



---

## Ist das Universum ein Computer?

---

Jannis Speer

17.12.20

Big Questions Seminar

## Inhalt

- Historische Einführung
- Information
- Turingmaschine
- Das Universum als universeller digitaler Computer
- Quantencomputer
- Das Universum als Quantencomputer
- Gegenposition - Das Universum ist kein Computer

## Historische Einführung: Digitale Physik<sup>1</sup>

- 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

---

<sup>1</sup>Digital physics, Wikipedia

## Digitale Physik - verschiedene Perspektiven <sup>1</sup>

- 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

---

<sup>1</sup>Digital physics, Wikipedia

## Informationstheorie<sup>3 4</sup>

... 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):  $H = E[I] = \sum_{z \in Z} p_z I(z) = -\sum_{z \in Z} p_z \log_a(p_z)$

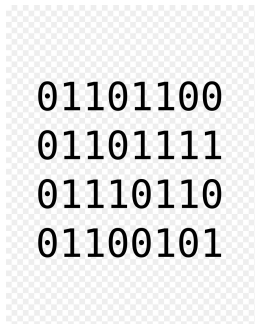


Abbildung: binäre Information.<sup>2</sup>

<sup>2</sup>cleanpng.com

<sup>3</sup>Information, Wikipedia

<sup>4</sup>Information theory, Wikipedia

## physikalische Information und Entropie <sup>5</sup>

- 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  $\rho$

---

<sup>5</sup>Physical information, Wikipedia

## Algorithmische Informationstheorie <sup>6</sup>

- Bestimmung des Informationsgehalt über Kolmogorow-Komplexität
- Kolmogorow-Komplexität:
  - Informationsgehalts 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
- algorithmic probability: kurze Algorithmen sind wahrscheinlicher als lange

<sup>6</sup>Algorithmic information theory, Wikipedia

## 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. <sup>7</sup>

<sup>7</sup>Boolean Algebra



## Vor Turing<sup>8</sup>

- 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 mathematisch exakt betrachtet ein Algorithmus?

---

<sup>8</sup>The Universe as Quantum Computer, Seth Lloyd, 2013

## Turingmaschine - informelle Einführung<sup>8</sup>

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

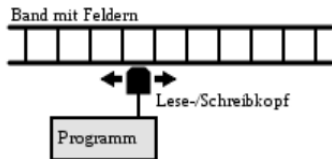


Abbildung: Turingmaschine.<sup>9</sup>

- 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

<sup>9</sup>Turingmaschine, Wikipedia

<sup>8</sup>The Universe as Quantum Computer, Seth Lloyd, 2013

## Anmerkungen zur Turingmaschine <sup>8</sup>

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

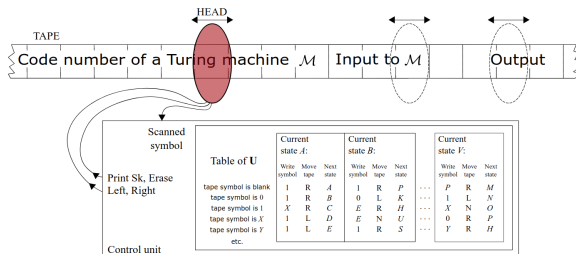


Abbildung: Universelle Turingmaschine. <sup>10</sup>

<sup>10</sup>Universal Turing machine, Wikipedia

<sup>8</sup>The Universe as Quantum Computer, Seth Lloyd, 2013

## Anmerkungen zur Turingmaschine <sup>8</sup>

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 an?

**begin**

```
T = beliebige Turingmaschine und I = beliebiger Input ;  
while T hat nicht angehalten == True do  
    | Führe Schritt von T aus mit I;  
end  
return Antwort ;
```

**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

<sup>8</sup>The Universe as Quantum Computer, Seth Lloyd, 2013

## Universum als universeller digitaler Computer<sup>8</sup>

- Digitaler Computer = System, das jede Folge von logischen Operationen ausführen kann
- Frage: Ist das Universum ein universeller digitaler Computer?
  
