

Philosophische Probleme der Quantentheorie

Wissenschaftstheorie

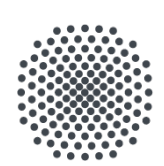
$|Daniel\rangle$

$|Fink\rangle$

\wedge

$|Marcel\rangle$

$|Messer\rangle$



Überblick

Geschichte der
Quantentheorie

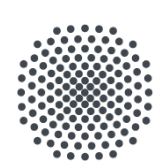
Minimal-
interpretation

Theorie des
Messprozesses

Lokalität &
Holismus

Philosophische
Konsequenzen

Aktuelle
Diskussionsfelder

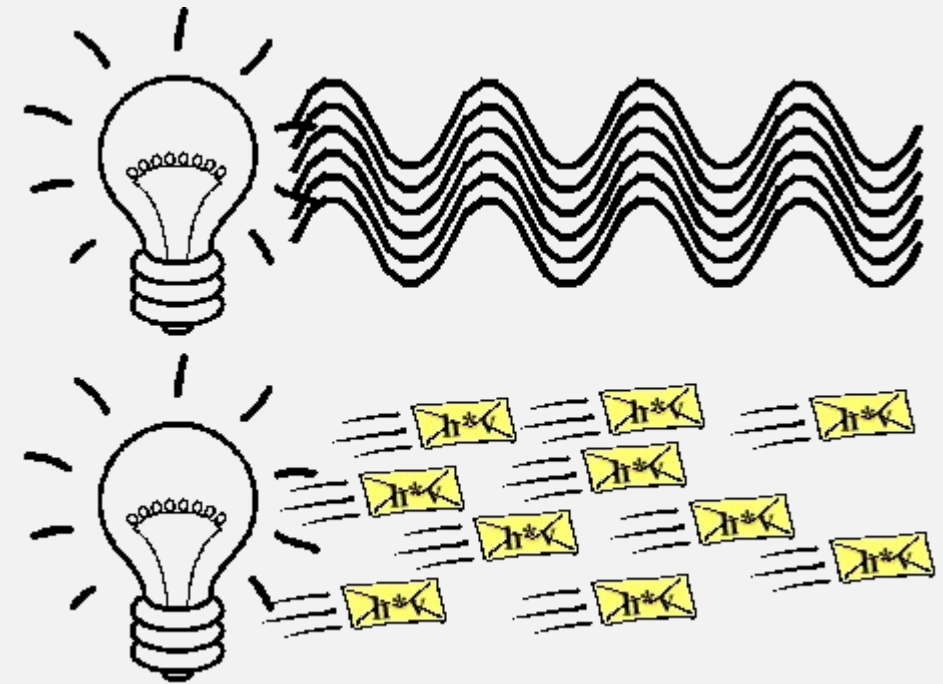


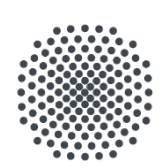
Geschichte der Quantentheorie

Geschichte der Quantentheorie

Quantelung

- **Max Planck (1900)**
- Elektromagnetische Strahlung ist eine Form von **Energiepaketen (Quanten)**

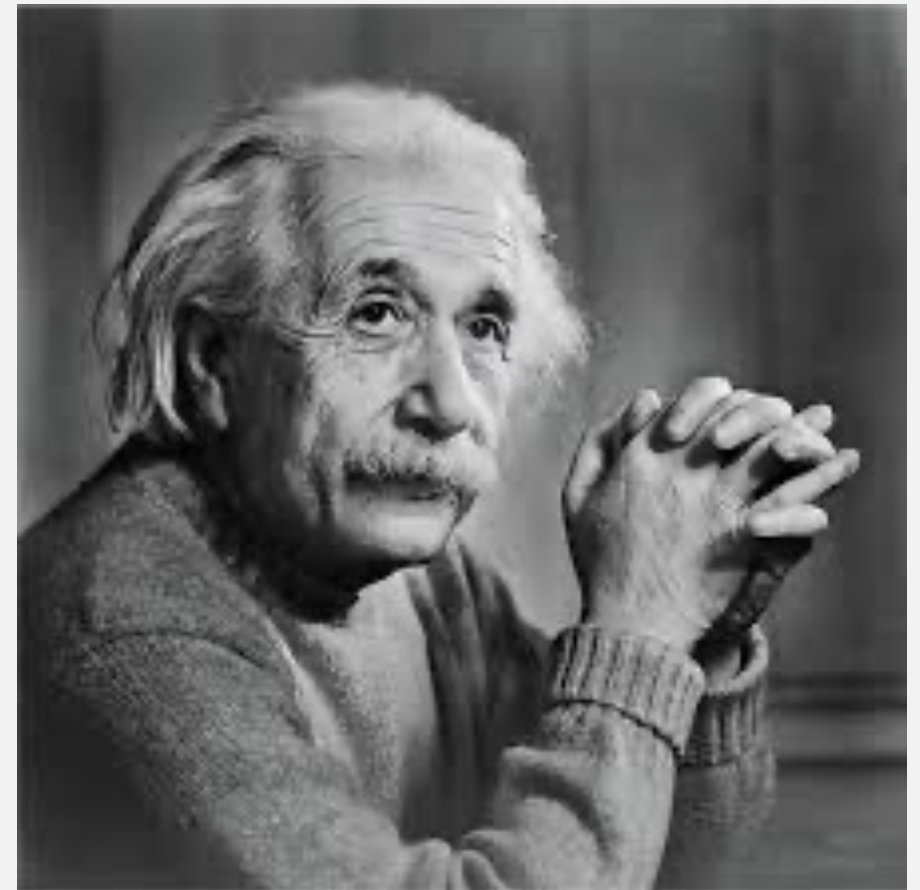
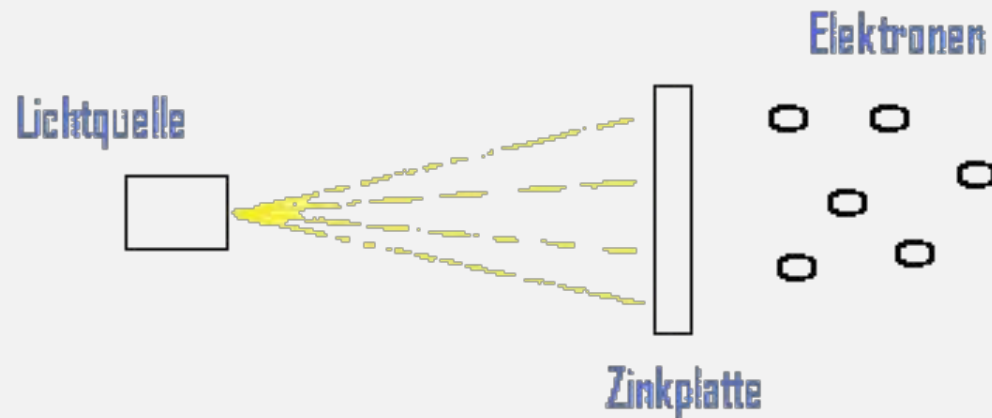


