



Ist das Universum ein Computer?

Jannis Speer

17.12.20

Big Questions Seminar

Inhalt



Historische Einführung: Digitale Physik

- ursprüngliche Idee: Konrad Zuses Buch Rechnender Raum (1969)
 - Hypothese: Universum ist digitaler Computer, genauer: zellulärer Automat
 - Kompatibilität von Computern mit:
Informationstheorie, statistischer Mechanik, Quantenmechanik
 - Begriff geprägt durch Edward Fredkin, alternativ: digitale Philosophie
- Digitale Physik: Theorien mit Prämisse, Universum durch Information beschreibbar ist

Digitale Physik - verschiedene Perspektiven

- Weizsäckers Quantentheorie der Ur-Alternativen:
 - lediglich 2 Entitäten: Struktur der Zeit, binäre Alternativen
 - abstrakt, nicht-lokal, keine feldtheoretischen Voraussetzungen

- Wheelers It from Bit:
 - klassisch: Realität existiert und wird gemessen
 - hier: Messung schafft Realität

- Pancomputationalism:
 - Digitaler Computer vs. Quantencomputer
 - Zufälligkeit und Komplexität des Universums? Effizienz?

- Tegmarks Mathematical-Universe-Hypothese (MUH)
 - Universum ist Mathematik, mathematische Existenz = physikalische Existenz

Informationstheorie

... beschäftigt sich mit Quantifizierung, Speicherung und Übertragung von Information

- Konzept von Information hat verschiedene Bedeutungen
verwandt mit: Nachricht, Kommunikation, Daten, Wissen
- hier: Information ist Folge von Symbolen aus einem Alphabet $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_m\}$
- Informationsgehalt eines Zeichens: $I(z) = -\log_a(p_z)$
mit Wahrscheinlichkeit p_z , Mächtigkeit a
- Entropie eines Zeichens (Shannon): $H = E[I] = \sum_{z \in Z} p_z I(z) = -\sum_{z \in Z} p_z \log_a(p_z)$

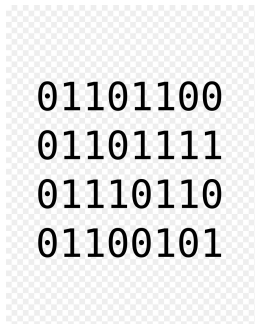


Abbildung: binäre Information

physikalische Information und Entropie

- Information beschreibt physikalisches System:
 - Information löst Ungewissheit über Zustand eines physikalischen Systems
 - Information ist Messung für Wahrscheinlichkeit eines Zustandes

- fehlende Information = nötige Information, um Zustand zu beschreiben = $I = -k \sum_{i=1}^n p_i \ln(p_i)$
mit p_i der Wahrscheinlichkeiten der n Zustände des Systems
 - binäre Entropie der Informationstheorie: $k = \ln(2)^{-1}$
 - Gibbs Entropie: $k = k_b$

- Von Neumann Entropie, QM-Analogon: $S(\rho) = -\text{Tr}(\rho \ln \rho)$ mit Dichtematrix ρ

Algorithmische Informationstheorie

- Bestimmung des Informationsgehalt über Kolmogorow-Komplexität
- Kolmogorow-Komplexität:
 - Informationsgehalt einer Zeichenkette = Länge des kleinsten Algorithmus, der Zeichenkette erzeugt
 - nicht berechenbar, aufgrund des Halteproblems kleinster Algorithmus nicht bestimmbar
 - unabhängig von der verwendeten universellen Programmiersprache abgesehen von additiver Konstante c

1000110111100101

1111111100000000

- algorithmic randomness:
 - Zeichenkette ist zufällig, wenn Kolmogorow-Komplexität \geq Länge der Zeichenkette
 - Zufälligkeit einer endlichen Zeichenkette abhängig von universellen Programmiersprache

Digitale Information, Boolesche Algebra, Klassische Logik

- Digitale Information: diskrete endliche Darstellung → Ziffern, Buchstaben → binär
- Boolesche Algebra mit Operatoren:
 \wedge UND \vee ODER \neg NICHT
- klassische Logik:
 - Prinzip der Zweiwertigkeit
 - Prinzip der Extensionalität

x	y	$x \wedge y$	$x \vee y$	x	$\neg x$
0	0	0	0	0	1
1	0	0	1	1	0
0	1	0	1		
1	1	1	1		

Abbildung: Boolesche Algebra.

