

Die Interpretation der Wahrscheinlichkeiten in der Vielwelteninterpretation der Quantenmechanik

Ein Vortrag von
Philipp Herde



Gliederung

- **Die Vielwelteninterpretation**
- Wahrscheinlichkeiten in der VWI
- Das Problem mit Wahrscheinlichkeiten
 - Wahrscheinlichkeit & Intuition
 - Naive branch counting
- Lösungsansätze?
 - Frequentistische Wahrscheinlichkeit
 - Der rationalistische Ansatz
- Ausblick
 - Objektive Wahrscheinlichkeit
 - Freier Wille?
- Literatur



Die Vielwelteninterpretation

- Viele Welten bzw. „Multiversum“ als Folge eines konsequent zu Ende gedachten mathematischen Formalismus'
- Die zeitliche Entwicklung eines (isolierten) Systems erfolgt kontinuierlich und deterministisch nach der Schrödingergleichung



Die Vielwelteninterpretation

- Der Messprozess

$$|\uparrow\rangle |\phi_0\rangle \rightarrow |\uparrow\rangle |\phi_\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle |\phi_0\rangle \rightarrow |\downarrow\rangle |\phi_\downarrow\rangle$$

$$(|\uparrow\rangle \pm |\downarrow\rangle) |\phi_0\rangle \rightarrow |\uparrow\rangle |\phi_\uparrow\rangle \pm |\downarrow\rangle |\phi_\downarrow\rangle$$

- Superposition im Mikrokosmos \rightarrow
Superposition im Makrokosmos



Die Vielwelteninterpretation

- Einbeziehung des Beobachters

$$(|\uparrow\rangle \pm |\downarrow\rangle) |\phi_0\rangle |O_0\rangle \rightarrow |\uparrow\rangle |\phi_\uparrow\rangle |O_\uparrow\rangle \pm |\downarrow\rangle |\phi_\downarrow\rangle |O_\downarrow\rangle$$

- Aufspaltung der Realität in 2 Zweige
- Jeder Zweig enthält eine gesamte Welt, die klassischen Prinzipien unterworfen ist
- Interaktion zwischen den Zweigen ist nicht möglich