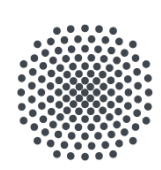


Geschichte der Quantentheorie

Photoeffekt

- **Albert Einstein (1905)**
 - Deutung des Photoelektrischen Effekts mittels der **Lichtquantenhypothese**

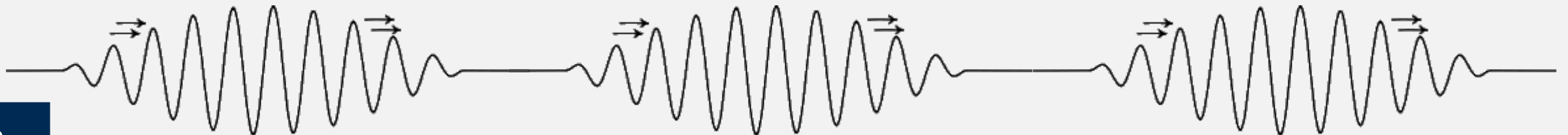


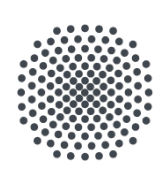


Geschichte der Quantentheorie

Entdeckungen

- **Millikan (1909)** bestimmt die Elementarladung mit Hilfe der Tröpfchenmethode
- **Rutherford (1911)** untersucht die Streuung von α -Teilchen an Goldatomen und stellt sein **Atommodell** auf
- **Bohr (1913)** entwickelt aus dem Rutherford-Modell und der Planckschen **Quantenhypothese** sein neues **Atommodell**
- **De Broglie (1924)** führt das Konzept der **Materiewelle** ein





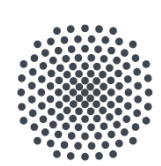
Geschichte der Quantentheorie

Schrödinger-Gleichung

- **Erwin Schrödinger (1925)**
 - Erweitert die Überlegungen von **de Broglie** über Materiewellen zu einer Wellenmechanik, die durch die **Schrödingergleichung** beschrieben wird

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(t)\rangle = \hat{H} |\psi(t)\rangle$$

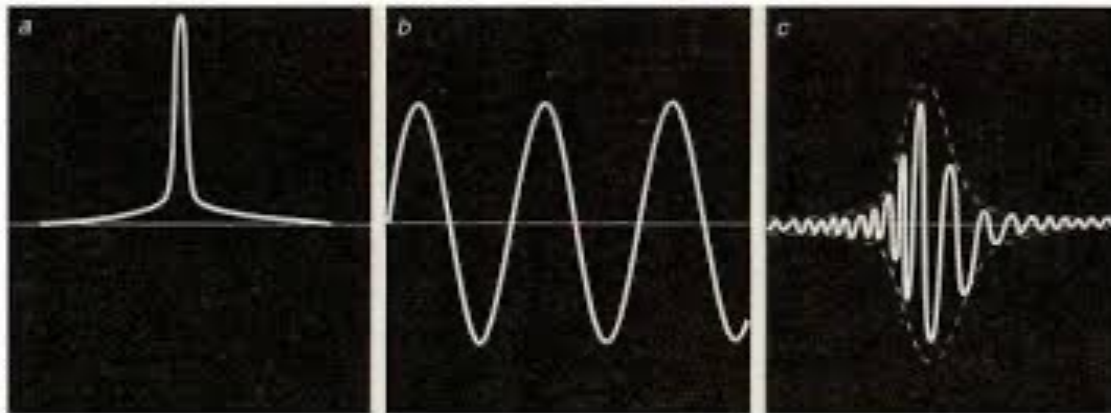


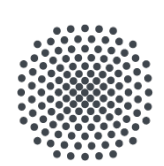


Geschichte der Quantentheorie

Unschärferelation

- **Werner Heisenberg (1927)**
 - Stellte die These auf, dass zwei **nicht vertauschbare Eigenschaften** eines Teilchens **nicht** gleichzeitig beliebig genau gemessen werden können