Vor Turing

- Formulierung des Hilbertprogramms in 1920er
- Ziel: Nachweis der Widerspruchsfreiheit der Axiomensysteme der Mathematik
- Entscheidungsproblem: „First, was mathematics complete ... Second, was mathematics consistent ... And thirdly, was mathematics decidable?“
- Beantwortung durch Gödels Unvollständigkeitssätze

- Was ist ein Algorithmus?

Turingmaschine - informelle Einführung

- Interpretation von Logik als Prozess
- Definition Algorithmus und der Berechenbarkeit
- Analogie eines denkenden, lesenden und schreibenden Mathematikers

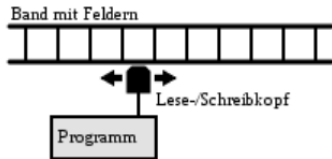


Abbildung: Turingmaschine.

- Turingmaschine:
 - Speicherband: unendlich viele, sequentiell angeordnete Felder
 - Feld: nimmt einen von endlich vielen Zuständen an
 - Lese-Schreib-Kopf: Verarbeitung von Information, nimmt einen von endlich vielen Zuständen an
- Prozess:
 - Kopf liest Zustand des aktuellen Feldes
 - Kopf verarbeitet eignen Zustand und Feldzustand (Überföhrungsfunktion)
 - Änderung des Kopf und Feldzustandes
 - Kopf bewegt sich ein Feld nach rechts oder links

Anmerkungen zur Turingmaschine

Universelle Turingmaschine (UTM):

- UTM simuliert beliebig Turingmaschine für beliebigen Input
- Speicherung der Turingmaschine und des Inputs auf Speicherband der UTM
- Halteproblem

Algorithmus:

- Ausführbarkeit
- Statistische Finitheit
- Dynamische Finitheit
- Terminierung
- optional:
 - Determiniertheit
 - Determinismus

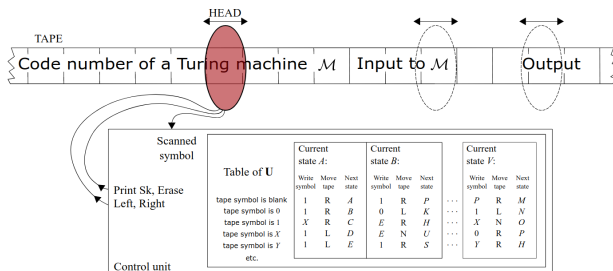


Abbildung: Turingmaschine.

Anmerkungen zur Turingmaschine

Halteproblem:

- Analog zu Gödels Unvollständigkeitssatz:
 - Logik ist selbst-widersprechend und unvollständig
 - Problem von auf sich selbst bezogene Behauptungen
 - Lügner-Paradox: „Dieser Satz ist falsch.“
- Keine UTM kann Frage beantworten, ob eine beliebige Turingmaschine anhält (Antwort liefert)
- Konstruktion von selbst-widersprechender UTM:

Result: Hält beliebige Turingmaschine T nicht an?

begin

T = beliebige Turingmaschine ;

Bestimme ob T anhält ;

if T hält nicht an == True **then**

| return Antwort;

end

end

Church-Turing-These:

- Jede intuitiv berechenbare Funktion kann durch eine UTM berechnet werden
- intuitiv berechenbar: mathematisch ungenauer Begriff
- Turing-berechenbar: Existenz von (terminierendem) Algorithmus
- striktere, physikalische Version:
Church-Turing-Deutsch-Hypothese
UTM kann jeden physikalischen Prozess simulieren

Universum als digitaler Computer

Universum als digitaler Computer 2

Effizienz von digitalen Computern

Quantencomputer

Quantencomputer 2

Universum als Quantencomputer

Universum als Quantencomputer 2

Digitaler Computer vs. Quantencomputer

Gegenposition - Das Universum ist kein Computer

Ausblick