

Beobachter und Bewusstsein

Joshua Luckey

TU Dortmund

7. Juli 2016

Inhalt

1. Was sind Beobachter und Bewusstsein?
2. Betrachtung und Probleme in der Physik
3. Beobachter als Teilsystem
4. Dekohärenz von Gehirnprozessen
5. Bewusstsein als Aggregatzustand
6. Zusammenfassung

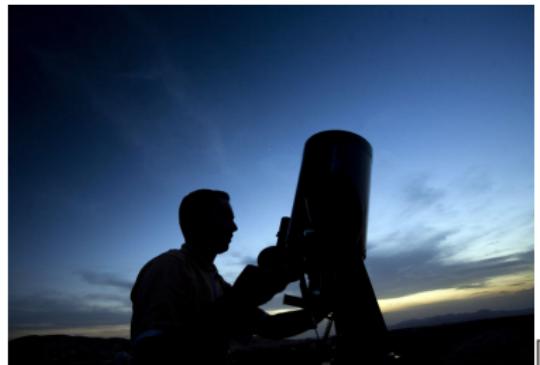
1. Was sind Beobachter und Bewusstsein?

Beobachter

- Duden: „*jemand, der etwas oder jemanden beobachtet*“ [1]
- Allgemein: Objektiv, einfach zu verstehen



[2]



[3]

Beobachter

- Duden: „*jemand, der etwas oder jemanden beobachtet*“ [1]
- Allgemein: Objektiv, einfach zu verstehen



[4]

Bewusstsein

Definition Duden [5]:

- „*Zustand, in dem man sich einer Sache bewusst ist; deutliches Wissen von etwas, Gewissheit*“
- „*Gesamtheit der Überzeugungen eines Menschen, die von ihm bewusst vertreten werden*“
- „*(Psychologie) Gesamtheit aller jener psychischen Vorgänge, durch die sich der Mensch der Außenwelt und seiner selbst bewusst wird*“
- „*Zustand geistiger Klarheit; volle Herrschaft über seine Sinne*“

Bewusstsein

- Duden: „(Psychologie) Gesamtheit aller jener psychischen Vorgänge, durch die sich der Mensch der Außenwelt und seiner selbst bewusst wird“ [5]
- Allgemein: Subjektiv, nicht fassbar nur erfahrbar
- *Das schwierige Problem:* Warum nehmen wir wahr?
„What is your extra ingredient, and why should that account for conscious experience?“ - David Chalmers [6]
- Häufige Antwort: Dualismus
 - ▶ physische Materie
 - ▶ nicht-physische „Lebenskraft“ (Seele)

2. Betrachtung und Probleme in der Physik

Beobachter

- Definition abhängig von Betätigungsfeld
- Allgemeine Relativitätstheorie:
 - ▶ keine Masse oder Ausdehnung
 - ▶ keinen Einfluss auf das Beobachtete
- Quantenmechanik:
 - ▶ Einfluss: Kollaps der Wellenfunktion?
- „*The only issue there is consensus on is that there is no consensus about how to define an observer and its role.*“
 - Max Tegmark [7]

- im allgemeinen unbeachtet
 - ▶ „*An other argument is that physics has been managed just fine for hundreds of years avoiding this subject and should therefore keep doing so.*“ - Max Tegmark [7]
- keine Lösung für das *schwierige Problem*
 - ▶ Dualismus nur schwer zu vertreten
- Einfluss von respektive auf Quantenmechanik unklar
 - ▶ Gehirn: nass und warm

3. Beobachter als Teilsystem

Beobachter als Teilsystem

- Zerlegung eines Systems beschreiben durch H und ρ

3 Teilsysteme + Wechselwirkung

$$H = H_O + H_E + H_S + H_{\text{int}}$$

$$H_{\text{int}} = H_{OE} + H_{ES} + H_{OS} + H_{OES}$$

- Subjekt (S): Freiheitsgrade der subjektiven Wahrnehmung des Beobachters
- Objekt (O): Zu beobachtende Freiheitsgrade
- Umgebung (E): Alle übrigen Freiheitsgrade des Systems

Implikationen dieses Modells

- Prämisse: Freiheitsgrade des Subjekts sind die Wahrnehmungen des Beobachters
- Hohe Korrelation zu einer Auswahl von Eigenschaften der Umgebung und des Objekts
 - ▶ Aufnahme von Reizen durch Sinnesorgane
 - ▶ Korrelation zu vergangenen Zuständen
- Transinformation zwischen Subjekt und Objekt + Umgebung relativ konstant
 - ▶ Information über Umwelt durch Sinne
 - ▶ Zunahme durch Lernen, Abnahme durch Vergessen

