

I	Information
i	$\sqrt{-1}$
J	Drehimpuls
k_B	BOLTZMANN-Konstante
m	Masse des Teilchens
N	Anzahl von Objekten
P	Wahrscheinlichkeitsmaß
p	Impuls, Wahrscheinlichkeit, Investmentvektor
p	Wahrscheinlichkeit
R	elektrischer Widerstand
S	Entropie
S	Summe von Momenten, Wirtschaftswissenschaften
S_H	BEKENSTEIN-HAWKING-Entropie
SF	Entropie-Flow
T	Temperatur, Zeitintervall
t	Zeit
T_H	HAWKING-Temperatur
U	Potenzial
V	Volumen
v	Geschwindigkeit
w	Wahrscheinlichkeit
Z	Anzahl möglicher Zustände



Zusammenfassung

In diesem ersten Kapitel werden die Ziele dieses Buches formuliert. Der heutige Umgang mit Information in der Informationstechnik wird im Überblick dargestellt. Ausgehend von der Situation bezüglich der Definition von Information in den Fachgebieten der Informatik, der Informationstechnik, der Physik und der Philosophie werden Defizite sichtbar gemacht.

1.1 Motivation und Ziele

Unsere Epoche wird gerne als „Informationszeitalter“ bezeichnet. Ständig fließen Informationen fast überall¹. Es scheint, dass nie mehr Informationen ausgetauscht worden sind als heute. Ein wesentlicher Grund für diese Entwicklung sind technische Fortschritte im Bereich der Elektronik und insbesondere der Mikroelektronik. Die Fertigungsverfahren der Mikroelektronik gestatten die Fertigung von Millionen Transistorfunktionen zum Preis von wenigen Cent. Damit werden auch komplexe Informationsverarbeitung und -übertragung bezahlbar und sind in der Folge dessen zumindest in den Industriestaaten allgegenwärtig.

Die Auswirkungen der Computer und vor allem deren Vernetzung auf unser tägliches Leben sind unübersehbar. Unser Wohlstand ist ganz wesentlich durch die Informationstechnik und vom Informationsaustausch geprägt. Die Tatsache, dass je Haushalt in den meisten Fällen mehr als 10 Mikrocontroller oder Computer in Betrieb sind, deren Leistungsfähigkeit sich nicht hinter Großrechnern der fünfziger Jahre des letzten Jahrhunderts verstecken müssen, zeigt, dass kühne Prognosen vergangener Jahrzehnte weit übertroffen wurden. Ob

¹Der Begriff „Information“ kommt vom lateinischen Wort „informatio“ und heißt „Vorstellung“ oder „Erläuterung“. Das Verb „informare“ bedeutet „formen, gestalten; jemanden unterrichten, durch Unterweisung bilden; etwas schildern; sich etwas denken“ [24].

Waschmaschine, Fernseher oder Auto, überall sind Computer meist als so genannte eingebettete Systeme integriert, also Mikrocontroller und komplexe Schaltungen.

Die allgegenwärtige Informationsverarbeitung und -übertragung hat nicht nur unser materielles Leben verändert, sondern auch unser Denken und Fühlen. Die Menschen haben verinnerlicht, dass technische Systeme in ihrer unmittelbaren Umgebung Informationen untereinander austauschen, oft komplexe Algorithmen abarbeiten und mit ihnen kommunizieren.

Ganz besonders die schnelle Verfügbarkeit von Informationen auch über große Entfernungen und in komplexen Zusammenhängen charakterisiert unsere Zeit. Ob der einzelne Mensch unter diesen Umständen mehr Informationen aufnimmt und ob er mehr Zusammenhänge versteht, ist fraglich. Die Menge der Informationen, die ein Mensch je Zeiteinheit aufnehmen kann, ist biologisch begrenzt.

Möglicherweise werden heute nur andere Informationen durch die Menschen aufgenommen, möglicherweise werden sie auch nur oberflächlicher interpretiert. Die Jäger und Sammler früherer Jahrtausende hatten sicher mehr Detailwissen über ihre unmittelbare Umgebung als die Menschen heute. Information und Wissen hatten für die Menschen eine unmittelbare Bedeutung für ihre Existenz, weshalb die Evolution uns Menschen mit immer umfangreicheren Fähigkeiten zur Informationsverarbeitung ausstatten musste.