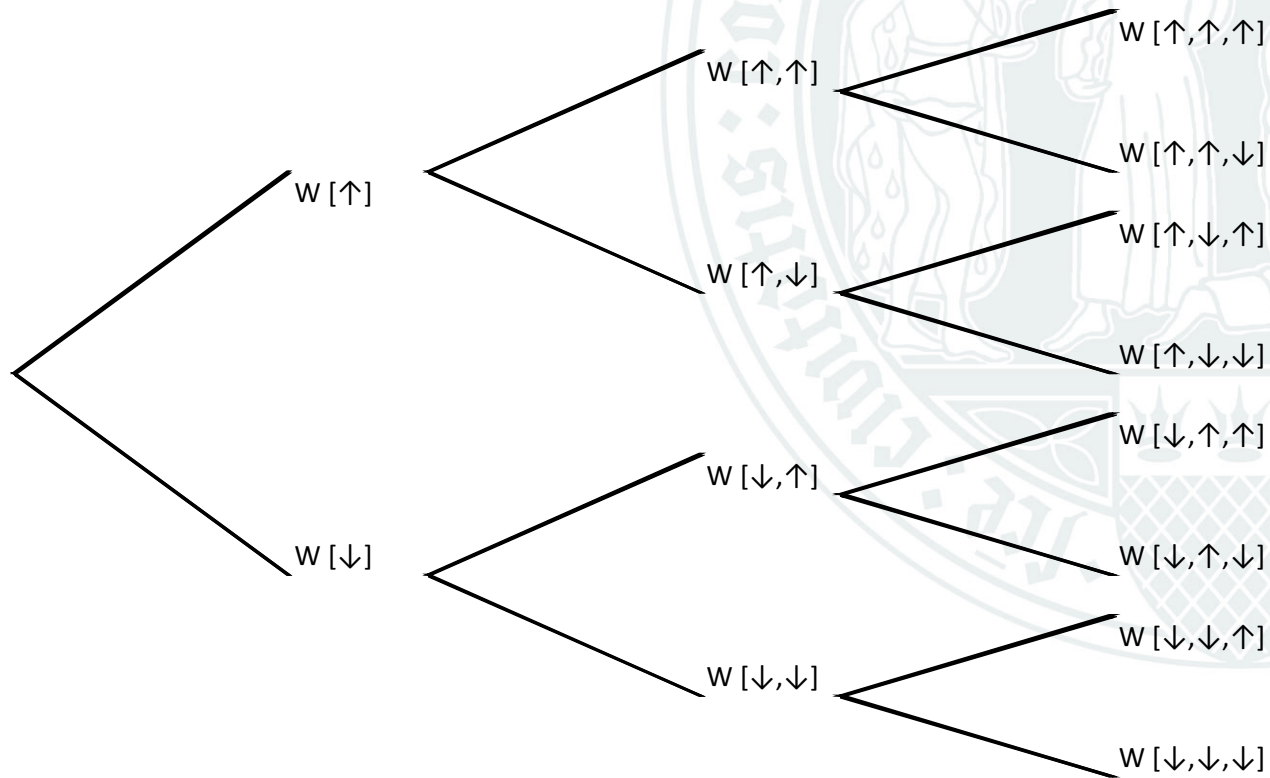


Die Vielwelteninterpretation

- Die Trennung zwischen Beobachter und Quantensystem ist aufgehoben:
- Beziehung besteht zwischen der Beobachterversion und dem dazu relativen Zustand des Systems



Die Vielwelteninterpretation



Gliederung

- Die Vielwelteninterpretation
- **Wahrscheinlichkeiten in der VWI**
- Das Problem mit Wahrscheinlichkeiten
 - Wahrscheinlichkeit & Intuition
 - Naive branch counting
- Lösungsansätze?
 - Frequentistische Wahrscheinlichkeit
 - Der rationalistische Ansatz
- Ausblick
 - Objektive Wahrscheinlichkeit
 - Freier Wille?
- Literatur



Wahrscheinlichkeiten in der VWI

- Wo liegt das Problem?
 - (1) Wahrscheinlichkeiten repräsentieren unsere Unkenntnis vom Mikrozustand eines Systems
 - (2) Wahrscheinlichkeiten repräsentieren den Umstand, dass das System sich nicht deterministisch verhält
- Beides trifft nicht auf die VWI zu



Wahrscheinlichkeiten in der VWI

Deterministische Theorie	Stochastische Theorie
„[A]ny such theory [...] consists of a space of instantaneous configurations, together with a rule saying which paths through that space [...] are dynamically possible [...]. In a deterministic theory, that rule is all-or-nothing: some paths are allowed, some are not, and for each initial segment of a path [...] there is at most one path which has the segment as its initial segment.“	„[F]or a given initial segment, the [stochastic] theory places a probability measure over all histories which have that segment as their initial segment [...] such that the set of all histories with the given segment as initial segment gets probability one.“

The Emergent Multiverse, S. 114.



Wahrscheinlichkeiten in der VWI

- Die VWI ist auf dem fundamentalen Level deterministisch, aber
- „[...] there is an emergent branching structure realised by the underlying unitary dynamics. [...] The emergent dynamics assign a weight to each history, and thus a relative weight to each history relative to each of its initial segments. And because of decoherence, these weights obey the axioms of probability measure [...].“
The Emergent Multiverse, S. 115.



