***Alle Texte aus:
1. Bohmsche Mechanik, Oliver Passion,\*
 2. Why isn't every physicist a Bohmian, Oliver Passion\*

\* Texte aus diesen 2 Quellen sind zum Teil wörtlich entnommen oder wurden von
 den Autoren sinngemäß zusammengefasst oder interpretiert.***

**1. Was ist Bohmsche Mechanik**

 **Folie 5.**

Bohmsche Mechanik ergänzt die Schrödingergleichung um Bewegungsgleichungen für die Ortskoordinaten des jeweiligen Quantensystems, also etwas für das Hüllenelektron des Wasserstoffatoms.

In der Bohmschen Mechanik sind Wellen- und Teilcheneigenschaften also nicht ***komplementä****r\** zueinander, und ein Teilchen hat zu jedem Zeitpunkt einen definierten Ort.

Die statistischen Vorhersagen der üblichen Quantenmechanik können ***alle*** reproduziert werden, wenn man für die Anfangsbedingungen der Orte von Teilchen, die durch die Wellenfunktion 𝛹 beschrieben werden eine
⎸𝛹⎹𝟤 - Verteilung wählt. Dies nennt man die Quantengleichgewichtshypothese.

---> BM konnte bisher noch nicht relativistisch gemessen (durch
 Experiment) nachgewiesen werden.
\* gegensätzlich, aber sich ergänzende Eigenschaften

**1. Was ist Bohmsche Mechanik**

**Folie 6.**

In der Bohmschen Mechanik wird ein System nicht mehr durch die Wellenfunktion alleine beschrieben, sondern zusätzlich durch die Konfiguration, d.h. durch die Ortskoordinaten der "Quantenobjekte".

Diese werden als "Teilchen" mit einem jederzeit definierten Ort aufgefasst. Die Wellenfunktion wird dabei genauso wie in der Quantenmechanik als Lösung der Quantenmechanik gewonnen.

Für die Zeitentwicklung der Teilchenorte tritt jedoch eine zusätzliche Gleichung auf, die sog. ***"guiding equation"***. Aus historischen Gründen habe diese zusätzlichen Bestimmungsstücke (nämlich die Teilchenorte), die die Bezeichnung

 ***"verborgene Variable"***

erhalten.

Verborgen sind diese Teilchen natürlich nur innerhalb des üblichen Formalismus der Quantenmechanik.

*"Holland"*  argumentierte, dass im Wortsinn die *"verborgenen Variablen"* Bohms die eigentlichen Beobachtungsgrößen sind.
- Etwa die punktförmigen Schwärzungen der Fotoplatte im Doppelspaltexperiment-

Streng genommen ist die Wellenfunktion das eigentlich "*verborgene"* Objekt der Quantenmechanik.

**2. Warum Bohmsche Mechanik**

**Folie 8.**

**Reproduktion aller experimentellen Ergebnisse nicht relativistischer
Quantenmechanik**

Die Bohmsche Mechanik kann alle experimentellen Ergebnisse reproduzieren. Sie hat jedoch ein radikal abweichendes Wirklichkeitsverständnis zur Folge.

Im Doppelspalt führen die Trajektorien (Bahnen) individueller Teilchen auf das beobachtbare Interferenzmuster, da die Teilchenbewegungen durch die Wellenfunktion (die im Spalt interferiert) geleitet wird.
Der schwankende Welle-Teilchen-Dualismus der Kopenhagener Deutung (Komplementarität) kann vermieden werden.
Das Messproblem findet in der Bohmschen Mechanik eine elegante Lösung.

Die große Bedeutung der Bohmschen Mechanik liegt somit im Bereich der Grundlagen und der Interpretation der Quantenmechanik.

Viele Anhänger der Bohmschen Mechanik sehen zudem in Ihr einen wichtigen Ansatz, um die Grundlagen der modernen Physik so zu formulieren, dass die offenen Fragen der aktuellen Forschung (etwa einer Quantentheorie der Gravitation) erfolgreicher adressiert werden können.