Die Evolution findet heute auf einer anderen Ebene statt. Die Fortschritte auf dem Gebiet der künstlichen Intelligenz ermöglichen Kommunikation direkt mit technischen Systemen. Die Schnittstellen zwischen Mensch und Maschine passen sich immer mehr dem Menschen an. Die Leistungsfähigkeit von Algorithmen und Computern wird dort sichtbar, wo die Menschen lange Zeit glaubten, Computern überlegen zu sein. Längst gewinnen Computer beim Schach und Go gegen die Weltmeister aus Fleisch und Blut.

Ob künstliche Systeme Bewusstsein haben können und wie weit wir von künstlichen Systemen mit Bewusstsein entfernt sind, sind spannende Fragen unserer Zeit. Sie sollen in diesem Buch diskutiert werden, sie haben unmittelbar mit Information zu tun.

Die Informationstechnik ist zu einem wesentlichen Bestandteil unserer Kultur geworden. Der nicht mehr durch den Einzelnen kontrollierbare Fluss seiner persönlichen Informationen scheint ebenso ein Bestandteil unserer Kultur geworden zu sein. Dieser Kontrollverlust und sein Einfluss auf unsere Individualität und Freiheit hat nur höchst unvollständig den Weg in unser persönliches und gesellschaftliches Bewusstsein gefunden.

Es ist umso erstaunlicher, dass der Begriff der Information bisher nur unzureichend definiert ist. Der immer erfolgreicher werdende Umgang mit Information hat offensichtlich in vielen Bereichen den Blick für das Wesen der Information versperrt.

Das Anliegen dieses Buches ist es, das Wesen der Information zu diskutieren und den Begriff der Information zu schärfen.

Der verfolgte Ansatz ist weniger technisch orientiert. Die Quelle der Inspiration sind die Naturwissenschaften. Ansätze aus den Geisteswissenschaften sind unterstützend, jedoch nicht ursächlich. Sekundäre Wirkungen der Information in der Gesellschaft und Wirtschaft werden nicht betrachtet. Inwieweit der Informationsbegriff Auswirkungen auf Geistes- und Wirtschaftswissenschaften hat, wird hier nicht vordergründig diskutiert.

In diesem Buch wird die Information objektiv und dynamisch definiert. Diese Information wird dynamische Information genannt. Dieser Begriff soll nicht eine spezielle Art von Information oder besondere Interpretation der Information darstellen. Er steht nicht neben den anderen Informationsbegriffen, er soll sie ersetzen. Er definiert die Information ihrem Wesen nach.

Ausgehend vom zentralen Begriff der Entropie wird ein Bezug der Informationstechnik zur Thermodynamik und zur Quantenmechanik hergestellt. Das Verhältnis zwischen Information und Energie ist der Schlüssel zum Verständnis der Information. Die Information wird als eine im physikalischen Sinne dynamische und messbare Größe betrachtet, die unabhängig vom Menschen definiert wird und auch unabhängig existieren kann.

1.2 Informatik und Information

Die Informatik ist eine aus der Mathematik hervorgegangene Disziplin, deren Gegenstand die Information ist. Allerdings ist dieser Gegenstand bis heute auch innerhalb der Informatik unzureichend definiert. Dieser Umstand wird von den Informatikern gelegentlich beklagt. Es ist jedoch nicht zu erkennen, dass Abhilfe geschaffen worden ist.

In leicht scherzhafter Weise hat KARL HANTZSCHMANN² gesagt, dass Information das sei, womit sich Informatiker beschäftigen.

Die Informatiker befinden sich wahrscheinlich in guter Gesellschaft. C. F. v. WEIZSÄCHER schreibt unter der Überschrift „Der Sinn der Kybernetik“ in [92]:

Es gehört zu den methodischen Grundsätzen der Wissenschaft, dass man gewisse fundamentale Fragen nicht stellt. Es ist charakteristisch für die Physik ..., dass sie nicht wirklich fragt, was Materie ist, für die Biologie, dass sie nicht wirklich fragt, was Leben ist, und für die Psychologie, dass sie nicht wirklich fragt, was Seele ist,

Dieses Faktum ist wahrscheinlich methodisch grundlegend für den Erfolg von Wissenschaft. Wollten wir nämlich diese schwersten Fragen gleichzeitig stellen, während wir Naturwissenschaft betreiben, so würden wir alle Zeit und Kraft verlieren, die lösbaren Fragen zu lösen.

