

Das Landauer-Prinzip

Version 1.02

31.03.2014 Hartwig Thomas



<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/ch/deed.en>

Umweltbewusste Mitmenschen üben immer wieder einmal Fundamentalkritik an der Informationsgesellschaft, indem sie auf den gewaltigen Energieverbrauch der digitalen Revolution hinweisen. Ihr Anliegen ist ehrenwert und es gibt in der Informationsgesellschaft noch viel Ressourcenverschwendung, die zu vermeiden ist.

Cloud-Moratorium?

Im Bereich der Information gibt es keine immaterielle Ressourcenknappheit. Es gibt genügend geistigen Platz für alle. Eine digitale Allmend braucht keine Übernutzung des virtuellen Raums und somit auch keine Tragödie der Allmend zu befürchten. Das hat zu einem explosiven Wachstum der Informationsgesellschaft geführt, über welchem die damit einhergehenden Umweltschäden vergessen gingen. Ökologische Kritiker der Informationsgesellschaft fordern nun eine Regulierung dieses Wachstums, weil der damit verbundene materielle Ressourcenverbrauch unvermeidbar sei. So argumentiert etwa Eduard Kaeser in der Kolumne *Conditio techno-humana* der Neuen Zürcher Zeitung in seinem Artikel „[Keine Bits ohne Atome](#)“, dass jede Information auf einem materiellen Träger beruhe und somit jede Informationsverarbeitung ganz grundsätzlich physikalisch unvermeidbar zu Energieverbrauch führe. Er plä-

diert deshalb aus ökologischen Gründen für ein Cloud-Moratorium.

Diese Argumentation ist doppelt unrichtig. Einerseits verschweigt der Physiker und Wissenschaftsjournaliste [Eduard Kaeser](#) gerade die wichtigsten Resultate der von ihm angeführten Wissenschaftler, aus denen hervorgeht, dass der Energieverbrauch der Informatik rein theoretisch unter jede Grenze gesenkt werden kann. Andererseits wird die praktisch tatsächlich stattfindende Ressourcenverschwendung nicht in Bezug gesetzt zu den Einsparungen, die sie bewirkte.

Ein bisschen Physik

Wenn wir alltäglich von Energieverbrauch reden, geht oft vergessen, dass Energie physikalisch gesehen eine erhaltene Grösse ist und nie „verbraucht“, sondern nur von einer Form in die andere umgewandelt werden kann. Wenn wir eine Maschine mit Energie betreiben, verwandeln wir diese Energie in nützliche Arbeit und in Abwärme. Die in der Umwelt verstreute Wärme-Energie ist nicht mehr nutzbar und kann nicht zum Betreiben von Maschinen verwendet werden. „Verbrauch“ von Energie ist also Umwandlung von nützlicher Energie in nutzlose Abwärme. (Ganz nutzlos ist Abwärme erst dann, wenn sie sich flächendeckend verteilt hat. So kann man etwa mit der Abwärme von Computern im Winter ganze Gebäude heizen und sie so noch nützlich zum „Sparen“ von Heiz-Energie einsetzen.) Das Mass für die Nutzlosigkeit von Energie in der Physik ist die Entropie.

Information und Informationsgehalt

In den Sechzigerjahren hat der Physiker Rolf Landauer nachgewiesen, dass das Konzept der Entropie sehr eng mit dem Begriff der Information zusammenhängt, der 1948 von den für den Telefoniekonzern Bell arbeitenden Mathematikern Shan-

non und Weaver erstmals klar formuliert wurde: *Der Informationsgehalt (in Bits) einer Meldung ist der negative Zweierlogarithmus ihrer Wahrscheinlichkeit.* Das folgt aus zwei Grundsätzen.

1. Je unerwarteter (unwahrscheinlicher) eine Meldung ist, desto mehr Information enthält sie.
2. Der Informationsgehalt zweier Meldungen ist die Summe des Informationsgehalts der Einzelmeldungen.

Der Informationsgehalt einer nicht redundanten, das heisst einer optimal komprimierten Meldung entspricht somit ihrer Länge in Bits, denn der Logarithmus einer Zahl ist ein Mass ihrer Länge.

Physikalische Grenzen der Informatik

Rolf Landauer arbeitete in der Forschungsabteilung von IBM und beschäftigte sich mit der Frage nach den physikalischen Grenzen der Informationsverarbeitung. Er kam zum Schluss, dass es nur zwei wirklich „harte“ physikalische Grenzen gibt:

1. Die Übermittlungsgeschwindigkeit von Information ist immer kleiner als die Lichtgeschwindigkeit.
2. Der Energieverbrauch beim Löschen eines Bits beträgt mindestens $k \cdot T \cdot \ln 2$ (bei Raumtemperatur also ca. 2.85 zJ, wo ein Zeptojoule für 10^{-21} Joule steht).