**2. Warum Bohmsche Mechanik**

**Folie 8.**

**John Bell und die Bohmsche Mechanik**Zu den wenigen prominenten Physikern, die eine Lanze für die Bohmsche Mechanik gebrochen haben, gehört John Stuart Bell (1928-1990).
Der Ruhm Bells gründet sich auf den Beweis der nach ihm benannten Ungleichung (***ein Beispiel dazu folgt im Kapitel 3.***).

Diese Arbeit war bahnbrechend für ein genaueres Verständnis der "Nichtlokalität" in der Quantenmechanik.
Bell sah aber auch ein Problem in der relativistischen Verallgemeinerung der Bohmschen Mechanik.

**2. Warum Bohmsche Mechanik**

**Folie 8.**

**Die Kopenhagener Deutung**

Die Kopenhagener Deutung gilt als Standard-Interpretation der Quantenmechanik (Ergebnis der Diskussion von Bohr, Einstein, Heisenberg, andere).

 Die Kopenhagener Deutung beginnt mit einem Paradoxon:
 Jedes physik. Experiment, gleichgültig, ob Erscheinungen des täglichen Lebens oder der Atomphysik, muss in den begriffen der klassischen Physik beschrieben werden.
 Trotzdem ist die Anwendbarkeit dieser Begriffe begrenzt durch die Unbestimmtheitsrelationen.
In der Quantenmechanik wird die Zustandsbeschreibung immer die Ungenauigkeit gemäß der Unschärferelation enthalten.
Diese Ungenauigkeit wird beschrieben in der mathematischen Formulierung der Quantenmechanik mit Hilfe einer Wahrscheinlichkeitsfunktion (Wellenfunktion). Hierbei ist zu beachten:

 dass die Wahrscheinlichkeitsfunktion nicht selbst einen Ablauf von Ereignissen in der Zeit darstellt. Sie stellt eine Tendenz zu Vorgängen, die Möglichkeit für Vorgänge oder eine Kenntnis von Vorgängen dar.

Die Schwierigkeit anzugeben, was zwischen zwei Messungen erfolgt, begründet Heisenberg mit der sowohl teilchen- als auch wellenhaften Natur der Materie.
Bohr hat daher den Gebrauch beider Bilder empfohlen, die er als ***komplementär*** zu einander bezeichnet.

**2. Warum Bohmsche Mechanik**

**Folie 8.**

**Die Kopenhagener Deutung**

Der Begriff Komplementarität charakterisiert dabei nicht nur das Verhältnis von Welle zu Teilchen bzw. Impuls und Ort. Die Möglichkeit einer raumzeitlichen Beschreibung sei ebenfalls komplementär zu einer kausal-deterministischen Beschreibung.
Man kann also zusammenfassen, dass nach Heisenberg der Kern aller Deutungsprobleme der Quantenmechanik darin liegt, physikalische Begriffe anwenden zu müssen, die aus einem anderen Erfahrungsbereich - dem der klassischen Physik - stammen.
Die Anwendbarkeit dieser klassischen Begriffe ist jedoch durch die Unschärferelation begrenzt. Dadurch wird der Status der Wellenfunktion kompliziert.

**2. Warum Bohmsche Mechanik**

**Folie 9.**

**Die Ensemble-Interpretation**

Die Kopenhagener Deutung ist dafür kritisiert worden, dass sie keine durchgängige quantenmechanische Beschreibung des Messvorganges liefert. Der Anspruch als fundamentale Naturbeschreibung ist damit nur schwer zu vereinbaren. Die vermutlich treffendste Formulierung dieses Sachverhalts geben Landau und Lifschitz.