Beispiel: H_O , H_{OE} , H_{OS}

- Betrachtung mit je einem Freiheitsgrad für (S) und (O)
 - ▶ Subjekt: $|\oplus\rangle$, $|\ominus\rangle$, $|\ominus\rangle$
 - ▶ Objekt: $|\uparrow\rangle$, $|\downarrow\rangle$
- Gesamtsystem $S \otimes O$ mit 6 Basiszuständen:
 $|\oplus\uparrow\rangle$, $|\oplus\downarrow\rangle$, $|\ominus\uparrow\rangle$, $|\ominus\downarrow\rangle$, $|\ominus\uparrow\rangle$, $|\ominus\downarrow\rangle$
- Dichtematrix $\rho = |\ominus\uparrow\rangle \langle \ominus\uparrow|$ als Anfangszustand:

1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0

Beispiel: H_O , H_{OE} , H_{OS}

- Zeitentwicklung $U = \exp(-iH_O t)$ von $\rho_O = |\uparrow\rangle\langle\uparrow|$
 - ▶ $U|\uparrow\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle)$
 - ▶ Entropie bleibt konstant

$$\rho'_O = U\rho_O U^\dagger = \frac{1}{2}(|\uparrow\rangle\langle\uparrow| + |\uparrow\rangle\langle\downarrow| + |\downarrow\rangle\langle\uparrow| + |\downarrow\rangle\langle\downarrow|)$$

$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0	0	0
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0

Beispiel: H_O , H_{OE} , H_{OS}

- H_{OE} : Dekohärenz (vollständig)
 - ▶ Entropie nimmt zu

$$\rho_O'' = \frac{1}{2}(|\uparrow\rangle\langle\uparrow| + |\downarrow\rangle\langle\downarrow|)$$

$\frac{1}{2}$	0	0	0	0
0	$\frac{1}{2}$	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Beispiel: H_O , H_{OE} , H_{OS}

- H_{OS} : Messung von S an O
 - ▶ $U = \exp(-i \int H_{OS} dt)$, Messung schnell
 - ▶ $U |\oplus \uparrow\rangle = |\oplus \uparrow\rangle$, $U |\oplus \downarrow\rangle = |\oplus \downarrow\rangle$
 - ▶ $\rho_{OS} = |\oplus\rangle \langle \oplus| \otimes \frac{1}{2}(|\uparrow\rangle \langle \uparrow| + |\downarrow\rangle \langle \downarrow|)$
 - ▶ Entropie nimmt ab

$$\rho'_{OS} = U \rho_{OS} U^\dagger = \frac{1}{2} (|\oplus \uparrow\rangle \langle \oplus \uparrow| + |\oplus \downarrow\rangle \langle \oplus \downarrow|)$$

0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	$\frac{1}{2}$	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	$\frac{1}{2}$

Beispiel: H_S , H_{SE}

- Zeitentwicklung von S

► $U = \exp(-i \int H_{OS} dt)$, Zeit kurz

► $U |\oplus\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\oplus\rangle + |\ominus\rangle)$, $\rho_S = |\oplus\rangle \langle \oplus|$

1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0

Beispiel: H_S , H_{SE}

- Zeitentwicklung von S

► $U = \exp(-i \int H_{OS} dt)$, Zeit kurz

► $U |\oplus\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\oplus\rangle + |\ominus\rangle)$, $\rho_S = |\oplus\rangle \langle \oplus|$

$$\rho'_S = U \rho_S U^\dagger = \frac{1}{2} (|\oplus\rangle \langle \oplus| + |\ominus\rangle \langle \ominus| + |\ominus\rangle \langle \oplus| + |\oplus\rangle \langle \ominus|)$$

0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	$\frac{1}{2}$	0	$\frac{1}{2}$	0
0	0	0	0	0	0
0	0	$\frac{1}{2}$	0	$\frac{1}{2}$	0
0	0	0	0	0	0

Beispiel: H_S , H_{SE}

- H_{SE} : Dekohärenz des Subjekts

$$\rho_S'' = \frac{1}{2}(|\odot\rangle \langle \odot| + |\ominus\rangle \langle \ominus|)$$