Der Erfolg der Informatik und auch der Informationstechnik ist wohl unbestritten. Womöglich gerade deswegen steht immer noch eine Vielzahl von sehr unterschiedlichen Definitionen für die Information nebeneinander. KLEMM hat in einem Beitrag [49] die Situation umfassend beschrieben.

Die Situation der Informatik wird auch von ROZENBERG [75] sehr treffend charakterisiert, indem er über CARL ADAM PETRI schreibt:

Petri zufolge ist es einer der Mängel der Informatik als Wissenschaft, dass sie nicht nach einem entsprechenden Gesetz, wie die Energieerhaltungssätze in der Physik, sucht. Als Naturgesetz könnte es die Entdeckung neuer Formen von Information ermöglichen. Davon unabhängig würde ein solches Gesetz zum Begriff der Informationsbilanz und deren Messbarkeit führen.

²Prof. für Algorithmen und Theorie der Programmierung an der Universität Rostock.

Man sollte nach einem Stück Informationsverarbeitung in der Lage sein, seine Bilanz zu präsentieren. Für Petri ist ganz klar, dass in der Welt der Informationsverarbeitung die Betrachtung der Informationsbilanz eine ganz normale, alltägliche Angelegenheit sein sollte, ... Ein wichtiger Grund, warum diese Tatsache in der Welt der Informatik nicht allgemein anerkannt ist, besteht darin, dass es nicht klar ist, was da bilanziert werden sollte, die Frage ist, was Information eigentlich ist. Wie Petri die Dinge sieht, ist es etwas, das mit Begriffen der Physik erklärt werden könnte, aber nicht notwendigerweise mit Begriffen der bereits vorhandenen Physik.

CARL ADAM PETRI hat offensichtlich über die Messung von Information und auch über einen Erhaltungssatz für die Information nachgedacht.

Es liegt nahe, wenn es bereits einen Energieerhaltungssatz gibt, das Verhältnis von Energie zur Information genauer zu erkunden. Es ist unübersehbar, aber dennoch nicht allgemein anerkannt, dass Energie und Information untrennbar miteinander verbunden sind.

1.3 Informationstechnik und Information

Anders als in der Informatik spielt in der Informationstechnik die Energie eine zunehmende Rolle. So ist das Verhältnis von übertragenen Informationen zum Energieaufwand für die Übertragung längst ein entscheidendes Thema. Die Leistungsfähigkeit von informationsübertragenden und -verarbeitenden Systemen ist entscheidend vom Energieaufwand oder besser von der Energieeffizienz abhängig. Strukturen der Informationsverarbeitung werden zunehmend an die energetischen Verhältnisse angepasst.

Der immer höher werdende Integrationsgrad zwingt die Entwickler immer mehr Bauelemente, die elektrische Energie in Wärme umwandeln, auf kleinstem Volumen unterzubringen. Die Wärmeabfuhr durch Wärmeleitung und Konvektion ist in vielen hochintegrierten Systemen der begrenzende Faktor für weitere Integration. Das Verhältnis von verarbeiteter Information und Energieaufwand wird zum entscheidenden Faktor für die weitere Integration und die Gestaltung von komplexen elektronischen Systemen mit hoher Funktionalität.

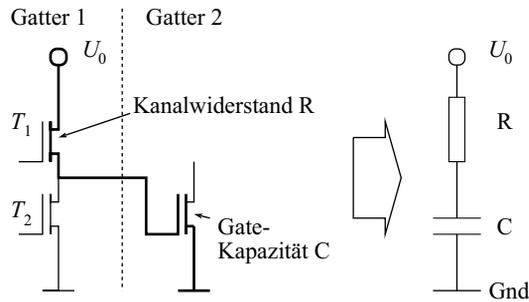
In der Informationstechnik haben Forscher und Entwickler die Energieeffizienz, also das Verhältnis zwischen übertragender Information und der dafür notwendigen Energie, längst fest im Blick.

