



Information ist kontextual

Matthias Weidemüller

Auszug aus dem Jahresbericht
„Marsilius-Kolleg 2012/2013“



Der sich gegenwärtig vollziehende Übergang in das Zeitalter der Information erfordert eine Neubewertung des eigentlichen Begriffs der *Information* in den Naturwissenschaften, den Geisteswissenschaften, den Sozialwissenschaften und der Kunst. Zentraler Gegenstand des Projekts „*Information*“ am Marsilius-Kolleg war die Untersuchung der Grundlagen des Informationsbegriffs in einem interdisziplinären Diskurs. Beteiligt an diesem Projekt waren Kollegen aus unterschiedlichen Wissenschaftsbereichen: der Zellbiologe Thomas Kuner, der Ökonom Jörg Oechssler, der Philosoph Anton Friedrich Koch und ich als Vertreter der Physik. Unsere Arbeit im Marsilius-Kolleg sollte sich in ergebnisoffener Weise drei zentralen Fragen zuwenden:

Information ist kontextual

Matthias Weidemüller

1. Ist der Begriff der Information als bloße Metapher zu verstehen, oder lassen sich durch ihn fundamentale Gesetzmäßigkeiten oder Modellbildungen in adäquater Weise beschreiben („Theoriefähigkeit“)?
2. Inwieweit ist der Begriff der Information an subjektive, kognitive Wahrnehmung gebunden, oder existiert eine vom erkennenden Subjekt losgelöste, möglicherweise quantifizierbare Möglichkeit, Information als eigene Größe *sui generis* zu verstehen?
3. In welcher Form wird Information in komplexen, korrelierten Netzwerken generiert und transportiert, in welchen strukturbildenden Komponenten eines Netzwerks kann Information sinnvoll kodiert werden?

Allen Beteiligten war von Beginn an klar, dass diese sehr weit gefassten Themenkomplexe sich innerhalb eines Jahres nicht umfassend würden behandeln lassen. Daher hatten wir uns zunächst auf Aspekte unserer eigenen Wissenschaftsdisziplinen konzentriert, um über diese spezifischen Fragestellungen unsere Denkansätze zu exemplifizieren und dann zu einer gemeinsamen Sprache zu gelangen. Um es vorweg zu nehmen: Wir sind auf diesem Weg nur in Zwergenschritten (oder in den Worten eines Physikers: Quantensprüngen) vorangekommen. Zu groß waren möglicherweise die gestellte Aufgabe und die Unterschiede in den Denkkulturen. Dennoch haben die vielen geistvollen Diskussionen mit den Kollegen innerhalb des Projekts, aber auch mit allen anderen Marsilius-Fellows meinen Blick auf die oben genannten Fragestellungen in einer Weise geschärft, wie ich dies in noch keinem anderen Umfeld erlebt habe.

Mein Projekt hatte den Arbeitstitel „*Information in korrelierten Vielteilchensystemen*“ und stand damit im engen Bezug zu meinen experimentellen Forschungsarbeiten zur Physik quantenmechanischer Vielteilchensysteme. Trotz intensiver Forschung in den vergangenen Jahrzehnten gibt es noch immer keine eindeutige Begrifflichkeit für die Entität *Information*. Dennoch verwenden eine Vielzahl von Wissenschaftszweigen diesen Begriff, wie z. B. die Thermodynamik, die statistische Physik, die Quantentheorie des Messprozesses, die Computer Science und die Informatik, die Wissenschaft dynamischer Systeme, die Molekular- und Systembiologie, Genetik, die Hirnforschung und die Wirtschaftslehre. Selbst die Physik tut sich schwer mit der Einführung eines eindeutigen Informationsbegriffs. Wie Wojciech Zurek in seinem Vorwort zur Monographie „Complexity, Entropy and the Physics of Information“ ausführt, gibt es „better established, but still mysterious, hints about the role of information“¹ in der Physik und benachbarten Wissenschaften: in der Analogie zwischen thermodynamischer Entropie und Claude Shannons informationstheoretischer Entropie, in der Interpretation des quantenphysikalischen Messprozesses, in der Thermodynamik schwarzer Löcher, in der Physik der Informationsverarbeitung, in algorithmischer Zufälligkeit als alternativer Definition des Informationsgehalts und in dem Verständnis komplexer Systeme. Diskussionen über die Bedeutung von Information zum Verständnis der uns umgebenden Welt nehmen teilweise ontologische Züge an, wie in John Archibald Wheelers plakativer Formulierung „It from Bit“,² oder weisen der Information die zentrale Basisrolle in Bezug auf die Naturgesetze zu, prägnant formuliert in Rolf Landauers These „Information is Physical“.³