- Frage I: Kann das Universum universelle digitale Berechnungen nach Turing durchführen?
- Frage II: Keine eine klassische UTM effektiv die physikalischen Prozesse des Universum simulieren?
  
- naive Antwort: ja
- elektronischer Computer  $\approx$  universeller digitaler Computer, der UTM simulieren kann
- Church-Turing-Deutsch-Hypothese

---

<sup>8</sup>The Universe as Quantum Computer, Seth Lloyd, 2013

## Universum als universeller digitaler Computer 2<sup>8</sup>

Frage I:

- UTM benötigt unendlich viel Speicherplatz
- Liefer da Universum unendlich erweiterbaren Speicherplatz?
- echte elektrische Computer können als UTM verstanden werden, trotz endlichem Speicher
- Existenz von elektrischen Computer
- Antwort: Gesetze der Physik ermöglichen wahrscheinlich universellen digitalen Computer

Frage II:

- UTM kann jeden berechenbaren physikalischen Prozess simulieren
- aber auch effizient auf kleinen Volumen von Raum und Zeit?
- Antwort: wahrscheinlich nicht

---

<sup>8</sup>The Universe as Quantum Computer, Seth Lloyd, 2013

## Architektur des universellen digitalen Computers<sup>8</sup>

- Gesetze der Physik sind: lokal, homogen und isotrop
- Computer-Version: zellulärer Automat
  - Anordnung von Zellen mit endlichen Möglichkeit an Zuständen
  - Zellen werden aktualisiert als Funktion des Zustandes der Zelle und ihrer Nachbarn
  - Universum als sich selbst reproduzierender zellulärer Automat
  - Universum besteht aus Bits, die lokalen logischen Operationen unterliegen

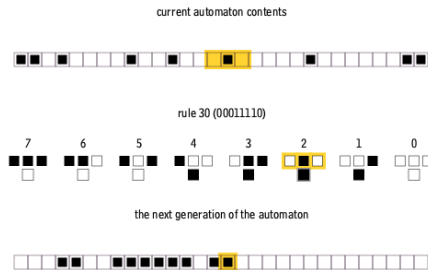


Abbildung: eindimensionaler zellulärer Automat.<sup>11</sup>

→ Frage III: Ist das Universum ein zellulärer Automat?

<sup>11</sup>Cellular automaton, Wikipedia

<sup>8</sup>The Universe as Quantum Computer, Seth Lloyd, 2013

## Effizienz von digitalen Computern in Quantensimulationen<sup>8</sup>

- Bell Theorem:

Quanteneffekte (Verschränkung) nicht berechenbar durch klassische lokale Modelle mit versteckten Variablen

- benötigen nicht-lokale Modelle mit:

- superluminare Kommunikation
- aufwendiger Simulation von Qubit

→ Antwort Frage III: Universum kein zellulärer Automat

- System mit  $N$  Subsystemen, z.B.  $N$  Kernspins, benötigt  $O(2^N)$  klassische Bits

- benötigt exponentielle Kompression, die (noch) nicht existiert

→ Antwort Frage II: klassischer digitalen Computern wahrscheinlich nicht effizient

---

<sup>8</sup>The Universe as Quantum Computer, Seth Lloyd, 2013



## Qubit<sup>14</sup>

- Analogon zu klassischem Bit, Basis-Einheit der Quateninformation
- reiner Zustand eines Qubits als Superposition der zwei Basiszustände

$$|\phi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle \text{ mit Basiszuständen } |0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\text{und } |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

- System aus mehreren Qubits mit Tensorprodukt:

$$|0\rangle \otimes |0\rangle = |00\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, |01\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, |10\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, |11\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

- $n$ -Qubits  $\rightarrow 2^n$ -dim. Hilbertraum  $\rightarrow 2^n$  klassische Bits