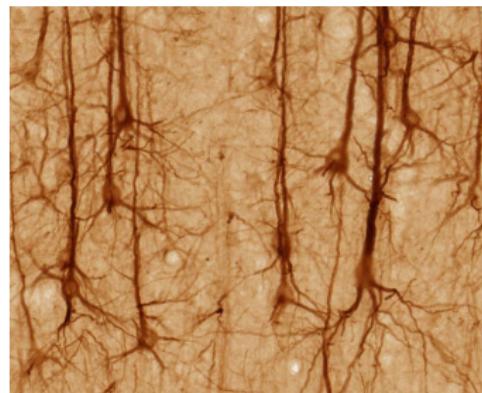
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	$\frac{1}{2}$	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	$\frac{1}{2}$	0
0	0	0	0	0	0

- Auf welchen Zeitskalen läuft Dekohärenz im Gehirn ab?

4. Dekohärenz von Gehirnprozessen

Superposition von Neuronen

- Neuronen: Bausteine des menschlichen Gehirns $\sim 10^{11}$
 - ▶ komplexes Netzwerk
 - ▶ Verbindung mit dem Bewusstsein anzunehmen
- Zwei mögliche Zustände
 - ▶ feuern \leftrightarrow nicht feuern



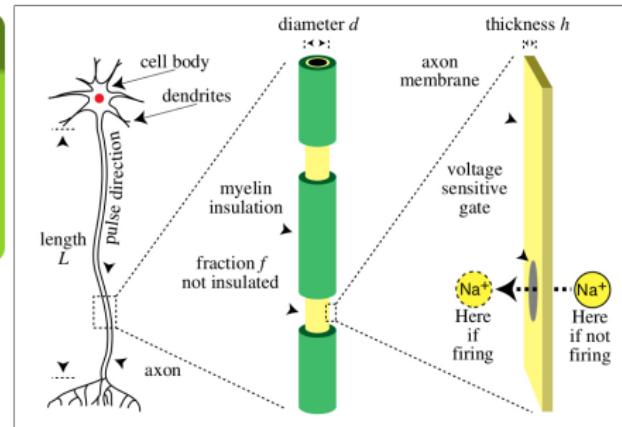
[8]

Superposition von Neuronen

- Einfache Annahmen
Anzahl der Na^+ -Ionen

$$N = \frac{\pi d L f \epsilon_0}{q h} (U_1 - U_0)$$

- $h = 8 \text{ nm}$, $d = 10 \mu\text{m}$,
 $L = 10 \text{ cm}$, $f = 10^{-3}$,
 $U_0 = -0,07 \text{ V}$,
 $U_1 = 0,03 \text{ V}$
 - $N \sim 10^6$



[9]

⇒ Räumliche Superposition von 10^6 Na^+ -Ionen, mit
Abstand $\sim \mathcal{O}(10 \text{ nm})$

Dekohärenz von Neuronen

- Unterschiedliche Wechselwirkungen
 - ▶ Stöße zwischen Na^+ -Ionen, anderen Ionen und H_2O -Molekülen
 - ▶ Coulombabstoßung der Na^+ von andern Ionen
- Abschätzung der Größenordnung, unteres Limit
- Coulombabstoßung: nächstes Ion größter Beitrag
- Stoßprozesse dekohärieren Ion auf de-Broglie Wellenlänge des Stoßteilchens

Dekohärenz von Neuronen

- Betrachtete Wechselwirkungen liefern

Zeitentwicklung von ρ

$$\rho(x, x', t_0 + t) = \rho(x, x', t_0) f(x, x', t)$$

- Ergebnisse für Dekohärenz-Zeitskalen

Object	Environment	τ_{dec}
Neuron	Colliding ion	10^{-20}s
Neuron	Colliding H ₂ O	10^{-20}s
Neuron	Nearby ion	10^{-19}s
Microtubule	Distant ion	10^{-13}s

[9]

- typische Dynamik-Zeitskalen sind $(10^{-4} - 10^0)\text{s}$
 - ▶ Dekohärenz zerstört Superpositionen schon bei der Entstehung
 - ▶ Hirnprozesse als klassisch zu betrachten