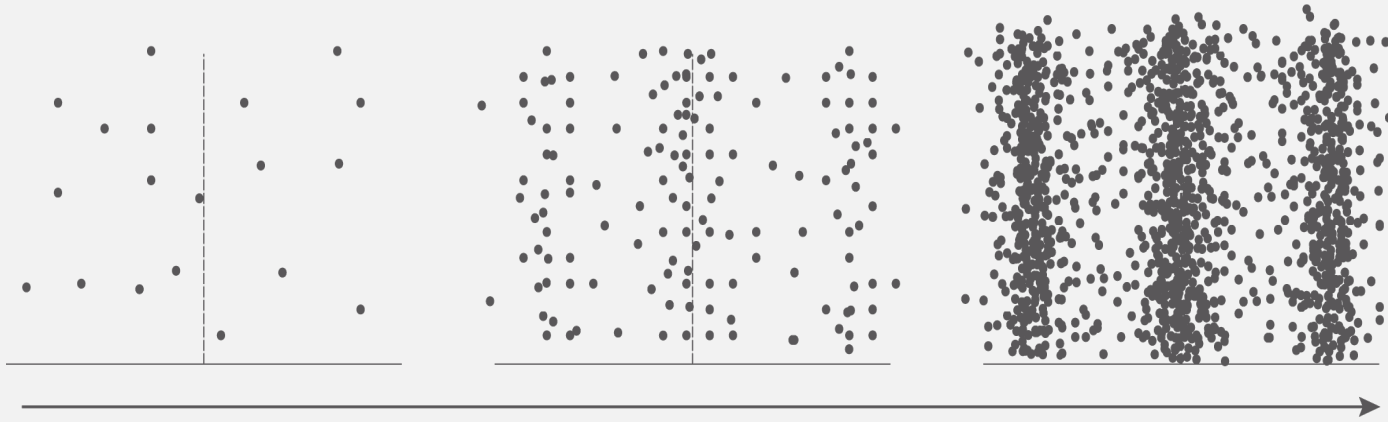


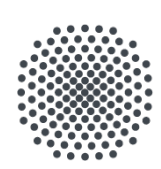


Geschichte der Quantentheorie

Wahrscheinlichkeits-Interpretation

- **Max Born (1927)**
 - Deutete das Betragsquadrat der Wellenfunktion als **räumliche Dichte** für die **Wahrscheinlichkeit**, das Quantenobjekt an einem bestimmten Ort zu einer bestimmten Zeit zu detektieren