Die vertiefte Auseinandersetzung mit dem Thema Information und die vielfältigen Diskussionen innerhalb des Marsilius-Kollegs, unter anderem auch als Reaktion auf meine beiden Vorträge „Der Begriff der Information in der Physik – Persönliche Annäherung eines Quantenphysikers“ und „It From Bit? – John Archibald Wheeler's Artikel 'Information, Physics, Quantum: A Search for Links'“, haben mich zu der Hypothese „*Information ist kontextual*“ geführt, deren weitere Ausführung und Implikationen mich sicher noch in den nächsten Jahren begleiten und mein wissenschaftliches Arbeiten beeinflussen werden. Diese These möchte ich im Folgenden verdeutlichen.

Trotz vielfältiger, teilweise gelungener Versuche, aus physikalischen Naturgesetzen Aussagen über Phänomene außerhalb des eigentlichen phänomenologi-

schen Bereichs, in dem das Gesetz gewonnen wurde, zu treffen, ist die wohldefinierte Grenzziehung zwischen einem System und seiner Umgebung eine zentrale Voraussetzung moderner Naturerkenntnis (siehe Abbildung 1). Ausgangspunkt eines jeden physikalischen, auf empirischen Befunden basierenden Modells ist die Trennung zwischen dem betrachteten Objekt (z. B. einem gespeicherten einzelnen Atom) und seiner Umgebung (z. B. der thermischen Hintergrundstrahlung und den allgegenwärtigen Fluktuationen des elektromagnetischen Felds des Vakuums). Hieraus resultiert zwangsläufig, dass die Information über das beobachtete Objekt unvollständig ist, oder, stärker formuliert, dass der Begriff der Information erst durch diese Trennung des Objekts vom „Rest“ entsteht. Eine interessante, sich in diesem Zusammenhang aufdrängende Frage ist, inwieweit und wie dieser Informationsbegriff quantifiziert werden kann, z. B. durch die kontrollierte Verschiebung der Grenzlinie zwischen dem Objekt und seiner Umgebung (im Beispiel: die teilweise Miteinbeziehung der Vakuum-Fluktuationen). Die von mir vorgeschlagene Emergenz von Information durch eine vom Beobachter vorgenommene Grenzziehung erweitert die von Jörg Oechssler im Rahmen seiner Vorträge eingeführte Definition der Information als „Signal, das (für mich) die Unsicherheit reduziert“ (Oechssler).



Abb. 1: Emergenz des Informationsbegriffs durch Trennung eines Systems (hier das „i“) vom „Rest“ (hier der blaue Hintergrund). Von zentraler Bedeutung ist der Verlauf der Grenzlinie zwischen System und seiner Umgebung sowie die eventuelle Rückwirkung des Systems auf den Rest.

Die moderne Interpretation des Maxwellschen Dämons stellt ein prägnantes Beispiel für die Bedeutung der Grenzziehung zwischen Objekt und Umgebung in Bezug auf den Informationsbegriff dar. Der Maxwellsche Dämon, der seit nunmehr über einem Jahrhundert durch die nicht nur physikalische Literatur geistert,⁴ steht für ein gedachtes Wesen, das zu jedem Zeitpunkt über vollständige Information (Ort und Impuls) zu jedem Teilchen in einem idealen Gas verfügt. Das Gas ist charakterisiert durch eine Temperatur, welche sich aus der Verteilung der Geschwindigkeiten der Gasteilchen ergibt. Eine kleine, ohne Aufwendung von Energie verschiebbare Klappe trennt den Gasbehälter in zwei Teile. Die vollständig verfügbare Information erlaubt es dem Dämon in einem Gedankenexperiment nun, die Klappe derart zu betätigen, dass die schnelleren Teilchen des Gases immer in die eine Teilkammer gelangen (und nicht wieder zurück), die langsameren hingegen in der anderen Teilkammer verbleiben. Auf diese Weise kann der Dämon das Gas in der einen Kammer abkühlen, indem er allein das Gas in der anderen Kammer erwärmt. Dieser Vorgang steht im eklatanten Widerspruch zu unserer Erfahrung (eine Cola kühlt sich spontan nie ab, indem sie ihre Wärmeenergie an die Umgebung abgibt) und dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik.