- Bloch-Kugel - Repräsentation eines reinen Zustandes

$$\alpha = \exp(i\psi) \cdot \cos(\theta/2) = \cos(\theta/2)$$

$$\alpha = \exp(i(\psi + \phi)) \cdot \sin(\theta/2) = \exp(i\phi) \cdot \sin(\theta/2)$$

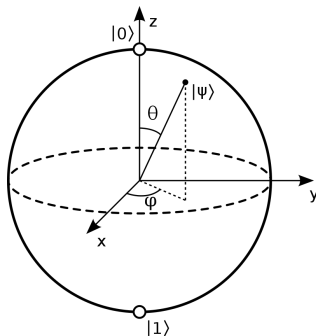


Abbildung: Bloch Kugel.<sup>12</sup>

<sup>12</sup>Qubit, Wikipedia

<sup>14</sup>Mit Quanten rechnen, Beatrice Marie Ellerhoff, Springer, 2020

## Quantenverschränkung<sup>14 12</sup>

- Produkt von 1-Qubit-Zuständen ergibt  $n$ -Qubit-Zustand:

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1 + |1\rangle_1) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_2 - |1\rangle_2) = \frac{1}{2}(|00\rangle - |01\rangle + |10\rangle - |11\rangle)$$

- nicht jeder  $n$ -Qubit-Zustand darstellbar als Produkt von 1-Qubit-Zuständen → Verschränkung
- einfachstes Beispiel: Bell-Zustand

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$

Im verschränkten Zustand:

- fehlende Information über Zustand des einzelnen Qubits
- gemischter Zustand, Beschreibung über Dichtematrix
- erst durch Messung ist genauer Zustand bekannt
- Messung des ersten Qubits in perfekter Korrelation mit zweitem Qubit
- keine Abhängigkeit von Entfernung → nichtlokal

<sup>14</sup>Mit Quanten rechnen, Beatrice Marie Ellerhoff, Springer, 2020

<sup>12</sup>Qubit, Wikipedia

## Quantencomputer

- wichtige Prinzipien: Superposition und Verschränkung
- Quantenregister  $\leftrightarrow$  klassische Register (Zeichenkette)
- Quantengatter  $\leftrightarrow$  Logikgatter



Abbildung: IBM Quantencomputer. <sup>15</sup>

<sup>15</sup>IBM Quantencomputer, digitalbusiness-cloud.de, 2016

## Quantenregister<sup>13</sup>

- Analog zu klassischem Computer: Zusammenfassung mehrerer Bits zu Register (Zeichenkette)

→ Quantenregister = Tensorprodukt einzelner 1-Qubit-Zustände

- Register im Zustand 01010100 → Quantenregister im Zustand  $|01010100\rangle$

- Zustand eines Quantenregisters mit  $N$ -Qubits:

$$\psi = \sum_{i_1 \dots i_N} c_{i_1 \dots i_N} |i_1 \dots i_N\rangle$$

- Messung des Zustand des Quantenregisters → Informationsgehalt: Quantenregister = klassisches Register

---

<sup>13</sup>Quantencomputer, Wikipedia

## Quantengatter<sup>14</sup>

- Logikgatter: Anordnung zur Ausführung logischer Operatoren auf Bits
- Quantengatter: Ausführung von Operatoren auf Qubit-Zuständen
- $U|\phi_1\rangle = |\phi_2\rangle$
- Beispiele:

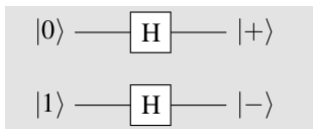


Abbildung: Hadamard-Gatter.<sup>14</sup>

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) = |+\rangle, \quad \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle) = |-\rangle$$