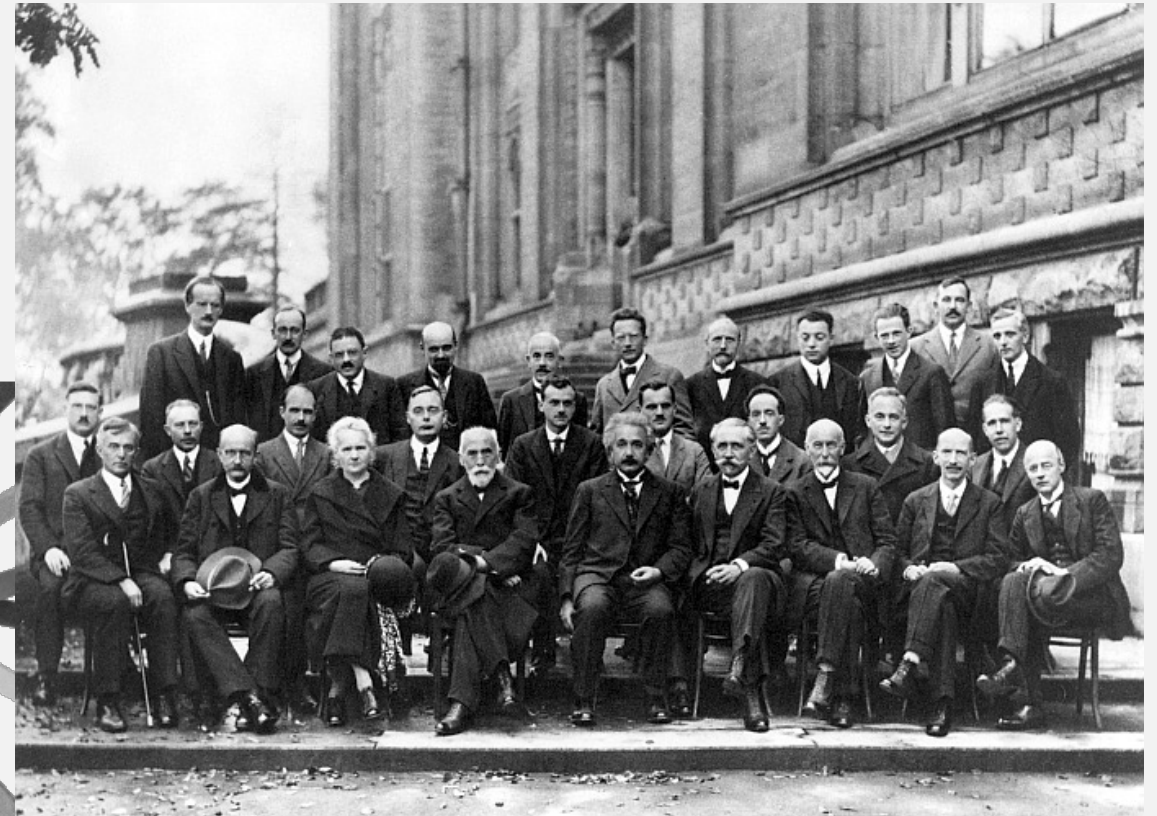


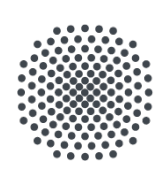


Geschichte der Quantentheorie

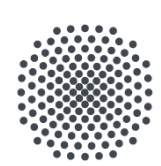
Kopenhagener
Deutung

- **Kopenhagener Deutung (1927)**
 - Mathematischer Theoriekern
 - **Vereinheitlichung** der bisherigen Theorien und Thesen





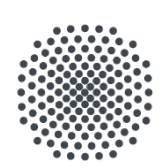
Minimal- interpretation



Minimalinterpretation

Interpretation

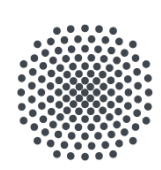
- Verschiedene Stufen der Interpretation
 - Erste Stufe:
 - Versuch den mathematischer Formalismus in der Anwendung mit Erfahrung in Verbindung zu bringen
 - Legt man nun die Randbedingungen bzw. Annahmen fest bzgl.:
 - Annahme über Bedeutung von Termen in der mathematischen Struktur
 - Annahme über empirische Testbarkeit
- Minimalinterpretation



Minimalinterpretation

Beschreibung

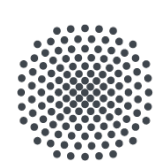
- Reicht um im Alltag im Kontext der Quantentheorie zu arbeiten
- Bei der Minimalinterpretation müssen alle Interpretationen übereinstimmen
 - Beschränkung auf Minimalinterpretation ist die am meisten verbreitete Interpretation
- Beispiele für zentrale Annahmen
 - $|\langle\psi|\phi_m\rangle|^2$ WS. bei Messung mit $|\psi\rangle$ Messwert für Zustand $|\phi\rangle$ zu bekommen
 - $|\psi\rangle$ Zustand vor der Messung keine Aussage
 - $\langle\psi|\phi\rangle$ Skalarprodukt
 - $|\phi\rangle$ Element aus der Menge der Basiszuständen
 - Eigenwert ist definiert und vorhersagbar für jeden Basiszustand



Minimalinterpretation

Ergänzungen

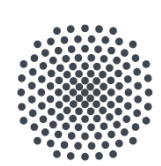
- Fügt weitere Annahmen hinzu geleitet von dem Wunsch die Quantentheorie in das übrige physikalische und naturphilosophische Weltbild einzuordnen.
 - Nutzt Quantentheorie nicht nur als Instrument
 - Macht sich eine Vorstellung wie die Welt ist wenn Theorie wahr wäre



Minimalinterpretation

Ergänzungen

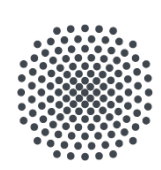
- Große Diskussion über Einordnung in komplexes physikalisches Weltbild was weiteren Interpretationsspielraum zulässt
 - Fragen zur Semantik der Zustandsbeschreibung also Bedeutung von $|\phi\rangle$
 - $|\phi\rangle$ Ensemble von Quantenobjekten oder auch Einzelsystem
 - Bezieht sich $|\phi\rangle$ auf objektiven Zustand in der Welt „ontische Interpretation“ oder nur auf durch Experimente gewonnenes Wissen „epistemische Interpretation“
 - Interpretation des Wahrscheinlichkeitsbegriffes
 - Relative Häufigkeiten, subjektives Unwissen oder objektive Disposition (Propensiäten)



Minimalinterpretation

Ergänzungen

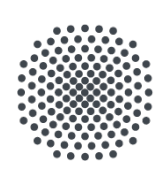
- Grenzfälle der Interpretationen fordern Abänderung der Theorie
 - → Ergänzung durch verborgene Parameter die Quantenmechanik als statistische Mechanik über einen deterministischen Unterbau gedeutet werden kann
- Weitere Große Felder liefern fragen über den Messprozess
 - Wird der Zustand bei Messung wirklich verändert?
 - Veränderung vielleicht doch durch Bewegungsgleichung der Quantenmechanik beschrieben? Eventuell durch Anpassungen?
 - Gibt es einen Mechanismus der Messungen realisiert, ohne die Wahrscheinlichkeit zu verwenden?