Gliederung

- Die Vielwelteninterpretation
- Wahrscheinlichkeiten in der VWI
- **Das Problem mit Wahrscheinlichkeiten**
 - Wahrscheinlichkeit & Intuition
 - Naive branch counting
- Lösungsansätze?
 - Frequentistische Wahrscheinlichkeit
 - Der rationalistische Ansatz
- Ausblick
 - Objektive Wahrscheinlichkeit
 - Freier Wille?
- Literatur



Das Problem mit Wahrscheinlichkeiten

Wahrscheinlichkeit & Intuition

Um von Wahrscheinlichkeiten zu sprechen bedarf es vermeintlich

- (1) verschiedener alternativer Ausgänge als Ergebnis (z.B. einer Messung)
- (2) einer Unsicherheit des Beobachters bzgl. des Ergebnisses



Das Problem mit Wahrscheinlichkeiten

Wahrscheinlichkeit & Intuition

„Mit einer Wahrscheinlichkeit von X kommt bei Messung Y das Ergebnis Z heraus.“

- Im Sinne der VWI nicht sinnvoll: Alle möglichen „Alternativen“ sind real!



Das Problem mit Wahrscheinlichkeiten

Wahrscheinlichkeit & Intuition

- Könnte ein Beobachter das Multiversum von außen beobachten, dann stellte sich die Frage nach Wahrscheinlichkeiten gar nicht
- Wahrscheinlichkeiten bestehen also aus der Perspektive des internen Beobachters, der keinen Zugriff auf andere Zweige hat