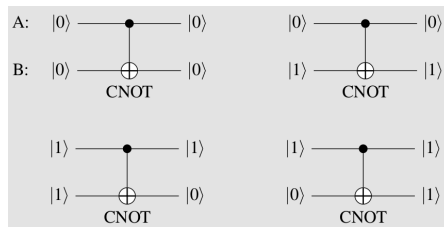


Abbildung: CNOT-Gatter.<sup>14</sup>

<sup>14</sup>Mit Quanten rechnen, Beatrice Marie Ellerhoff, Springer, 2020

## Kombination von Hadamard und CNOT für Bell-Zustand

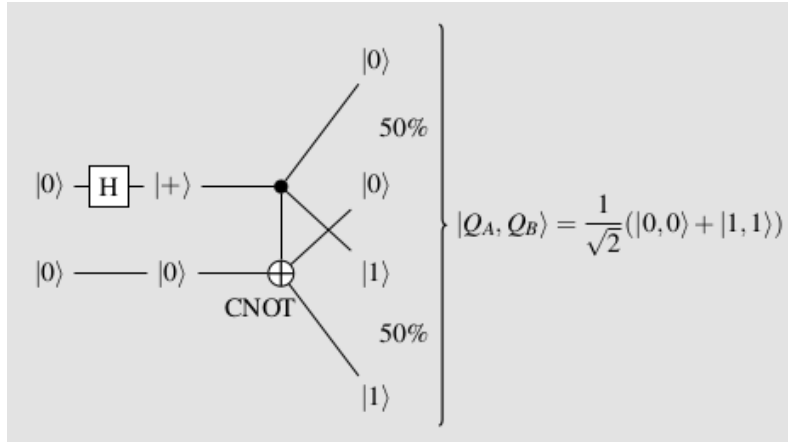


Abbildung: kombiniertes Hadamard- und CNOT-Gatter für Bell-Zustand. <sup>14</sup>

<sup>14</sup>Mit Quanten rechnen, Beatrice Marie Ellerhoff, Springer, 2020

## Universum als Quantencomputer<sup>8</sup>

■ Frage I: Erlaubt das Universum Quantencomputer?

■ Antwort: ja, aber...

... Unbegrenzter Speicherplatz im Universum?

... Technische Fähigkeit, großangelegten Quantencomputer zu bauen fehlt uns (noch)

■ Frage II: Kann ein Quantencomputer effektiv die physikalischen Prozesse des Universum simulieren?

■ Antwort: wahrscheinlich

Prinzipien des Universums = Prinzipien von Quantencomputern

Grenze für Hochenergie-Dynamik notwendig → Planck-Skala

■ Frage III: Ist das Universum ein quantenphysikalischer zellulärer Automat?

■ Antwort: wahrscheinlich

Ableitung von zellulärem Automat aus Gitter-Eichtheorien

aktuelle Beobachtungen: Prozesse des Universums sind homogen, isotrop und lokal

---

<sup>8</sup>The Universe as Quantum Computer, Seth Lloyd, 2013

## Universum als quantenphysikalischer zellulärer Automat<sup>8</sup>

- Antwort auf Frage:
- Warum ist das Universum so strukturiert und trotzdem so komplex?
  
- Erwartung: einfacher Anfangszustand + einfache Gesetze → einfacher aktueller Zustand
- Realität: Universum voller komplexer Strukturen
  
- Erklärung:
  - bildliche Vorstellung: Affen bedienen Tastatur des Universums
  - produzieren viele nicht funktionierende Programme
  - aber auch zufällig viele funktionierende kurze Programme
  - kurze Programme erzeugen scheinbar komplexe Strukturen → Kolmogorow-Komplexität vs. klassischer Informationsgehalt
  - kürzesten Programme sind zufällig, sonst existieren noch kürzere Programme, die selbe Struktur erzeugen
- Quantenfluktuation für Erzeugung von zufälligen Bits

---

<sup>8</sup>The Universe as Quantum Computer, Seth Lloyd, 2013



## Kritikpunkte: Universum als Quantencomputer <sup>16</sup>

- Fragen nicht geklärt:

- Ist das Universum deterministisch oder zufällig?