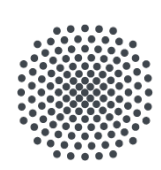
Minimalinterpretation

Ergänzungen

- Die Debatten veranschaulichen dass es noch keine akzeptierte Standardauffassung zu finden ist.
 - → Ist die Quantentheorie so unvollkommen, dass man für sie keine vernünftige Interpretation finden kann?



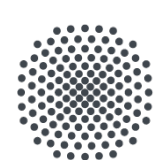
Theorie des Messprozesses



Theorie des Messprozesses

Interpretation

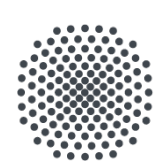
- Kopenhagener Interpretation
 - Unter anderem von Niels Bohr unterstützt und erreichte damals großen Zuspruch von führenden Wissenschaftlern
 - Heute: nur noch historische Bedeutung weil:
 - Verzicht auf Analyse der genauen Vorgänge des Messprozesses da die Existenz eines externen Messgeräts vorausgesetzt wird
 - → Physiker, die dem Universum einen Zustandsvektor zuordnen wollen haben sich deshalb nach einer Alternative umgesehen!



Theorie des Messprozesses

Modell

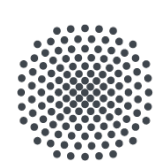
- Quantenmechanisch formulierte Modelle
 - Stehen im Zentrum neuerer Analysen
 - Stark vereinfachtes aber anschauliches Beispiel
 - Modell beschreibt Messung einer Eigenschaft die nur 2 Werte hat
 - „Teilchen durchläuft einen Filter ohne Veränderung“ (Wert 1) Zustand $|a\rangle$
 - „Teilchen wird absorbiert“ (Wert 2) Zustand $|b\rangle$
 - → Quantenmechanik gibt es noch einen dritten Zustand $|c\rangle$ (durch Superposition $|a\rangle$ und $|b\rangle$)
 - → bei Messung wird festgestellt in welchen Basiszustand c übergeht!



Theorie des Messprozesses

Zweite Dynamik

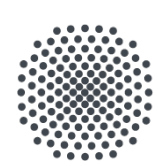
- Es gibt verschiedene Arten diesen Übergang zu erklären
 - 1.) Zweite Dynamik
 - Zustandsänderung ist ein Prozess besonderer Art
 - Unterscheidet sich von der Zustandsentwicklung des isolierten Systems wesentlich !
 - Da Prozess nicht durch Schrödingergleichung beschrieben werden kann
 - → Ist also keine normale zeitliche Entwicklung des Systemzustands



Theorie des Messprozesses

Indeterminismus

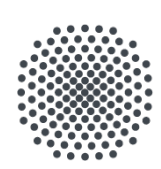
- 2.) Indeterminismus
 - QM kann nicht vorhersagen nach welcher Richtung der Zustandsvektor $|c\rangle$ sich dreht
 - Theorie gibt nur Wahrscheinlichkeit für verschiedene Messergebnisse an
 - → Quantentheorie indeterministisch
 - → instantanten akausalen Prozess



Theorie des Messprozesses

Alternativen

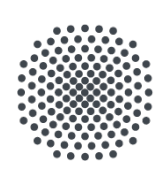
- Alternative Messtheorien
 - Geschilderte Übergänge werden häufig als Kollaps bezeichnet
 - Man kann Theorien des Messprozesses in zwei Gruppen aufteilen:
 - → Zusammenbruch / Kollaps wird akzeptiert
 - Siehe vorherige Theorien



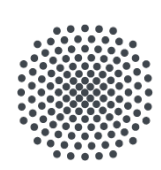
Theorie des Messprozesses

Kein Kollaps

- → Wird nicht akzeptiert d.h. also finden einer Theorie ohne Kollaps
 - Viele-Welten-Interpretation
 - So eine Theorie legt Nahe, dass alle möglichen Vergangenheiten und Zukünfte die passieren real sind und jede eine tatsächliche Welt repräsentiert
 - Veränderung der Schrödingergleichung
 - Schrödingergleichung so zu verändern, dass Übergänge im Rahmen der normalen Dynamik der Theorie erklärbar sind