Angesichts der Tatsache, dass das Internet weltweit mehr Elektroenergie verbraucht als Deutschland, ist ein Zusammenhang zwischen Information und Energie nicht nur von theoretischem Interesse, sondern ein bedeutender Faktor der weltweiten Energiewirtschaft.

Zur Beurteilung der Energie-Effizienz wird in der Elektronik oft das so genannte Power-Delay-Produkt (PDP) verwendet. Die elektrische Leistung, die ein Gatter für die Übertragung oder die elementare Verknüpfung von elementaren Informationseinheiten benötigt, wird mit der Verzögerungszeit, multipliziert. Die Verzögerungszeit hat ihre Ursache in verschiedenen physikalischen Effekten in den Gattern. In elektronischen Halbleiter-Systemen sind es oft Aufladungsprozesse an parasitären Kapazitäten und einfach die Laufzeit von Ladungsträgern von Eingang bis zum Ausgang eines Gatters. In der Verzögerungszeit stecken die Geschwindigkeit der Übertragung und letztlich die pro Zeiteinheit übertragene Datenmenge.

Abb. 1.1 Vereinfachte Darstellung eines Gatters als RC-Schaltung

1 Der Informationsbegriff – eine Einführung



Eine recht anschauliche Deutung des Power-Delay-Produktes ist die umgesetzte Energie $E = P \cdot \Delta t = (\Delta E / \Delta t) \cdot \Delta t$, die je übertragener Informationseinheit aufgewendet wird. Dabei geht es nicht nur um die Energie, die zur Darstellung einer Informationseinheit notwendig ist. Es geht auch nicht nur um die Energie, die von einem Gatter zum nächsten transportiert wird, sondern auch um die Energie, die notwendig ist, um diesen Transport technisch zu realisieren. Diese Energie wird meist zum größten Teil in Wärme dissipiert. Das ist, technisch gesehen, Energieverlust.

In den letzten Jahrzehnten ist die Skalierung schneller voran geschritten als die Reduzierung der Leistung je Gatter. Deshalb ist die Kühlung der Chips immer kritischer geworden.

Die Übertragung einer Informationseinheit in elektronischen Systemen kann meistens in einer einfachen Näherung durch die Aufladungen eines Kondensators modelliert und erklärt werden. In Abb. 1.1 ist U_0 die Betriebsspannung des Gatters, R symbolisiert den Kanalwiderstand des Treiber-Transistors und C ist die Eingangskapazität des folgenden Gatters, hauptsächlich die Gate-Kapazität der Eingangstransistoren. Eine Rechnung an diesem sehr vereinfachten Modell zeigt, dass 50% der am Gatter aufgewendeten Energie $\int U_0 * I(t) dt$ am Widerstand R in Wärme umgewandelt und nur 50% an das folgende Gatter übertragen werden. Leider wird bei üblichen Gattern die übertragene und in C gespeicherte Energie nicht wieder verwendet, so dass sie letztlich auch in Wärme umgewandelt wird.

Abhilfe könnte eine so genannte „adiabatische“ Schaltungstechnik sein. Prinzipiell lässt sich die elektrische Energie fast ohne Verlust von einem Gatter zum nächsten übertragen. Das wäre beispielsweise durch den Einsatz von Induktivitäten möglich. Ein prinzipielles Beispiel ist in [68] zu finden. Die Leistungselektronik hat Lösungen für dieses Problem finden müssen, weil hier 50% Verlust bei der Energieübertragung von einer Einheit zur nächsten nicht akzeptabel sind. Diese Lösungen sind allerdings wegen der nicht einfach integrierbaren Induktivitäten für hochintegrierte Schaltung nicht anwendbar. Andere Lösungen bieten sich im Bereich der Optoelektronik an. Die Übertragung von Photonen von einem Gatter zum nächsten braucht keine zusätzliche Energie.