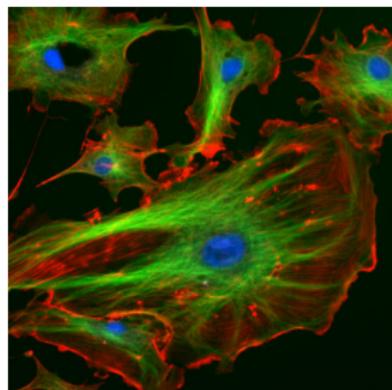
Dekohärenz von Neuronen

- Betrachtete Wechselwirkungen liefern

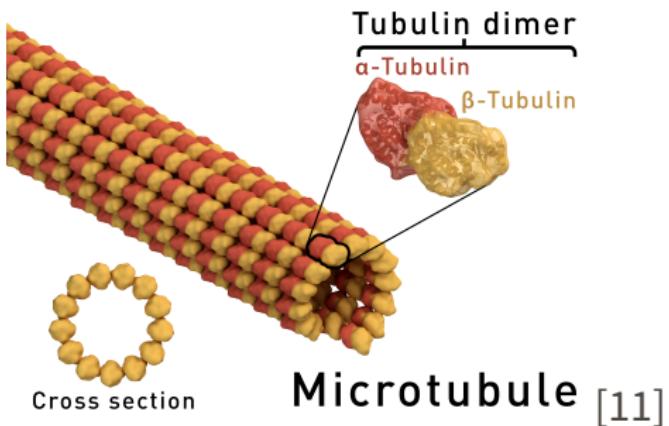
Zeitentwicklung von ρ

$$\rho(x, x', t_0 + t) = \rho(x, x', t_0) f(x, x', t)$$

- Mikrotubuli



[10]



Microtubule [11]

5. Bewusstsein als Aggregatzustand

Bewusstsein als Aggregatzustand

- Aggregatzustände durch Eigenschaften unterscheidbar
- Ähnliche Konzepte bereits erdacht
 - ▶ *Computronium*
- Welche Eigenschaften muss *Perceptronium* besitzen?



[12, 13, 14, 15]

Eigenschaften von Perceptronium

Principle	Definition
Information principle	A conscious system has substantial information storage capacity.
Dynamics principle	A conscious system has substantial information processing capacity.
Independence principle	A conscious system has substantial independence from the rest of the world.
Integration principle	A conscious system cannot consist of nearly independent parts.
Autonomy principle	A conscious system has substantial dynamics and independence.
Utility principle	An evolved conscious system records mainly information that is useful for it.

[7]

Eigenschaften von Perceptronium

Principle	Definition
Information principle	A conscious system has substantial information storage capacity.
Dynamics principle	A conscious system has substantial information processing capacity.
Independence principle	A conscious system has substantial independence from the rest of the world.
Integration principle	A conscious system cannot consist of nearly independent parts.
Autonomy principle	A conscious system has substantial dynamics and independence.
Utility principle	An evolved conscious system records mainly information that is useful for it.

[7]

Integrierte Information

- Aktive Forschung z.B. in der Neurowissenschaft
 - ▶ G. Tononi (INTEGRATED INFORMATION THEORY) [16]

Integrierte Information Φ (abgewandelt)

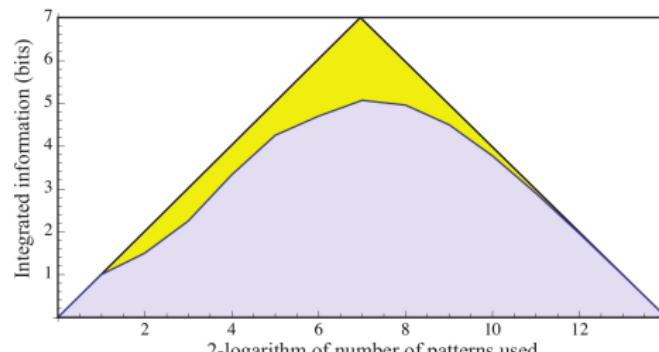
$$\Phi = I_{\min} = \min_{\rho_1, \rho_2} (S(\rho_1) + S(\rho_2) - S(\rho))$$

$$I : \text{Transinformation}, S = -\text{Tr}[\rho \log_2(\rho)]$$

- Minimale Transinformation nach einem Schnitt der das System in zwei teilt
 - ▶ „*the cruellest cut*“ - Giulio Tononi
 - ▶ Maximale Unabhängigkeit der Teilsysteme,
 $\Phi = 0 \Leftrightarrow$ vollständig unabhängig