Lokalität & Holismus



Lokalität & Holismus

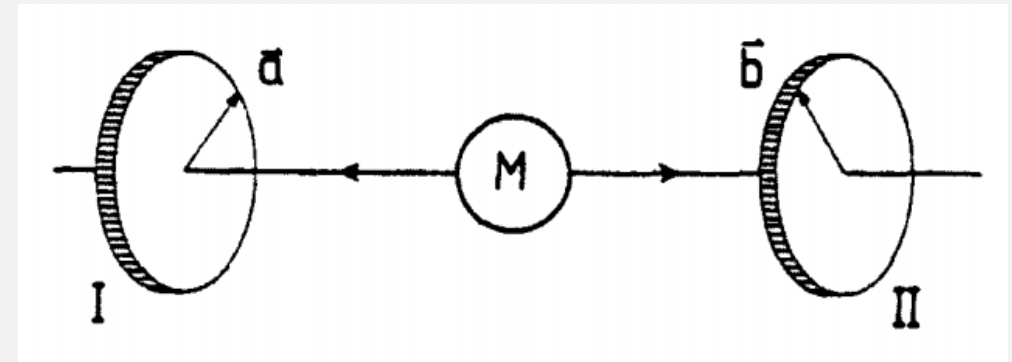
Verschränkung

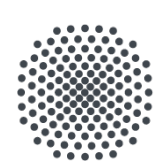
- Verschränkung
 - Zwei Objekte treten in Wechselwirkung und werden dann wieder getrennt
 - Wechselwirkung ist nicht mehr in derselben Weise beschreibbar
 - → Sind keine eigenen Zustandsfunktionen mehr
 - Besonderheit der Quantentheorie
 - Erzwingt Abweichung von herkömmlicher Denkweise
 - Gilt als Nachweis das Quantenmechanik noch nicht Vollständig

Lokalität & Holismus

Verschränkung

- Beispiel zur Verschränkung
 - → Messergebnisse sind korreliert
 - Korrelation ist nicht über gemeinsame Vergangenheit erklärbar
 - gesteuert durch instantane geheimnisvolle Fernwirkung
 - Quantenmechanik liefert dafür keine Erklärung
 - Trotz räumliche Separation keine Trennung
 - → Ergebnis der 2. Dynamik

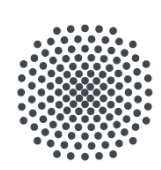




Lokalität & Holismus

Verschränkung

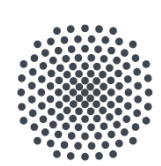
- Quantenobjekte + Wechselwirkung
 - → Bleiben verschränkt
- Gekoppelter Messprozess obwohl räumliche Trennung
- Phänomene werden beschrieben durch
 - Lokalität
 - Holismus



Lokalität & Holismus

Begrifflichkeiten

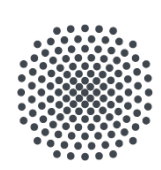
- Holismus
 - „Das Ganze“ System als ganzes betrachtet
 - → Nicht die Zusammensetzung ihrer Teile
- Lokalität
 - Beschreibt räumlichen Zustand



Lokalität & Holismus

Separabilität

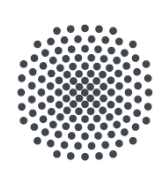
- System ist separabel wenn
 - Zustandsbeschreibung holistisch
 - Lokalität Fernwirkung ausschließt
 - → Gesamtzustand nicht durch die Zustände der Komponenten festgelegt ist



Lokalität & Holismus

Konsequenz

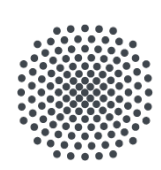
- Bisher keine deterministische Quantentheorie die
 - Alle statistische Vorhersagen der Quantentheorie wiedergibt
 - Im (lokalen Sinne)
 - → Messausgang hängt nur vom Zustand des zerfallenden Teilchens sowie von den Eigenschaften des Messgeräts ab
 - → Insb. keine Berücksichtigung des anderen Geräts



Lokalität & Holismus

Konsequenz

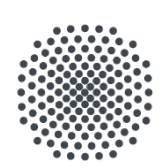
- Im Bereich der Verschränkung sind Messergebnisse gut bestätigt
 - → Theorie mit verborgenen Parameter nicht korrekt



Lokalität & Holismus

Konsequenz

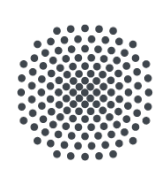
- Verschränkung hat auch folgen für den Messprozess
 - Quantenobjekt Zustand $|c\rangle = c_1|a\rangle + c_2|b\rangle$
 - Zustände der Messgeräte $|A\rangle, |B\rangle$
 - Nach Schrödingergleichung Gesamtsystem
 - $\rightarrow |c\rangle = c_1|a\rangle|A\rangle + c_2|b\rangle|B\rangle$
 - \rightarrow Messgerät hat noch keinen Zustand
- \rightarrow 2. Dynamik liefert instantan indeterministisch
 - $|a\rangle|A\rangle$ oder $|b\rangle|B\rangle$



Lokalität & Holismus

Konsequenz

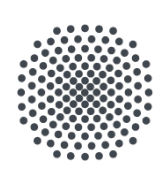
- Schrödingers-Katze
 - Zustand ob tot oder lebendig nicht einsehbar
 - Zustand $|b\rangle|B\rangle$ wäre
 - Atom nicht zerfallen $|b\rangle$ und Katze nicht tot $|B\rangle$
 - Zustand $|a\rangle|A\rangle$ wäre
 - Atom zerfallen $|a\rangle$ und Katze tot $|A\rangle$



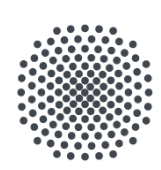
Lokalität & Holismus

Konsequenz

- Katze ist im Schwebezustand
 - → Ausweg Katze als Messgerät auffassen
 - → 2. Dynamik in Anspruch nehmen
- → Demonstriert Willkür bei der Frage was ein Messgerät ist



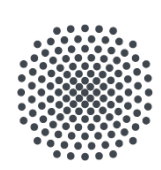
Philosophische Konsequenzen



Philosophische Konsequenzen

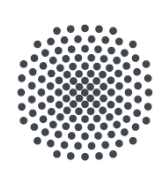
Bewusstsein

- Messprozesses → Materie hängt vom **Bewusstsein** des Beobachters ab
- Subjektivistische Auffassungen sind verbreitet – beruhen auf Missverständnissen
- **Indeterminismus** → beseitigt scheinbaren Widerspruch zwischen Willensfreiheit und deterministischer Physik?