Eine andere Deutung des Power-Delay-Produktes ist die Interpretation als Quotient aus elektrischer Leistung $(\Delta E / \Delta t)$ und Kanalkapazität $(\text{Bit} / \Delta t)$. Ein „Bit“ stellt einen

Spannungsimpuls oder besser eine übertragene Ladung dar, die mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auftritt. Die Kodierung wird in den meisten Fällen so vorgenommen, dass der Zustand „keine Ladung“ mit einer „0“ kodiert wird und „Ladung“ mit einer „1“. Bei optimaler Kodierung sind beide Zustände gleich verteilt. Deshalb beträgt bei dieser Sichtweise die mittlere Energie pro Bit nur die Hälfte der für die Übertragung der Ladung notwendigen Energie. Es kann aber auch die Polarität gewechselt werden oder die Information in der Pulslänge kodiert sein.

Abb. 1.2 zeigt für einige technische und natürliche informationsverarbeitenden Systeme das Power-Delay-Produkt. Die Darstellung zeigt die Leistung, die für den Betrieb eines Gatters notwendig ist, über der Verzögerungszeit. Sie macht den Bezug zur Kanalkapazität deutlich. Dabei ist die Energie, die eine Informationseinheit selbst darstellt, in der Leistung inbegriffen. Bei verlustloser Übertragung ist die Leistung demzufolge nicht null; sie reduziert sich auf die übertragene Leistung. An der Quantengrenze ist das die quantenmechanisch minimal notwendige Leistung.

Die Power-Delay-Darstellung zeigt nicht direkt die Verlustleistung an. Um diese zu erhalten, müsste von der übertragenen Energie der weiter verwendete Anteil abgezogen werden. Bei einer adiabatischen Schaltungstechnik würde der Leistungsverlust null sein, auch wenn viel mehr als die quantenmechanisch notwendige Energie übertragen würde.

Eine weitere interessante Größe ist das Energy-Delay-Product (EPD). Sofern damit die Energie eines Schaltvorganges gemeint ist, kann sie nach der HEISENBERG'schen Unbestimmtheitsrelation für Energie und Zeit nicht kleiner als das Wirkungsquantum sein (siehe Abschn. 2.4.2 „Die Unbestimmtheitsrelation“).

Nicht nur die Energieeffizienz in den Gattern der integrierten Schaltungen ist wichtig. Die Wechselwirkung zwischen Software- und Hardware-Design auf der Ebene der Entwicklung von Komponenten ist eine wesentliche Grundlage für den Erfolg der Informationstechnik. Gemeint ist die Verschiebung von Funktionalität von der Hardware in die Software oder auch in umgekehrter Richtung. Hier wird eine gewisse Äquivalenz zwischen Software und Hardware bezüglich Funktionalität anerkannt und genutzt. Unter Informationstechnikern ist wohl kaum vorstellbar, dass beim Umgang mit Information Energie nicht beteiligt ist. Einige Abstraktionsebenen höher sind die Potenziale noch nicht ausgeschöpft. Die Wechselwirkungen zwischen Informations- und physikalischen Strukturen sind noch unzureichend ausgebildet.

Ein Beispiel soll das zeigen: Auf dem Gebiet des Quantencomputings ist die Abhängigkeit der Informationsstrukturen von den physikalischen Gesetzen unübersehbar und dominant. Hier wird sogar die Logik durch die physikalischen Prozesse beeinflusst und bestimmt. Das betrifft die reversible Logik, die im Abschn. 2.5.6 „Qbits – Beschreibung mit dem Formalismus der Automatentheorie“ behandelt wird. Eine engere Verbindung der Informationstheorie mit der Physik der Informationsverarbeitung wird neue Möglichkeiten aufzeigen.

So wie in der Informationstechnik die Energie von Bedeutung ist, die zur Übertragung eines Bits in einer bestimmten Zeit erforderlich ist, wird die Aufklärung des Verhältnisses zwischen Energie und Information das Verhältnis von Informatik zur Physik zunehmend