Integrierte Information

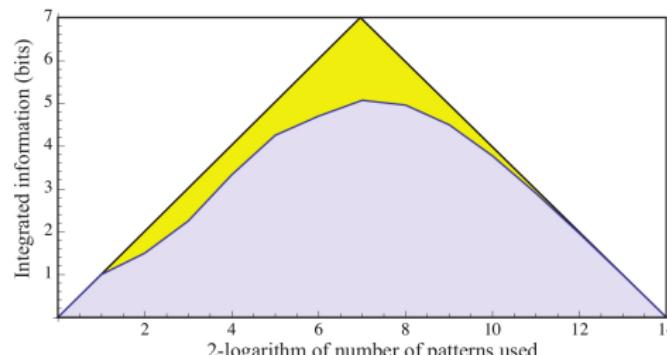
- Betrachtbar als Speicherung von Information, mit Fehlerkorrektur-Mechanismus
- Integrierte Information für k zufällig ausgewählte 14-bit-Folgen
 - ▶ Maximum bei $k \approx 2^7$



[7]

Integrierte Information

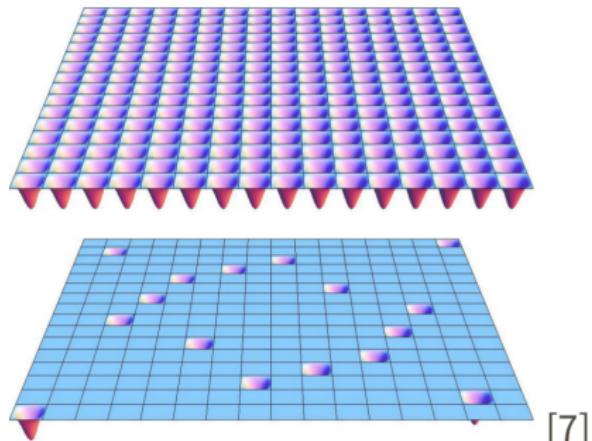
- Betrachtbar als Speicherung von Information, mit Fehlerkorrektur-Mechanismus
- Integrierte Information für k zufällig ausgewählte 14-bit-Folgen
 - ▶ Maximum bei $k \approx 2^7$



[7]

Integrierte Information

- Physikalische Systeme
 - ▶ „Eierkarton“-Potential
 (16×16)
 - ▶ Oben 256 Minima,
 $S(\text{Grundzustand}) = 8$
 - ▶ Unten 16 Minima,
 $S(\text{Grundzustand}) = 4$
- Ort (x, y) als zwei 4-bit Zahlen: $0_2 - 15_2$
- Integration
 - ▶ Oben schlecht $\Phi = 0$
 - ▶ Unten gut $\Phi = 2$



[7]

Probleme mit Integration

- Informationsgehalt des Zustand ρ und des Systems H

„Eierkarton“ -Potential mit k Minima

$$S(\rho) \sim \log_2 (\# \text{ möglicher Zustände}) \sim n$$

$$S(H) \sim \log_2 (\# \text{ möglicher } H) \sim kn$$

- Gehirn mit 10^{11} Neuronen

Maximale Integration

$$S(H) \sim \sqrt{2^n} \frac{n}{2} \sim 10^{10^{10}} \text{ bit}$$

- Notwendige Dynamik viel zu komplex

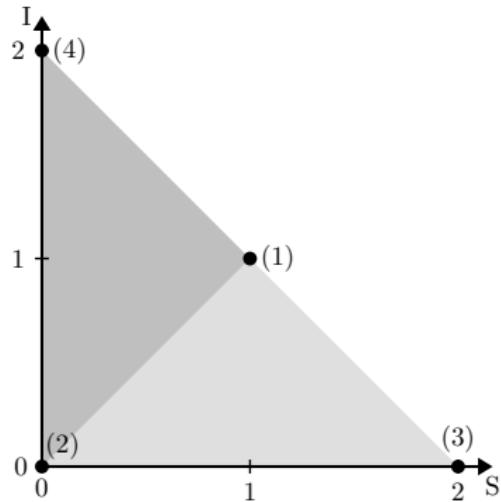
Eigenschaften von Perceptronium

Principle	Definition
Information principle	A conscious system has substantial information storage capacity.
Dynamics principle	A conscious system has substantial information processing capacity.
Independence principle	A conscious system has substantial independence from the rest of the world.
Integration principle	A conscious system cannot consist of nearly independent parts.
Autonomy principle	A conscious system has substantial dynamics and independence.
Utility principle	An evolved conscious system records mainly information that is useful for it.