Philosophische Konsequenzen

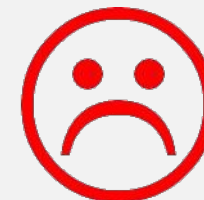
**Ist die Quantentheorie eine
indeterministische Theorie?**

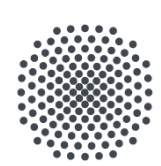


Philosophische Konsequenzen

Indeterministisch?

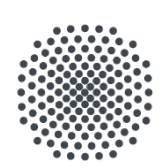
- Schrödingergleichung ist eine **Bewegungsgleichung** (legt Zustände fest)
 - Quantentheorie ist eine **deterministische** Theorie
- Ausgang eines einzelnen **Messprozesses** ist objektiv **zufällig**
 - Quantentheorie ist eine **indeterministische** Theorie





Philosophische Konsequenzen

**Liefert die Quantentheorie Argumente gegen die
Möglichkeit einer objektiven/realistischen
Beschreibung der Natur?**



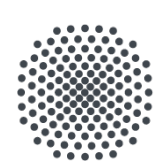
Philosophische Konsequenzen

Wiss. Realismus

- Erkennbare **Wirklichkeit** existiert und ist unabhängig vom menschlichen Denken
- Eine bestätigte wissenschaftliche Theorie beschreibt diese **Wirklichkeit**
- Alle beinhalteten Entitäten sind **objektiv**

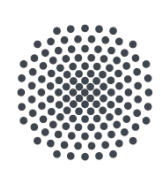
Ich und Welt





Philosophische Konsequenzen

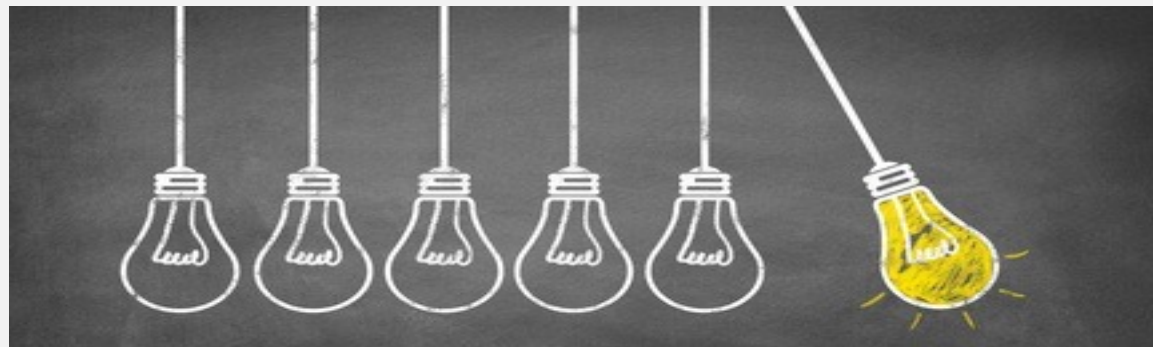
**Liefert die Quantentheorie Argumente gegen die
Möglichkeit einer objektiven/realistischen
Beschreibung der Natur?**

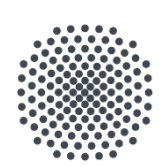


Philosophische Konsequenzen

QT & Realismus

- Anti-Realist: „Ein physikalisches System muss **für alle** Observablen festgelegte Wahrheitswerte besitzen“
- Realist: „Diese Behauptung unterstricht den Willen der Festhaltung an der **klassischen Ontologie**, welche jedoch nicht identisch ist mit dem erkenntnistheoretischen Realismus“

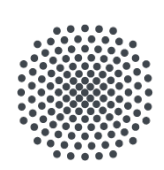




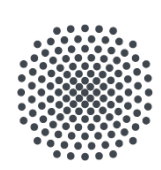
Philosophische Konsequenzen

QT & Objektivität

- Eigenschaften des physikalischen Systems abhängig von der **Messanordnung**?
- Quantentheorie ist Wissenschaft von der Natur, wie sie sich **uns zeigt**, wenn wir sie mit **bestimmten Verfahren** beobachten
- Sind die Schwierigkeiten die Quantentheorie ohne solche relationalen Vorbehalte zu verstehen ein Hinweis auf ein **irregeleitetes objektivistisches Programm**?
- Nicht-objektivistische Interpretationen vergeben die Chance, die Details des Messprozesses besser zu verstehen