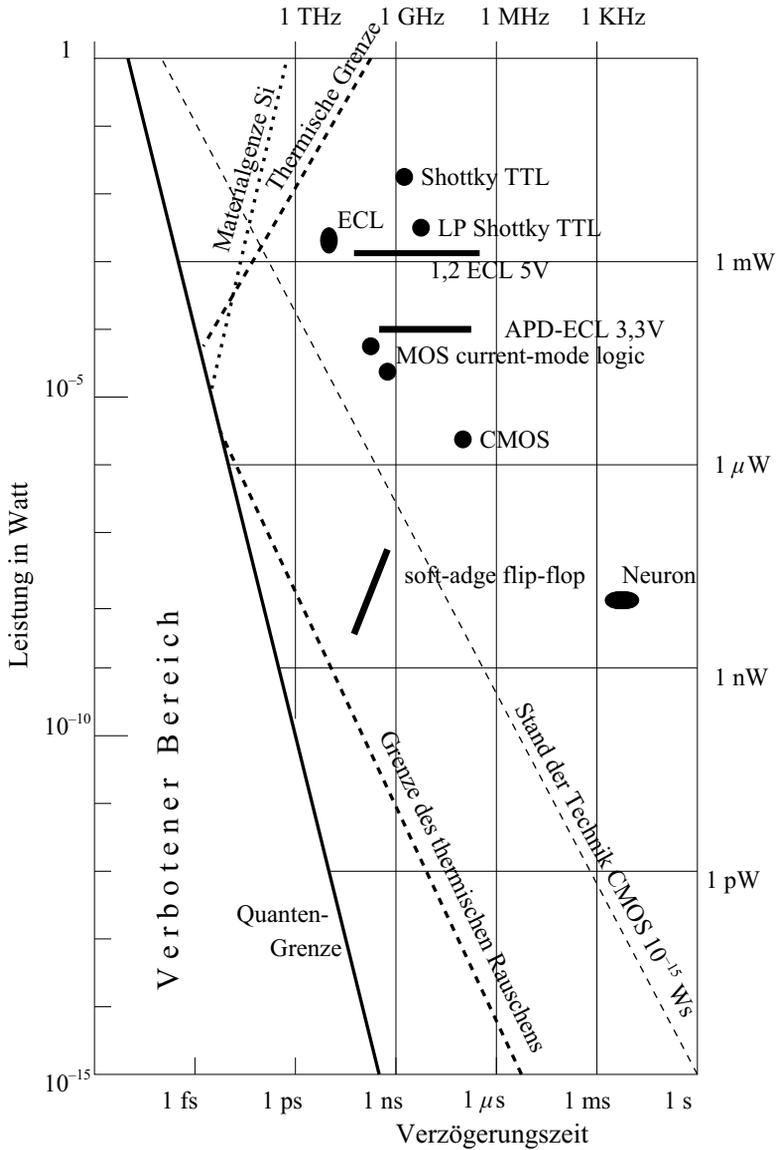


Abb. 1.2 Die Effizienz verschiedener Technologien der Informationstechnik und Elektronik im Verhältnis zum Wirkungsquantum

klären. Die Informationstechnik wird die Ergebnisse umsetzen müssen – letztlich in bezahlbare und anwendungsfähige Systeme, die von allgemeinem Nutzen sind.

1.4 Physik und Information

Es scheint, dass es aus der Physik heraus eine größere Affinität zur Aufklärung des Informationsbegriffes gibt als aus der Informatik heraus. HANS-JOACHIM MASCHECK sieht Information und Energie eng beieinander liegend. Er schreibt [63]:

Die Rolle des Informationsbegriffs in der Physik ist mit der Rolle des Energiebegriffs durchaus vergleichbar. Energie und Information sind zwei Größen, die alle Teilgebiete der Physik durchdringen, weil alle physikalischen Vorgänge mit Energieumwandlungen und zugleich mit Informationsübertragung verknüpft sind.

Hierzu steht die Aussage von NORBERT WIENER, dem Begründer der Kybernetik, dass Information grundsätzlich auch ohne Energie vorstellbar ist, in deutlichem Widerspruch. Von ihm stammt der viel zitierte Satz [94]:

Information ist Information, weder Materie noch Energie. Kein Materialismus, der dies nicht berücksichtigt, kann heute überleben.