[7]

Unabhängigkeit

- Als Maß für Unabhängigkeit wiederum Φ verwendbar
- klassisches 2-bit-System,
 $\rho = \begin{pmatrix} P(\downarrow\downarrow) & P(\downarrow\uparrow) \\ P(\uparrow\downarrow) & P(\uparrow\uparrow) \end{pmatrix}$
 - ▶ nur ein Schnitt in zwei einzelne bits möglich
 $\Rightarrow \Phi = I$
 - ▶ helles Dreieck
- 2-qbit-System: $\rho \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$
 - ▶ zusätzlich dunkles Dreieck
 - ▶ $\Phi = \min_U I(U\rho U^\dagger)$

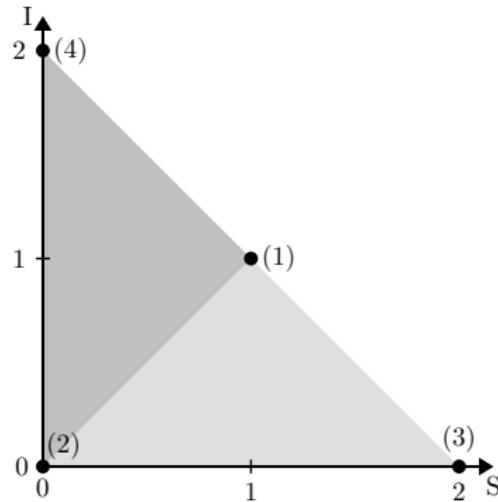


[7]

$$\begin{aligned}(1): \rho &= \frac{1}{2} (|\uparrow\rangle\langle\uparrow| + |\downarrow\rangle\langle\downarrow|) \\(2): \rho &= |\uparrow\rangle\langle\uparrow| \\(3): \rho &= \frac{1}{4} (|\uparrow\rangle\langle\uparrow| + |\downarrow\rangle\langle\uparrow| \\&\quad + |\uparrow\rangle\langle\downarrow| + |\downarrow\rangle\langle\downarrow|) \\(4): \rho &= \frac{1}{2} (|\uparrow\rangle|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle|\downarrow\rangle) \\&\quad (\langle\uparrow|\langle\uparrow| + \langle\downarrow|\langle\downarrow|)\end{aligned}$$

Unabhängigkeit

- Bell-Paar (4):
 $|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (| \uparrow \rangle | \uparrow \rangle + | \downarrow \rangle | \downarrow \rangle)$
 - Reiner Zustand,
Trafo $\Rightarrow \rho = | \uparrow \rangle | \uparrow \rangle \langle \uparrow | \langle \uparrow |$
 - separabel $\Rightarrow \Phi = 0$
- maximale Verschränkung,
keine Integrierte Information
 - „*the残酷st cut*“



[7]

$$\begin{aligned}(1): \rho &= \frac{1}{2} (| \uparrow \rangle \langle \uparrow | + | \downarrow \rangle \langle \downarrow |) \\(2): \rho &= | \uparrow \rangle \langle \uparrow | \\(3): \rho &= \frac{1}{4} (| \uparrow \rangle \langle \uparrow | + | \downarrow \rangle \langle \uparrow | \\&\quad + | \uparrow \rangle \langle \downarrow | + | \downarrow \rangle \langle \downarrow |) \\(4): \rho &= \frac{1}{2} (| \uparrow \rangle | \uparrow \rangle + | \downarrow \rangle | \downarrow \rangle) \\&\quad (\langle \uparrow | \langle \uparrow | + \langle \downarrow | \langle \downarrow |)\end{aligned}$$

Unabhängigkeit von Quantenzuständen

- Bell-Paar und perfekt korrelierte klassische bits, keine integrierte Information
 - ▶ Wie hoch kann Φ quantenmechanisch werden?

ρ -Diagonalitäts-Satz

Die Transinformation I ist in einer Basis am geringsten, in der ρ diagonal ist.

- für $\rho \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ mit n nicht entarteten Eigenwerten, Diskrete Minimierung über $n!$ Permutationen
 - ▶ höchste Werte für Φ bei $\rho \propto \rho^2$, k Eigenwerte sind k^{-1} übrige sind 0
 - ▶ $n = 4, k = 3 \Rightarrow \Phi \approx 0,2516$ bit
- klassische: $\Phi = \mathcal{O}(n)$,
quantenmechanisch: $n \rightarrow \infty \Rightarrow \Phi \rightarrow 0$

Unabhängigkeit von Quantensystemen

- Allgemeiner Hamiltonoperator H

Separation in Teilsysteme und Wechselwirkung

$$H = H_1 \otimes I + I \otimes H_2 + H_3$$

- $H_3 = 0$: H_1, H_2 „parallele Universen“
 - ▶ der härteste Schnitt bei minimalem H_3

H -Diagonalitäts-Satz

Der Hamiltonoperator H ist immer in der Energiebasis, in der H diagonal ist maximal separierbar ($\|H_3\|$ minimal).