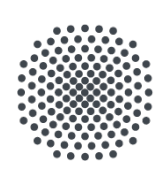
Aktuelle Diskussions- Felder



Aktuelle Diskussionsfelder

Dekohärenz

- Ansätze zur Lösung des Messproblems
- Wie können **klassische Beschreibungen** aus der Quantentheorie hervorgehen?
- Übergang von einer Superposition der Form $|c\rangle$ in ein **statistisches Gemisch** aus Zuständen der Form $|a\rangle$ und $|b\rangle$ – ähnlich wie in der **Thermodynamik**
- Motiviert durch eine nie ganz abzuschirmende **Wechselwirkung** eines Quantenobjekts mit seiner **Umgebung**
- Verschränkung ist Ergebnis konkreter **Wechselwirkungsprozesse**



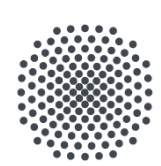
Aktuelle Diskussionsfelder

Dekohärenz

- Übergang von Quantentheorie zu klassischen Eigenschaften bestimmt, ob die Quantentheorie als **universell** aufgefasst werden kann
- Thermodynamik → **Näherungen** → Erkenntnisprozess
→ Prinzipieller Näherungscharakter physikalischer Theorien



Unzufriedener Realist

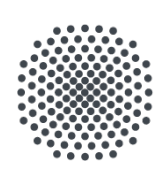


Aktuelle Diskussionsfelder

Viele Welten Theorien

- Interpretationen bei denen die Quantentheorie **nur eine Dynamik** besitzt
 - Problem des Messvorgangs wird gelöst durch Annahme „**Vieler Welten**“
 - Bei einer Messung spaltet sich die Welt auf, wobei wir lediglich **Zugang zu einem Zweig** dieser Aufspaltung haben

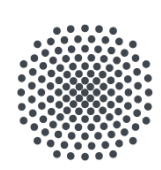




Aktuelle Diskussionsfelder

Viele Welten Theorien

- Die Wellenfunktion des Universums entwickelt sich in der Zeit gemäß der **Schrödingergleichung**
- **Alle** möglichen Messergebnisse treten tatsächlich auf (in verschiedenen Welten)
- Die Wellenfunktion des „Multiversums“ ist die Summe aller Wellenfunktionen der einzelnen „Universen“
- Quantentheorie wird **deterministisch**
- Schrödingergleichung gilt universell (**keine zweite Dynamik**)
- Es treten **keine nichtlokalen Effekte** auf

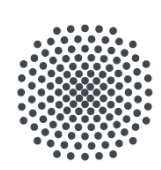


Aktuelle Diskussionsfelder

Viele Welten Theorien

■ Probleme

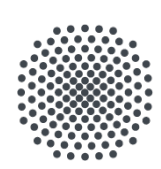
- Begriffe wie Quantenobjekt oder Messprozess bleiben **unpräzisiert**
- Ist die Annahme vieler Welten (und damit die **Vervielfachung der Ontologie**) ein zu hoher Preis für die Vorteile
- Ockhams Rasiermesser???



Aktuelle Diskussionsfelder

Quantenfeldtheorie

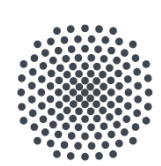
- In der klassischen Physik kann man die **räumliche Gestalt** der Objekte unmittelbar aus dem mathematischen Formalismus ablesen
- Ähnliches gilt für Felder die Raumpunkten eine Feldstärke zuordnet
- Sind Quantenobjekte **diskontinuierlich** lokalisiert oder **kontinuierlich** verteilt?
- Sind sie durch **Bahnen** identifizierbar oder wie **Wellen** superponierbar?



Aktuelle Diskussionsfelder

Quantenfeldtheorie

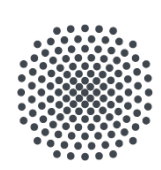
- Die Quantenfeldtheorie versucht auch **elektromagnetische Felder** in der Art der Quantentheorie zu beschreiben
- Wechselwirkenden Teilchen & Felder werden analog zu Observablen behandelt
- Quantisierung von Feldern → Entstehung & Vernichtung von Elementarteilchen
- Erfolgreiche Verwendung um den Ausgang von Experimenten vorherzusagen
- ABER extrem schwierig abzulesen wie die Objekte in den Raum eingebettet sind



Quellen

Nützliches...


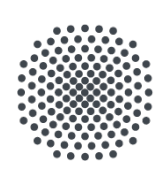
- Zeittafel der Quantentheorie
 - http://www.quantum.physik.uni-mainz.de/lectures/2005/ss05_quantenphysik/Zeittafel_QP.pdf
- Geschichte der Quantenmechanik
 - <http://heureka-stories.de/Erfindungen/1900-1927---Die-Quantenmechanik/Die-ganze-Geschichte>
- Heisenbergsche Unschärferelation
 - https://de.wikipedia.org/wiki/Heisenbergsche_Unsch%C3%A4rferelation
- Bornsche Wahrscheinlichkeitsinterpretation
 - https://de.wikipedia.org/wiki/Bornsche_Wahrscheinlichkeitsinterpretation



Quellen

Nützliches...

- Quantenfeldtheorie
 - <https://de.wikipedia.org/wiki/Quantenfeldtheorie>
- Wissenschaftstheorie
 - Andreas Bartels / Manfred Stöckler (Hrsg.) 2007



**Vielen Dank
für die
Aufmerksamkeit**