Mit Bezug auf diese Aussage soll im Sinne einer Abgrenzung ausdrücklich festgestellt werden, dass in diesem Buch nur gesicherte Aussagen der Physik verwendet werden sollen. Irgendwelche außerhalb der heutigen Physik angenommenen Vorgänge werden nicht betrachtet und sind übrigens auch nicht notwendig. Zum Verständnis von informationsverarbeitenden Prozessen in der Technik und auch in der Biologie bis hin zum menschlichen Hirn reichen die bekannten physikalischen Grundlagen aus. Das soll nicht bedeuten, dass alles verstanden wird. Das heißt nur, dass es nicht an den grundlegenden Gesetzen der Physik liegt, sondern an deren Anwendung auf sehr komplexe Systeme und deren Interpretation.

In der Physik ist hauptsächlich die Thermodynamik mit der Entropie und der Information befasst. WERNER EBELING stellt einen direkten Bezug zur Thermodynamik her und schreibt [14]:

Die Informationsentropie ist die bei optimaler Kodierung im Mittel erforderliche Informationsmenge zur Bezeichnung der speziellen Realisierung eines zufälligen Ereignisses. Demnach ist die in Bit umgerechnete Entropie eines thermodynamischen Systems die bei optimaler Kodierung erforderliche Informationsmenge zur Angabe aller Einzelheiten eines augenblicklichen Zustands – z. B. bei einem gasgefüllten Volumen die Kennzeichnung der Lagen und Geschwindigkeiten aller Gasmoleküle mit der quantentheoretisch möglichen Genauigkeit.

Diese Betrachtungsweise geht von einem System und einem Beobachter aus, der über den Zustand des Systems informiert wird. Die Entropie eines abgeschlossenen Systems ist also die Informationsmenge, die der Beobachter erhalten muss, um über einen Zustand informiert zu sein.

Weil im klassischen Sinne Messungen des Ortes und der Geschwindigkeit mit unbegrenzt hoher Genauigkeit möglich sind, kommt dem Beobachter hier eine gewisse Willkür zu. Der

Wert der Entropie oder der Informationsmenge hängt davon ab, wie genau der Beobachter die Messungen haben möchte. Die Entropie ist also bis auf einen konstanten Betrag definiert. Eigentlich sind in der klassischen Mechanik nur Entropie-Differenzen definiert. Die Energie, die der Beobachter braucht, um Informationen über das System zu erhalten, kann im klassischen Falle beliebig gering sein. Sie kann grundsätzlich vernachlässigbar sein.

Diese Betrachtungsweise wird bei der später folgenden Begründung des Informationsbegriffes verwendet. Sie wird allerdings auch problematisch, wenn quantenmechanische Systeme betrachtet werden. Dann soll ein hypothetischer Beobachter angenommen werden, der keine Wechselwirkung mit dem beobachteten System haben soll, der physikalisch nicht realisierbar ist, weil er das System durch den Kollaps der Wellenfunktion stören würde. Dieser Beobachter erleichtert die Erklärungen, er wird allerdings später nicht mehr benötigt.

Auch EBELING sieht einen engen Zusammenhang der Information mit der Energie und der Entropie. Dazu schreibt er [15]:

Bewusst unter Vernachlässigung semantischer Aspekte vereinfachend, versteht der Physiker unter Information eine austauschbare Größe, die eng mit der Energie und der Entropie verknüpft ist und die Unbestimmtheit des Zustandes eines Systems reduziert.

EBELING macht auch Aussagen zum Wesen der Information. Er sieht sie mit Energie und Entropie auf einer Stufe. Ungewöhnlich in Sinne der üblichen Sichtweise der Informationstechnik ist die Verneinung des Unterschiedes zwischen dem Träger der Information und der Information selbst. Er meint [15]:

Obwohl der physikalische Träger und das Getragene eine unlösliche dialektische Einheit bilden, halten wir es doch für günstiger, nicht die Information als Träger und Getragenes zu definieren, weil auch die üblichen physikalischen Definitionen der Grundgrößen Energie und Entropie den Träger nicht einschließen.

Es scheint, dass hier der Begriff des Signals (als Träger von Information) in Frage gestellt wird. Denn allgemein wird „das Signal als Träger einer Information.“ [100] angesehen.