Der ständige Informationsgewinn des Dämons erfordert eine im Idealfall beeinflussungslose Messung des Systems (Gasteilchen), was zu Korrelationen zwischen dem Messgerät (Dämon) und dem zu messenden System führen muss. Hierdurch wird der Dämon zum Teil des Systems, was eine Neubestimmung der Trennung von System und Rest erfordert. Dies ist die Essenz der durch Rolf Landauer und Charles H. Bennett propagierten Auflösung des Maxwellschen Paradoxons.⁵ Die Abnahme der Entropie des Gases (durch die Abkühlung) geht einher mit der Zunahme an Information, die durch den Dämon gespeichert wird. Diese Information muss zu einem gegebenen Zeitpunkt wieder vernichtet werden. Jede irreversible Manipulation der Information ist aber zwangsläufig mit der Abgabe von Wärmeenergie verbunden, ähnlich z. B. dem Löschen eines Computerregisters. Diese Reduktion der Information erhöht also den Entropiegehalt der Umgebung („Rest“), der Dämon muss das Löschen seiner Speicherregister mit Energie bezahlen. Es kann in der Tat gezeigt werden, dass auf diese Weise der zweite Hauptsatz der Thermodynamik gerettet wird.

Aus der These, dass Information erst entsteht, wenn ein System von seiner Umgebung getrennt wird, ergibt sich automatisch die Existenz eines „Zustands-

raums“ als Parameterraum, der den Zustand des Systems vollständig charakterisiert (nicht notwendigerweise im engeren physikalischen Sinne) und der die Kodierung von Information, z. B. durch binäre Kodierung, Qubits, Sprache usw., erlaubt. Hierdurch entsteht eine Brücke zu der von Thomas Maissen im Rahmen der Diskussionen am Marsilius-Kolleg vorgeschlagenen Definition der Information als „Kommunikation, die in einem – von vielen möglichen – Zustandsräumen Sinn macht“ (Maissen). Die in jedem Erkenntnisprozess notwendige Trennung von System und dem Rest beinhaltet eine Subjektivierung (oder genauer: Kontextualisierung) des Informationsbegriffs, jedoch ist, nachdem diese Grenzziehung erfolgt ist, der Begriff innerhalb des wohldefinierten Referenzsystems objektivierbar. Schwierigkeiten entstehen zwangsläufig dann, wenn die Grenzlinie nicht eindeutig definierbar ist. Ich vermute, dass genau diese unklaren Grenzziehungen die Ursache für viele sogenannte Paradoxa darstellt. Der Maxwellsche Dämon und sein Exorzismus durch Landauer und Bennett stellen ein Beispiel hierfür dar.

Der Maxwellsche Dämon kann auch zur Exemplifizierung von Landauers Hypothese „Information is physical“⁶ dienen. Information kann nur mittels physikalischer Objekte realisiert werden. Der physikalische Zustand des Dämons muss durch den Informationsgewinn verändert werden. Allgemein ist es so, dass die Speicherung von Information die Erzeugung von Zuständen jenseits des thermodynamischen Gleichgewichts erfordert. Als Beispiel hierfür sei die Ausrichtung der Mikromagnete auf einer elektronischen Speicherplatte genannt. Im Allgemeinen sollten die Prozesse der Informationsspeicherung reversibel sein. Umgekehrt erfordert das Löschen von Information aber irreversible Prozesse unter Einsatz physikalischer Energie, die zu einer Erhöhung der Entropie führen.