Unabhängigkeit von Quantensystemen

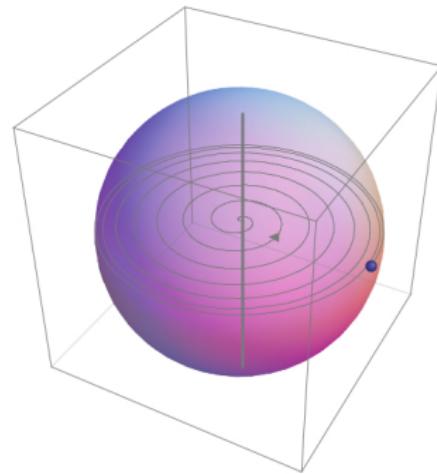
H -Diagonalitäts-Satz

Der Hamiltonoperator H ist immer in der Energieeigenbasis, in der H diagonal ist maximal separierbar ($\|H_3\|$ minimal).

- In dieser Separation kommutieren H_1 und H_2 mit einander und mit H_3
 - ▶ ähnlich zur Zeiger-Basis von Zurek, Zustände kommutieren mit WW-Hamiltonoperator [17]

Unabhängigkeit von Quantensystemen

- Dekohärenz treibt System H_1 mit $[H_1, H_3] = 0$ in einen zeitunabhängigen Zustand
 - ▶ Reiner Zustand → vollständig gemischter Zustand



[7]

Unabhängigkeits-Paradoxon

Zerlegt man das Universum in maximal unabhängige Objekte, kommt jegliche Veränderung zum erliegen.

6. Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Schon allgemein „schwierige Probleme“ bei Beschäftigung mit dem Bewusstsein
- In der Physik nicht anders, schon Beobachter unklar
 - ▶ Einbeziehung des Bewusstsein notwendig?
- Beobachter als Teilsystem betrachtet
 - ▶ Hohe Korrelation zu kleiner Auswahl an Eigenschaften der Umwelt
- Dekohärenz-Zeiten für Neuronen-Superpositionen
 - ▶ klassische Beschreibung notwendig
- Integrierte Information und Unabhängigkeit notwendige Eigenschaften von bewusster Materie

7. Backup

Autonomie

Principle	Definition
Information principle	A conscious system has substantial information storage capacity.
Dynamics principle	A conscious system has substantial information processing capacity.
Independence principle	A conscious system has substantial independence from the rest of the world.
Integration principle	A conscious system cannot consist of nearly independent parts.
Autonomy principle	A conscious system has substantial dynamics and independence.
Utility principle	An evolved conscious system records mainly information that is useful for it.

[7]

Autonomie

Principle	Definition
Information principle	A conscious system has substantial information storage capacity.
Dynamics principle	A conscious system has substantial information processing capacity.
Independence principle	A conscious system has substantial independence from the rest of the world.
Integration principle	A conscious system cannot consist of nearly independent parts.
Autonomy principle	A conscious system has substantial dynamics and independence.
Utility principle	An evolved conscious system records mainly information that is useful for it.

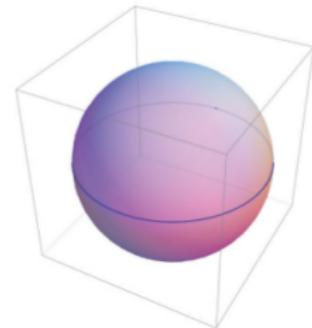
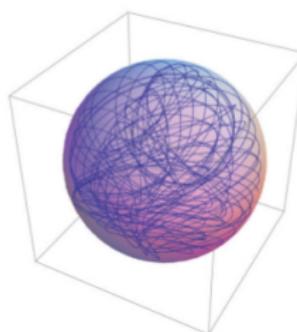
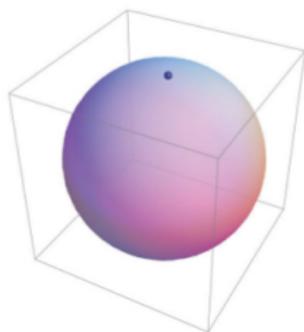
[7]

- Vereinigung von **Dynamik** und Unabhängigkeit
 - ▶ **Informationsverarbeitung**
- Maß für Dynamik