Das Problem mit Wahrscheinlichkeiten

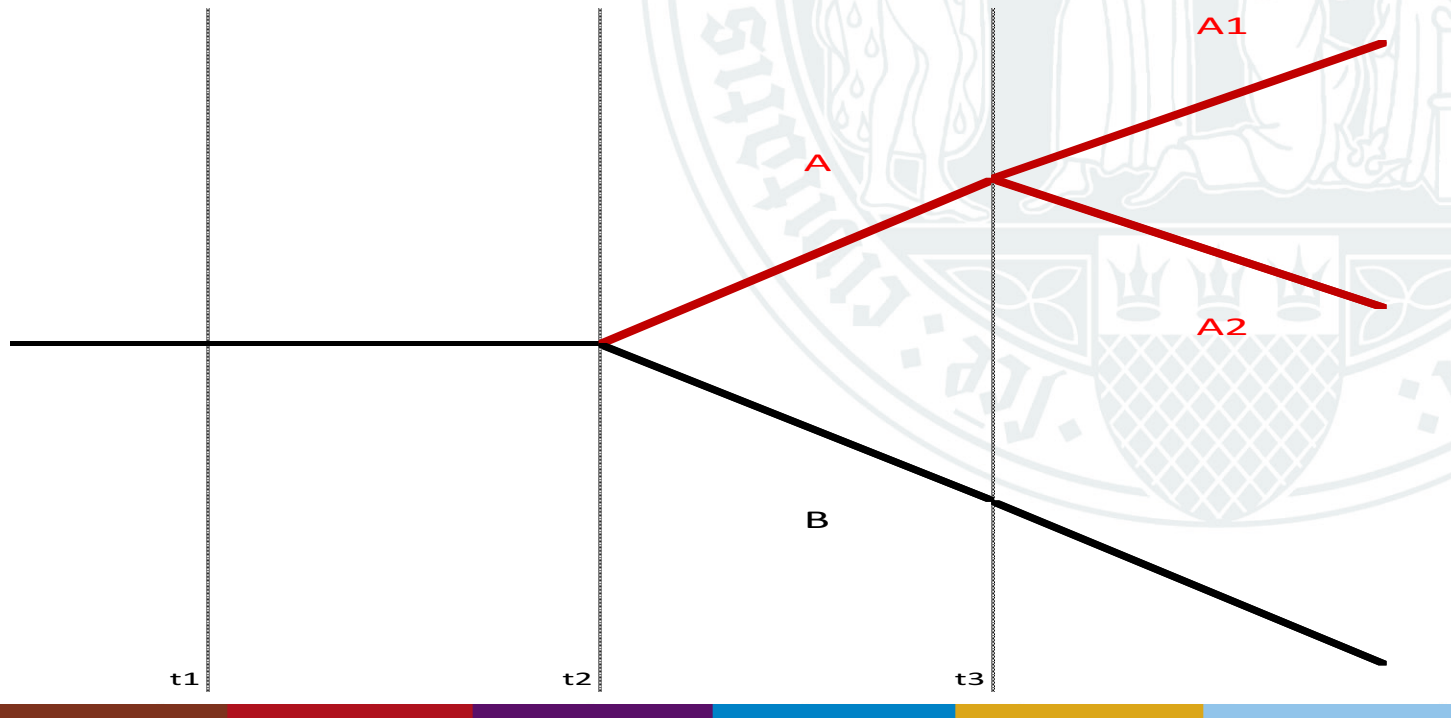
Naive branch counting

- Alle Zweige der Realität sind gleich real, also existieren alle mit gleicher Wahrscheinlichkeit
- Ein Experiment kann N Ergebnisse liefern. Die Wahrscheinlichkeit für jedes Ergebnis liegt also bei $1/N$



Das Problem mit Wahrscheinlichkeiten

Naive branch counting



Das Problem mit Wahrscheinlichkeiten

Naive branch counting

- Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit zu t_2 , den Hut zu haben?
→ $1/2$
- Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit zu t_3 , den Hut zu haben?
→ $2/3$



Das Problem mit Wahrscheinlichkeiten

Naive branch counting

- Zeitliche Inkonsistenz – bedingte Wahrscheinlichkeit muss berücksichtigt werden!
- Würden alle Verzweigungen gleichzeitig stattfinden, wäre die Angabe der Wahrscheinlichkeiten mit $1/2$ bzw. $2/3$ korrekt



Das Problem mit Wahrscheinlichkeiten

Naive branch counting

- Berechnung der Wahrscheinlichkeit

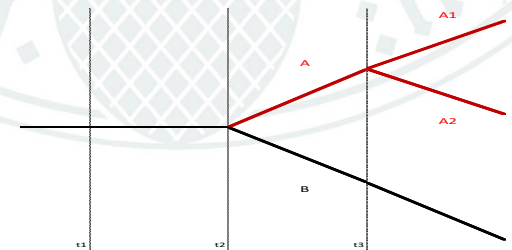
Wahrsch(Hut zu t3 | Hut zu t2) x

Wahrsch(Hut zu t2) + Wahrsch(Hut zu t3 | keinen Hut zu t2) x

Wahrsch(keinen Hut zu t2)

- Einsetzung

$$1 \times \frac{1}{2} + 0 \times \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$$



Das Problem mit Wahrscheinlichkeiten

Naive branch counting

„[T]he branching structure is given by decoherence, and decoherence does not deliver a structure with a well-defined notion of branch count. Very small changes in how the decoherence basis is defined [...] will lead to wild swings in the branch count. Insofar as a particular mathematical formalism for decoherence does deliver something that looks like a branch count (and many do not), that something is a mathematical artefact of no physical significance. And of course, if there is no such thing as branch count than there can be no branch count rule.“

The Emergent Multiverse, S. 120f.



Gliederung

- Die Vielwelteninterpretation
- Wahrscheinlichkeiten in der VWI
- Das Problem mit Wahrscheinlichkeiten
 - Wahrscheinlichkeit & Intuition
 - Naive branch counting
- **Lösungsansätze?**
 - Frequentistische Wahrscheinlichkeit
 - Der rationalistische Ansatz
- Ausblick
 - Objektive Wahrscheinlichkeit
 - Freier Wille?
- Literatur



Lösungsansätze?

Frequentistische Wahrscheinlichkeit

- Zusammenhang zwischen Wahrscheinlichkeit und relativer Häufigkeit?

„1. Probabilities are to be identified with the limiting relative frequencies as the number of repetitions tends to infinity.

2. Probabilities are to be identified with the actual relative frequencies after an actual infinity of repetitions.

3. Probabilities are to be extracted somehow from a large but finite number of repetitions.“

The Emergent Multiverse, S. 123.



Lösungsansätze?

Frequentistische Wahrscheinlichkeit

„[...] the lesson seems to be that probability may be measureable by means of frequencies, but it cannot be identified with them.“

The Emergent Multiverse, S. 131.



Lösungsansätze?