Die Emergenz eines Informationsbegriffs aus der Festlegung eines Systems und der Grenzlinie zu seiner Umgebung weist Bezüge zu John Archibald Wheelers „It from bit“ auf. In seinem berühmt gewordenen Aufsatz „Information, Physics, Quantum: The Search for Links“⁷ stellt Wheeler die uns alle drängende Frage nach dem Ursprung von Existenz. Aus der Betrachtung des elementaren Messprozesses in der Quantenphysik und seiner Rückwirkung auf das betrachtete System schließt er, dass alle fundamentalen Fragen in Ja-Nein-Antworten münden müssen und dass die Annahme eines kontinuierlichen Raum-Zeit-Kontinuums auf dem mikroskopischen Niveau nicht haltbar ist. Der elementare Akt der Messung erfordert die Beteiligung eines Beobachters („observer-participancy“), der, in mei-

nen Worten ausgedrückt, die Trennung des Systems vom Rest vornimmt und erst hierdurch dem System einen sinnvollen Zustandsraum und damit verbundenen Informationsgehalt zuweist. Wheeler schließt aus dieser fundamentalen Reduktion von Realität auf elementare binäre Messprozesse, dass „every physical quantity, every it, derives its ultimate significance from bits, binary yes-or-no indications, a conclusion which we epitomize in the phrase, *it from bit.*“⁸

Im Rahmen des Projekts innerhalb des Marsilius-Kollegs war es erwartungsgemäß nicht möglich, den Begriff der Information in seiner Gänze zu beleuchten. Und für einen experimentell arbeitenden Quantenphysiker wäre es überraschend gewesen, wenn sich durch die Diskussionen innerhalb des Marsilius-Kollegs direkte Bezüge zu den laufenden Forschungsarbeiten ergeben hätten. Dennoch ist es uns zweifellos gelungen, den Begriff der Information in einem interdisziplinären Kontext aus verschiedenen Blickwinkeln neu zu betrachten. Aus der Perspektive eines Physikers ergeben sich aus der Auseinandersetzung mit diesem Thema neue, weitergehende Themenbereiche, wie beispielsweise die Frage nach Kodierung und Transport von Information in klassischen oder quantenmechanischen, korrelierten Netzwerken, oder nach den Implikationen der Konzepte der Quanteninformationsverarbeitung in nicht-physikalischen Kontexten. Und durch die Darstellung der physikalischen Denkweisen in einer (hoffentlich) allen zugänglichen Weise haben sich Bezüge zu anderen Projekten innerhalb der Marsilius-Klasse entwickelt, die im Vorfeld sicher nicht auf der Agenda gestanden hätten. Hervorheben möchte in diesem Zusammenhang besonders die intensiven Diskussionen mit den Protagonisten des Projekts „Lebertransplantation“, den Kollegen Monika Bobbert, Gerhard Dannecker und Tom Ganten, über die Interpretation von empirischen Daten und die Erstellung von sogenannten Scores. Mit diesen wie auch allen anderen Mitgliedern der Fellowklasse 2012/2013 hoffe ich auf die Weiterführung des begonnenen Dialogs. Denn schon jetzt vermisse ich die inspirierenden Montagabende des Marsilius-Kollegs.

¹ Wojciech H. Zurek: *Complexity, Entropy and the Physics of Information*, SFI Studies in the Sciences of Complexity, Vol. VIII, Addison-Wesley 1990.

² John Archibald Wheeler: *Information, Physics, Quantum: The Search for Links*, in: *Complexity, Entropy and the Physics of Information* hg. von Wojciech H. Zurek, Anm. 1, S. 3-28.

³ Rolf Landauer: *Information is Physical*, in: *Physics Today* 44 (1991), S. 23-29; Rolf Landauer: *The physical nature of information*, in: *Physics Letters A* 217 (1996), S. 188.

⁴ Koji Maruyama, Franco Nori und Vlatko Vedral: *The physics of Maxwell's demon and information*, in: *Reviews of Modern Physics* 81 (2009), S. 1-23.

⁵ Rolf Landauer: *Irreversibility and heat generation in the computing process*, in: *IBM Journal of Research and Development* Vol. 5 (1961), S. 183-191; Charles H. Bennet: *The Thermodynamics of Computation*, in: *International Journal of Theoretical Physics* 21 (1982), S. 905-940.

⁶ Landauer: *Information is Physical*, Anm. 3; Landauer: *The physical nature of information*, Anm. 3.

⁷ Wheeler: *Information, Physics, Quantum*, Anm. 2.

⁸ Ebd., S. 309.