- Was ist Effizienz von klassischen Computern für Quanteneffekte?

- echter Zufall = maximale Kolmogorow-Komplexität

- Prinzip von Occam's razor: Favorisiere einfache Erklärungen → Echter Zufall ist keine gute Wahl

- Annahme: kürzesten Programme sind zufällig, sonst existieren noch kürzere Programme, die selbe Struktur erzeugen

- nicht belegbar → Kolmogorow-Komplexität/Halteproblem nicht berechenbar

---

<sup>16</sup>The Computational Universe, Jürgen Schmidhuber, 2006

## Gegenposition - Das Universum ist kein Computer <sup>17</sup>

- Newtonian Schema Universe (NSU):

- Universum beschrieben durch dynamische Gleichungen
- Universum als Computer: Anfangszustand  $\xrightarrow{\text{Berechnung}}$  Endzustand

- Lagrangian Schema Universe (LSU):

- Universum beschrieben durch Lagrangedichte
- Universum als globales vierdimensionales Randwertproblem
- Vorteile:
  - gleicher Lösungsweg für jede Teilmenge des Universum → Ähnlichkeit von kausal nicht verbundenen Teile des Universums
  - elegante Einbindung von Quanteneffekten und Allgemeine Relativitätstheorie → keine Trennung von Raum und Zeit wie bei dynamischer Berechnung von Computer

<sup>17</sup>Questioning the Foundations of Physics, Anthony Aguirre, Brendan Foster and Zeeya Merali, Springer, 2014

## Ausblick

- Ist das Universum ein digitaler Computer?
- dafür sprechen:
  - enger Zusammenhang zwischen Informationsverarbeitung zwischen Computern und dem Universum
  - Effizienz von digitalen Computern fraglich
- Ist das Universum ein Quantencomputer?
  - Quantencomputer kann fundamentalen Quanteneffekte des Universums beschreiben
  - Erklärung für Koexistenz von Zufälligkeit und Ordnung des Universums
- offene Fragen:
  - Ist das Universum deterministisch oder zufällig?
  - Bietet das Universum unendlich viel Speicherplatz?
  - Wie viel Information beinhaltet das Universum? → nächster Vortrag

## Literaturverzeichnis

- 1 [https://en.wikipedia.org/wiki/Digital\\_physics](https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_physics)
- 2 <https://de.cleanpng.com/png-5mw0s2/>
- 3 <https://en.wikipedia.org/wiki/Information>
- 4 [https://en.wikipedia.org/wiki/Information\\_theory](https://en.wikipedia.org/wiki/Information_theory)
- 5 [https://en.wikipedia.org/wiki/Physical\\_information](https://en.wikipedia.org/wiki/Physical_information)
- 6 [https://en.wikipedia.org/wiki/Algorithmic\\_information\\_theory](https://en.wikipedia.org/wiki/Algorithmic_information_theory)
- 8
- 7 [https://en.wikipedia.org/wiki/Boolean\\_algebra](https://en.wikipedia.org/wiki/Boolean_algebra)
- 9 <https://de.wikipedia.org/wiki/Turingmaschine>
- 10 [https://en.wikipedia.org/wiki/Universal\\_Turing\\_machine](https://en.wikipedia.org/wiki/Universal_Turing_machine)
- 11 [https://en.wikipedia.org/wiki/Cellular\\_automaton](https://en.wikipedia.org/wiki/Cellular_automaton)
- 12 <https://en.wikipedia.org/wiki/Qubit>
- 13 <https://de.wikipedia.org/wiki/Quantencomputer>
- 14
- 15 <https://www.digitalbusiness-cloud.de/ibm-quantencomputer-ueber-die-cloud-fuer-jedermann/>
- 16
- 17