Der rationalistische Ansatz

- Das Kriterium dafür, dem Eintreten eines Ereignisses x die Wahrscheinlichkeit P zuzuordnen, liegt darin, dass ein rationaler Agent mit $1/P$ zu 1 auf das Eintreten des Ereignisses wetten würde
- Wahrscheinlichkeit ist also abhängig vom ‚rationalen Agenten‘
- Ein Sprechen von ‚Wahrscheinlichkeit für x ‘ funktioniert nicht – es geht um ‚die Wahrscheinlichkeit für x für den Agenten‘



Lösungsansätze?

Der rationalistische Ansatz

- Der Agent ist bereit $\lambda\text{€}$ (nicht mehr!) dafür zu zahlen, dass er $\lambda\text{€}$ bekommt, wenn x eintritt
- Dieses Wettverhalten nicht als Indikator dafür, was der Agent für die Wahrscheinlichkeit des Eintretens von x hält – das Wettverhalten definiert, was diese Wahrscheinlichkeit für den Agenten ist



Lösungsansätze?

Der rationalistische Ansatz

Übertragung auf VWI

- Szenario:
 - ein Quantensystem in Superposition von N Zuständen
 - welcher Zustand wird in 5 Minuten gemessen?
 - ein Automat gibt den Gewinn aus



Lösungsansätze?

Der rationalistische Ansatz

Übertragung auf VWI

VWI nicht wahr	VWI wahr
<ul style="list-style-type: none">- N mögliche Ergebnisse- wenn gewettetes Ergebnis eintritt, zahlt der Automat	<ul style="list-style-type: none">- N Sets von Zweigen, jedes für ein spezifisches (mögliches) Messergebnis- Automat am Ende ebenfalls auf jedem Zweig- die Automaten auf den Zweigen, in denen gewettetes und tatsächliches Ergebnis zusammenpassen, zahlen



Gliederung

- Die Vielwelteninterpretation
- Wahrscheinlichkeiten in der VWI
- Das Problem mit Wahrscheinlichkeiten
 - Wahrscheinlichkeit & Intuition
 - Naive branch counting
- Lösungsansätze?
 - Frequentistische Wahrscheinlichkeit
 - Der rationalistische Ansatz
- **Ausblick**
 - Objektive Wahrscheinlichkeit
 - Freier Wille?
- Literatur



Ausblick

Objektive Wahrscheinlichkeit

- „1. Objective probabilities do not really exist: there are only personal probabilities.
2. Objective and personal probabilities both exist, but are really the same thing: the apparent ‘subjectivity’ of personal probability is illusory.
3. Objective and personal probabilities both exist, and are distinct.“
The Emergent Multiverse, S. 138.



Ausblick

Freier Wille?

- Wenn alle möglichen Entscheidungen von mir auch tatsächlich realisiert werden – gibt es dann Entscheidungsfreiheit?
- Wettet ein Agent auf den bestimmten Ausgang eines Quantenereignisses, so ist der Handlung des Wettens bereits eine Entscheidung vorausgegangen.
- Jede Entscheidung dabei (also auch die, ob überhaupt gewettet wird) ist Teil einer Wettstrategie.
- Verschiedene Entscheidungen führen nun nicht zu verschiedenen Verzweigungen, sondern zu unterschiedlichen Verteilungen der Ausgänge des Quantenereignisses über alle Zweige.
- Der Agent als physikalisches System ist vielleicht mechanistischen/deterministischen Prozessen unterworfen. Dies steht jedoch in keiner besonderen Beziehung zur VWI.



Literatur

- Hilary Greaves, *Probability in the Everett interpretation*, <http://users.ox.ac.uk/~mert2255/papers/pitei.pdf> (12.01.2016)
- Claus Kiefer (Hg.), Albert Einstein, Boris Podolsky, Nathan Rosen, *Kann die quantenmechanische Beschreibung der physikalischen Realität als vollständig betrachtet werden?* (Springer 2015)
- David Wallace, *The Emergent Multiverse* (Oxford University Press 2014)