Möglicherweise gibt eine dritte physikalische Grenze, nämlich die des Speicherplatzes, da das Universum endlich ist und wohl aus endlich vielen Atomen besteht. Da die Quantenmechanik allerdings das Rechnen in a priori unendlich vielen parallelen Universen erlaubt, ist diese Einschränkung weniger gesichert.

Das Landauer Prinzip

Beim Löschen von Information nimmt also die Entropie zu, und dabei wird Energie verbraucht. Die genaue Analyse des Paradoxon des [Maxwellschen Dämons](#), welche Landauer 1961 rund hundert Jahre nach dessen erster Formulierung gelang, führte sogar zu einer noch weitergehenden Aussage:

Das Löschen eines Bits ist die einzige Operation der Informationsverarbeitung, welche zu einem Anstieg der Entropie führen muss. Den Energieverbrauch aller anderen Operationen kann man – zum Mindesten theoretisch – unter jede beliebige Grösse senken.

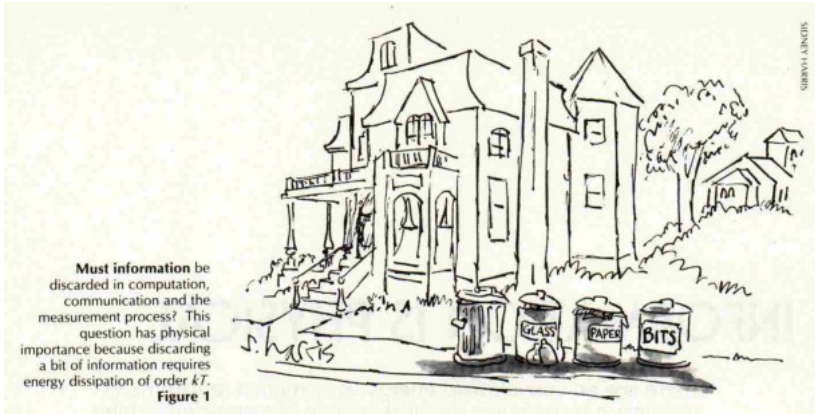
Es scheint fast so, als ob sogar die Umkehrung dieses Satzes wahr sein könnte: Jeder Energieverbrauch, jeder Entropieanstieg ist im Grunde Löschen von Information. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik, der besagt, dass die Entropie immer zunimmt, könnte dann umformuliert werden zu: Information („Bits“) kann nicht geschaffen, sondern nur gelöscht werden. Statt vom „Verbrauch“ der unvernichtbaren Energie sollten wir vom Informationsverbrauch reden. Denn den meinen wir eigentlich, wenn wir Energieverbrauch sagen.

Seit 1961 sind Rolf Landauers Theorien heute auch mehrfach experimentell bestätigt worden. Es handelt sich also nicht nur um abstrakte Hypothesen weltfremder Wissenschaftler, sondern um gut gesicherte physikalische Tatsachen.

Reversible Rechner

Es ist also nur das „Vergessen“, welches Energie „verbraucht“. Und darauf bauten dann Charles Bennet, Richard Feynman und andere Wissenschaftler auf, indem sie sich fragten, ob das Löschen von Bits für die Informatik überhaupt nötig ist.

Normalerweise wird bei jeder Computeroperation, etwa beim Addieren zweier Zahlen oder bei der logischen Kombination zweier Bits, viel Information „weggeworfen“. Statt sie zu löschen, sollten wir sie rezyklieren.



Physics Today, May 1991: Rolf Landauer "Information is Physical"

Beim Addieren zweier 32-Bit-Zahlen kommt nur eine 32-Bit-Zahl heraus, bei der UND-Kombination zweier Bits entsteht nur ein Resultat-Bit. Man könnte aber elementare Computeroperationen konstruieren, die keine Bits löschen. Zum Beispiel kann man immer gleichzeitig mit der Summe zweier Zahlen auch ihre Differenz berechnen. Oder zusammen mit der logischen UND-Verknüpfung auch die ODER-Verknüpfung zweier Bits berechnen. Dann wären die Eingangsdaten wieder aus den Resultaten rekonstruierbar und man könnte die Berechnung rückwärts laufen lassen. Solche „reversiblen“ Berechnungen vernichten keine Bits und müssten gemäss dem Landauer-Prinzip keine Energie verbrauchen. Das heisst: ihr Energieverbrauch ist zwar nicht Null, kann aber unter jede beliebige Grenze gedrückt werden.

Und das erstaunliche Resultat dieser theoretischen Analysen reversibler Maschinen:

Mit einem reversiblen Rechner, der keine Abwärme produziert, kann man alles berechnen, was man mit einer nicht reversiblen Maschine berechnen kann.