 **Zitat sie Folie**

Eine davon abweichende Interpretation, die keinen Bezug auf eine klassisch zu beschreibende Umgebung nimmt, ist von Ballentine vorgeschlagen worden. Ausgangspunkt seiner Überlegungen ist die Frage, was genau durch die Wellenfunktion 𝛹 bzw. durch den Zustandsvektor ⎹𝛹〉 beschrieben wird. Er unterscheidet 2 mögliche Sichtweisen:
 **Zitat 2 siehe Folie**
Nach Ballentine führt eine Anwendung der Quantenmechanik auf den Messvorgang in Kombination mit Sichtweise A) unweigerlich zum Messproblem.
Die Kopenhagener Deutung, die nach Ballentine Position A) vertritt, entgeht diesem Schluss nur dadurch, dass sie der Wellenfunktion gar keinen objektiven Status einräumt.
Ballentime vertritt die Auffassung B), die er "statistische Interpretation", bzw. Ensemble-Interpretation" nennt. Diese Interpretation der Quantenmechanik ist übrigens in großer Nähe zu den Ideen Einsteins. Eine der ersten systemat. Darstellungen kam von Ballentine. (1970).

**2. Warum Bohmsche Mechanik**

**Folie 10.**

**Dekohärenz**

Das Messproblem besteht im Wesentlichen in der Interpretation von Überlagerungszuständen.
Die Quantenmechanik kennt 2 unterschiedliche Formen der Superposition:
1. Kohärente\* Überlagerungen
 sind durch das Auftreten von Interferenzeffekten charakterisiert.
2. Inkohärente Überlagerungen
 die Phasenbeziehung ist verloren gegangen.

In vielen Zusammenhängen kommt es durch die Wechselwirkung mit der Umgebung zu sog. "Dekohärenzeffekten".
Weiter nicht näher darauf eingehen, siehe letzter Vortrag.

\* Eigenschaft von Wellern im dynamischen Verlauf einer gemeinsamen
 Regel zu folgen

**2. Warum Bohmsche Mechanik**

**Folie 10.**

**Welle-Teilchen-Dualismus**Die Ensemble Interpretation trifft keine Aussagen über die einzelnen Ensemble Mitglieder.
Die Bedeutung der Wellenfunktion als Werkzeug zur Berechnung der statistischen Verteilung der betrachteten Merkmale legt einen
 ***"Welle-Teilchen-Dualismus"*** der Materie nahe.
Ballentine betont, dass es irreführend ist, Quantenobjekten auch Welleneigenschaften zuzuordnen, auch wenn die mathemat. Struktur der Schrödingergleichung als Wellengleichung dazu einlädt.

Nur im speziellen Einteilchen-Fall (Orts- und Konfigurationsraum fallen zusammen) gelingt dies.

**Determinismus**

Die Wahrscheinlichkeitsaussagen der Quantenmechanik sind durch die Schrödingergleichung ***"determiniert",*** und andere Aussagen werden nicht getroffen.

Die Ensemble-Interpretation besitzt in diesem Sinn eine natürliche Affinität zu Theorien verborgener Variablen, bei denen die Dynamik der Ensemble-Mitglieder näher bestimmt wird.

**2. Warum Bohmsche Mechanik**

**Folie 11.**

**Schlussfolgerungen**

Die Analyse des Messproblems zwingt dazu entweder den Erkenntnistheo-
retischen Status der Wellenfunktion einer subtilen Analyse zu unterziehen
(„Kopenhagener Deutung“) oder die Wellenfunktion nur als Repräsentation
der statistischen Eigenschaften einer großen Menge identisch präparierter
Zustände aufzufassen („Ensemble-Interpretation“).

Folgt man der „Ensemble-Interpretation“, ergibt sich jedoch eine elegante
Motivation für die Beschäftigung mit der Bohmschen Mechanik.
Dann gilt nämlich, dass für eine Beschreibung individueller Objekte und
Prozesse der Rahmen der Quantenmechanik notwendig verlassen werden
muss.

**3. Verborgene Variablen**

**Folie 13.**

**Das Messproblem**

Das Messpostulat, nach dem⎹cn ⎸2 die Wahrscheinlichkeit für das Messergebnis $│n⟩$ angibt, gehört zu den Grundannahmen der Quantenmechanik.

Das sog. ***"Messproblem"*** der Quantenmechanik entsteht, wenn man ihre universelle Gültigkeit behauptet. Dann können nämlich prinzipiell sowohl der Gegenstand der Messung als auch der Messapparat in die quantenmechanische Beschreibung eingeschlossen sein.