Energie-Kohärenz

$$\delta H = \frac{1}{\sqrt{2}} \|\dot{\rho}\| = \sqrt{\text{Tr} [H^2 \rho^2 - H \rho H \rho]}$$

- Unterschiedliche Grade an Dynamik:



[7]

- Reduktion der maximalen Energie-Kohärenz um wenige Prozent
 - ▶ Komplexe, chaotische Dynamik möglich

8. Quellen

Quellen I

- [1] *Definition: Beobachter.* 29. Juni 2016. URL:
<http://www.duden.de/rechtschreibung/Beobachter>.
- [2] *Bild:Fußball-Beobachter.* 29. Juni 2016. URL:
[http://orf.at/static/images/site/news/20160624/
em_frankreich_island_body_afp.4694318.jpg](http://orf.at/static/images/site/news/20160624/em_frankreich_island_body_afp.4694318.jpg).
- [3] *Bild:Himmels-Beobachter.* 29. Juni 2016. URL:
[http://www.beliefnet.com/columnists/
/dreamgates/files/2012/02/Astronomer.jpg](http://www.beliefnet.com/columnists/dreamgates/files/2012/02/Astronomer.jpg).
- [4] *Bild:Vortrag.* 29. Juni 2016. URL:
[http://www.start-mediation.de/wp-
content/uploads/2010/01/Vortrag_PMI.jpg](http://www.start-mediation.de/wp-content/uploads/2010/01/Vortrag_PMI.jpg).

Quellen II

- [5] *Definition: Bewusstsein.* 29. Juni 2016. URL:
[http://www.duden.de/rechtschreibung/
Bewusstsein#Bedeutung1a](http://www.duden.de/rechtschreibung/Bewusstsein#Bedeutung1a).
- [6] David Chalmers. „Facing Up to the Problem of Consciousness“. In: *Journal of Consciousness Studies* (1995). URL: <http://consc.net/papers/facing.html> (besucht am 29.06.2016).
- [7] Max Tegmark. „Consciousness as a State of Matter“. In: *ArXiv e-prints* (2015). arXiv: 1401.1219v3.
- [8] UC Regents Davis campus - <http://brainmaps.org>. *Bild:Neuronen.* 29. Juni 2016. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Neuron#/media/File:
Smi32neuron.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Neuron#/media/File:Smi32neuron.jpg).

Quellen III

- [9] Max Tegmark. „The Importance of Quantum Decoherence in Brain Processes“. In: *ArXiv e-prints* (1999). arXiv: quant-ph/9907009v2.
- [10] *Bild:Mirkrotubuli*. 29. Juni 2016. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Mikrotubulus#/media/File:FluorescentCells.jpg>.
- [11] By Thomas Splettstoesser (www.scistyle.com).
Bild:Mirkrotubulus Struktur. 29. Juni 2016. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Microtubule#/media/File:Microtubule_structure.png.
- [12] By EvanS. *Bild: Felsen*. 29. Juni 2016. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Rock_\(geology\)#/media/File:Balanced_Rock.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Rock_(geology)#/media/File:Balanced_Rock.jpg).

Quellen IV

- [13] Fir0002/Flagstaffotos. *Bild:Wassertropfen*. 29. Juni 2016. URL:
https://en.wikipedia.org/wiki/Water#/media/File:Water_droplet_blue_bg05.jpg.
- [14] By Brocken Inaglory. *Bild:Wasserdampf*. 29. Juni 2016. URL:
https://en.wikipedia.org/wiki/Steam#/media/File:Steam_phase_eruption_of_Castle_Geyser.jpg.
- [15] By Daniel Grohmann. *Bild:Entladung Tesla Spule*. 29. Juni 2016. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_coil#/media/File:Tesla_coil_\(discharge\)..JPG](https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_coil#/media/File:Tesla_coil_(discharge)..JPG).

Quellen V

- [16] Giulio Tononi. „Consciousness as Integrated Information: a Provisional Manifesto“. In: *Biol. Bull.* 215 (2008). URL: <http://www.biolbull.org/content/215/3/216.full> (besucht am 29. 06. 2016).
- [17] Wojciech H. Zurek. „Information transfer in quantum measurements: irreversibility and amplification“. In: *ArXiv e-prints* (2001). arXiv: quant-ph/0111137.
- [18] H. Dieter Zeh. „The Problem of conscious observation in Quantum Mechanical Description“. In: *ArXiv e-prints* (2000). arXiv: quant-ph/9908084v3.