Wenn wir diese Resultate zusammennehmen, kommen wir zum Schluss, dass es – zum Mindesten theoretisch – nicht notwendig ist, den Menschen die Benutzung der Cloud zu untersagen um Energie zu sparen, wie es gewisse Fundamentalisten fördern. Vielmehr kann man mit entsprechender Technologie deren Energieverbrauch unter jede Grenze senken.

Praktische Verhältnismässigkeit

Selbst mit sehr wenig Reversibilität „verbrauchen“ heutige Computer millionenfach mehr Energie als gemäss des Landauer-Prinzips nötig wäre. Diese Abwärme sollte man aber in Relation setzen zur damit „gesparten“ Energie. Jedes E-Book „spart“ den Ressourcenverbrauch der Papierherstellung und rettet so viele Bäume und vermeidet die katastrophalen Verunreinigungen des Wassers durch die Paperindustrie. Jede Videokonferenz „spart“ Transportenergie. Bei internationalen Konferenzen sind das Tonnen von verbranntem Kerosin. In gemässigten Zonen „spart“ die Computertechnologie wenigstens im Winter das Heizen grosser Bürogebäude.

Ein fundamentalistischer Feldzug gegen Informatik und die Cloud würde uns in vielen Bereichen wieder in die Zeit der mechanischen Energieverschwendung vor dem Beginn des Informationszeitalters zurückwerfen. Der Fundamentalismus bedient sich oft der Dämonisierung mittels grossen Zahlen, die

nicht ins Verhältnis gesetzt werden mit dem Rest der Welt, sondern am liebsten etwas unheimlich, unüberprüfbar bei grossen Firmen lokalisiert werden, deren Treiben sowieso niemand so recht durchschaut. Genaues Nachrechnen ist bei solchen Argumenten unbeliebt.

So wurde die laute Kampagne gegen Stand-by-Schaltungen damit begründet, wieviele Milliarden Kilowattstunden damit vergeudet würden. In Realität handelt es sich um den Bruchteil eines Prozents des gesamten Energieverbrauchs. Wenn man stattdessen auch nur einmal vergisst, ein Gerät abzuschalten, verbraucht das mehr Energie als die Stand-by-Schaltung. Ausserdem ist auch die Stand-by-Schaltung eine Computeroperation, deren Energieverbrauch technisch unter jede beliebige Grenze gedrückt werden könnte, wenn die Konsumenten durch hohe Energiekosten dazu motiviert würden, sparsamere Schaltungen zu kaufen.

Eine ähnliche Dämonisierung mittels grosser Zahlen lässt sich bei den Befürwortern eines Cloud-Moratoriums beobachten: Es wird vorgerechnet, dass der Energieverbrauch der grossen Rechenzentren der Cloudanbieter gigantisch ist. Besonders gruselig wird es, wenn dann noch die üblichen Verdächtigen, Microsoft, Apple, Google und Co. an dieser Energieverschwendung schuld sind. In der Realität fallen die Rechenzentren der Cloud kaum ins Gewicht verglichen mit den Endgeräten der Cloud-Nutzer. Denn auf jeden dieser Nutzer fällt nur ein minimaler Bruchteil des Energieverbrauchs des Cloud-Rechenzentrums, welcher viel kleiner ist, als der Energieverbrauch seines Bildschirms.

Wenn es tatsächlich wahr wäre, dass das rasante technische Wachstum der Informationsgesellschaft und der Anzahl Computeroperationen zu einem entsprechenden Wachstum des Energieverbrauchs führen müsste, dann müsste dieser ja proportional zur weltweit verfügbaren Rechenleistung gewachsen

sein. Verglichen mit meinem PC aus dem Jahr 1983 müsste mein Rechner heute die Energie mehrerer AKWs schlucken. Stattdessen ist der Energieverbrauch der Endgeräte dramatisch gesunken. Das liegt unter Anderem daran, dass die Hersteller integrierter Schaltungen immer kleinere Elemente bauen, wo folglich weniger Atome für dieselbe Operation herumgeschoben werden. Ausserdem verschwinden mechanisch bewegliche Elemente aus den Geräten und rotierende Disks werden durch Festkörperspeicher ersetzt. Schliesslich sehen sich die Hersteller der Prozessoren durch den Konkurrenzdruck zu immer grösserer Rechenleistung gezwungen, das Abwärmeproblem unter Kontrolle zu halten, indem sie immer grössere Teile im Kleinen als reversible Recheneinheiten konstruieren.

Wem der Energieverbrauch der Informationsgesellschaft wirklich am Herzen liegt, fordert also nicht als Ewiggestriger ein Cloud-Moratorium sondern achtet bei Endgeräten auf den Ressourcenverbrauch nicht nur von Energie bei Herstellung, Nutzung und Entsorgung.

Auch gutgemeinter fundamentalistischer Alarmismus hat seinen ökologischen Preis.