**Die Bellsche Ungleichung**

Nach EPR ist die Realität einer Eigenschaft der physikalischen Welt, wenn deren Wert ohne Störung des Systems mit Sicherheit vorausgesagt werden kann.
Dieses Argument ist also mit einer ***"Lokalitätsforderung"*** verknüpft, also der Annahme, dass es keine Fernwirkung gibt.
Wenn man aber daran festhält, dass die Messung an Teil 1 den möglichen Ausgang der Messung an Teil 2 beeinträchtigen kann, liegt es nahe anzunehmen, dass deren Ausgang bereits vorher festlag.
Man muss also die Existenz ***"verborgener Variablen"*** postulieren, die die quantenmechanische Beschreibung vervollständigen.

-->

Es ist u.a. das bemerkenswerte Resultat von Bell, dass "lokale" Theorien verborgener variablen zu vorhersagen führen, die von der Quantenmechanik in experimentell überprüfbare Situationen abweichen.

Inspiriert wurde Bell dabei von der Bohmschen Mechanik und speziell von Ihrer Nichtlokalität.

Die Konsequenzen der Bellschen Analyse reichen jedoch weit über den Bereich von Theorien verborgener Variablen hinaus.

***Dieses Jahrhundertresultat der theoretischen Physik erlaubt es, über die fundamentalen Konzepte "Realität", "Kausalität", "Lokalität" und "Determinismus" experimentell überprüfbare Aussagen zu treffen.***

**3. Verborgene Variablen**

**Folie 14.**

**Spinkorrelationen in einer lokalen Theorie verborgener Variablen**

Siehe Kopie aus Buch Seite 64.

**Beweise über die Unmöglichkeit einer Theorie verborgener Variablen.**

Johann von Neumann kam 1932 zu dem Schluss, dass eine Vervollständigung der QM mit verborgenen Variablen unmöglich sei.

Bell wies zuerst darauf hin, dass die Linearität der Erwartungswerte physikalisch unsinnig ist, wenn die betreffenden Operatoren nicht kommutieren\*. Schließlich repräsentieren die verschiedenen Operatoren das Ergebnis verschiedener Messungen. Zudem haben in einer Theorie verborgener Variablen Erwartungswerte keinen statistischen Charakter.

Die Wahrscheinlichkeitsaussagen der QM kann eine Theorie verborgener Variablen dadurch reproduzieren, dass ihre Zustände über die Verteilung der zusätzlichen Parameter gemittelt werden.
***Die Bohmsche Theorie leistet genau das.***

\* vertauschbar

**4. Kann experimentell zwischen BM und QM
 unterschieden werden?**

**Folie 16.**

**Die Nicht-Eindeutigkeit der Bohmschen Mechanik**

Die individuellen Teilchenbahnen der Bohmschen Mechanik entziehen sich auf Grund der Quantengleichgewichtsbedingung der Beobachtbarkeit, führen aber im statistischen Mittel auf die Vorhersagen der QM.
Die Beobachtbarkeit der Trajektorien ist durch diese statistische Äquivalenz zur QM jedoch nicht eindeutig festgelegt.

In die Bewegungsgleichung (siehe Folie) kann man jedoch ein zu wählendes Geschwindigkeitsfeld einfügen, sodass die resultierenden Bahnen ebenfalls die statistischen Vorhersagen der QM reproduzieren.

 --> siehe Folie

Die Bohmsche Mechanik ist in dieser Hinsicht also als der einfachste Vertreter einer ganzen Klasse möglicher Theoriebildungen aufzufassen, zwischen denen experimentell nicht unterschieden werden kann.

***Verbinden Anhänger der Bohmschen Mechanik mit dieser Theorie jedoch die Hoffnung aufzuklären was "tatsächlich" auf mikroskopischem Niveau passiert, ist dies offensichtlich irrig.***

Folie 16.

**Folgerungen aus der Verletzung von Bells Ungleichung**

Einer Messung der Korrelation (hier: die Wahrscheinlichkeit für den Winkel Ɵij zwischen den Richtungen einer Spinnmessung) konnte tatsächlich durchgeführt werden, und man findet eine Verletzung der Bellschen Ungleichung in Übereinstimmung mit den Vorhersagen der QM.