HANS-JOACHIM MASCHECK [63] sieht Parallelen zwischen der Information und der Energie als physikalische Größe. Er schreibt [63]:

Bei allen natürlichen Vorgängen sind zwei wichtige Größen beteiligt: Energie und Information. In der Thermodynamik findet das seinen Ausdruck in der Existenz von zwei Hauptsätzen. Bei speziellen Problemen kann die Energie oder die Information im Vordergrund stehen, wie z. B. bei der Leistungselektronik und der Informationselektronik. Stets aber ist der andere Partner auch präsent.

MASCHECK sieht die Information aber als einen Prozess, der zwischen Mensch und Umwelt abläuft. Er sieht die Information trotzdem als eine physikalische Größe an [63].

Die Beziehungen zwischen dem menschlichen Denken und der Umwelt erscheinen uns zunächst als reine Informationsbeziehungen. Das menschliche Gehirn ist aber ein Teil der Realität, in dem auch die Gesetze der Physik gültig sind.

In diesem Buch wird die Information definiert, ohne dass dazu ein Subjekt notwendig ist. Der Begriff „Subjekt“ ist eng mit dem Begriff Bewusstsein verbunden oder wird synonym verwendet. Der eingeführte Informationsbegriff erlaubt nun eine zwanglose Betrachtung eines Subjektes, also eines Systems mit Bewusstsein. Die Betrachtung des Bewusstseins als Eigenschaft eines informationsverarbeitenden physikalischen Systems im Kap. 7 „Bewusstsein“ schließt den Kreis.

In der Quantentheorie scheint ein pragmatischer Blick auf die Information vorzuherrschen. Viele Physiker sehen das Bit als Informationseinheit an und setzen die Entropie mit der Information gleich [35, 91]. Falls ausdrücklich nichts anderes definiert ist, so scheint es, verstehen Physiker die Entropie als Information.

Es scheint, dass aus der Sicht der Quantenmechanik die Erhaltung der Wahrscheinlichkeit³ der Wellenfunktion (siehe Abschn. 2.6.6 „Wahrscheinlichkeitsflussdichte in der Quantenmechanik“) als Begründung für die Erhaltung der Information angesehen wird. Diese Wahrscheinlichkeitsdichte (das Quadrat der Wellenfunktion) ist jedoch nicht unmittelbar mit der Information zu identifizieren. Damit ist auch nicht die Entropie gemeint. Dabei geht es wohl auch um die Erhaltung von Struktur, wenn beispielsweise ein Teilchen in ein Schwarzes Loch fällt. Im Kap. 8 „Astronomie und Kosmologie“ werden Schwarze Löcher behandelt.

Wertungen sind problematisch. Es kann aber festgestellt werden, dass in der Physik ein begründeter Zugang zum Informationsbegriff gesucht wird. Aus der Richtung der Informatik ist dies noch nicht erkennbar. Das mag daran liegen, dass die Entropie und die Information historisch eher physikalische Begriffe sind.

Schließlich kennt die Physik den Begriff Entropie seit etwa 1867. Er wurde durch RUDOLF CLAUSIUS eingeführt. LUDWIG BOLTZMANN und WILLARD GIBBS gaben 1887 der Entropie eine statistische Bedeutung. Erst ein dreiviertel Jahrhundert später fand CLAUDE CHANNON im Umfeld der Informationstheorie 1948 eine Formel 4.6 für den mittleren Informationsgehalt eines Zeichens, die mit der „thermodynamischen Entropie“ identisch ist. Die SHANNONSCHEN Entropie wird auch Informationsentropie genannt. Angesichts der längeren und umfassenderen Erfahrungen mit dem Entropie-Begriff drängt sich natürlich leicht polemisch die Frage auf, ob nicht die Physiker im Vergleich zu den Informatikern die erfahreneren Informationstheoretiker sind?

Die Physik kennt zwar keine Größe, die „Information“ heißt, aber in der statistischen Physik gibt es eben den Begriff der Entropie. Die Entropie wird in der Physik oft direkt mit dem Informationsbegriff in Verbindung gebracht. Die Entropie ist wie die Energie und die Temperatur eine grundlegende Größe zur Charakterisierung eines thermodynamischen Systems. Sie sind wohl die wichtigsten Größen der statistischen Physik.

³Hier ist die Erhaltung des Integrals über die Wahrscheinlichkeitsdichte der Wellenfunktion gemeint.