Zahlreiche oberflächliche Darstellungen des Gegenstandes sehen im experimentellen Nachweis der Verletzung der Bellschen Ungleichung einen schlagenden Beweis für die Unmöglichkeit einer Theorie verborgener Variablen. Ebenso wie eine erneute glanzvolle Bestätigung der QM.

Es könne also wieder zur quantenmechanischen Tagesordnung übergegangen werden.

Dabei wird jedoch übersehen, dass
1. die BM die Verletzung der Bellschen Ungleichung ebenfalls voraussagt und
2. aus der experimentellen Verletzung der Bellschen Ungleichung wichtige Einschränkungen an die Form und Eigenschaften aller Theorien folgen, die nicht im Widerspruch zu den Aussagen des Experiments stehen wollen.

**4. Kritik an der Bohmschen Mechanik**

**Folie 18.**

Die BM fristet seit ca. 60 Jahren ein Nischendasein und ist weit davon entfernt, Eingang in die allgemeine Physikausbildung zu finden.

Tatsächlich ist es lohnend, sich mit Argumenten gegen die Theorie der BM auseiander zu setzen.

Die Kritik an der BM kann grob in 2 Klassen geteilt werden:

1. Basierend auf wissenschaftsorientierten Argumenten:
 Hier wird stärker ein ***"metatheoretischer"*** Diskurs geführt

2. Davon zu unterscheiden sind Ansätze, die die Konsistenz und
 Verallgemeinerungsfähigkeit der BM problematisieren.

 ---> alle Themen: siehe Folie

**4. Kritik an der Bohmschen Mechanik**

**Folie 18.**

**Nichtlokalität und relativistische Verallgemeinerung**
Auf dem Niveau individueller Trajektorien ist die BM nicht lokal (Fernwirkung).
(frei: Häufigster Anlass für Kritik an der BM)

Die Vertreter der BM setzen dem entgegen, dass auch die BM generell nicht "lokal" ist.

Tatsächlich kann man argumentieren, dass die die "Nichtlokalität" einer nicht relativistischen Theorie kein fundamentales Problem darstellt.

Mit dem Vorwurf der Nichtlokalität ist deshalb in der Regel der Zweifel verbunden, eine befriedigende, relativistische Verallgemeinerung der BM angeben zu können.

*(Unlauter ist, mit dem Hinweis auf die existierenden, relativistischen Quantenfeldtheorien die Bedeutung der BM bestreiten zu wollen.
Dieses Argument übersieht die Tatsachen, dass die besagten relativistischen Quantenfeldtheorien ebenfalls ein ungelöstes Messproblem haben).*

**4. Kritik an der Bohmschen Mechanik**

**Folie 18.**

**Der Metaphysikvorwurf**

Der Metaphysikvorwurf kommt von der Anhägern der Quantenmechanik (QM), die eine weitere Auslegung der QM darstellen würde. Sie sei quasi mit der QM identisch und kann deshalb ignoriert werden.

Hinter diesen Vorwurf steht allerdings ein Vorwurf von physikalischer Theorie, der "operational" genannt werden kann.
Er reduziert eine Theorie auf die Menge der von Ihr gemachten Vorhersagen.

**4. Kritik an der Bohmschen Mechanik**

**Folie 18.**

**Ockham‘s Razor**

Wir haben eben schon gesagt, dass die QM und die BM zumindest in ihren Ergebnissen zum gleichen Ergebnis kommen und zwei äquivalente Theorien sind.

Ockham's Razor ist ein Begriff der Aussagt, dass man von zwei äquivalenten Theorien diejenige bevorzugen soll, mit der kleineren Zahl von Annahmen auskommt.

da die übliche Schrödingerthoerie eine echte Teilmenge der BM darstellt, sollte nach diesem Kriterium der üblichen QM der Vorzug vor der BM gegeben werden.

[Warum sollte man den zusätzlichen Ballast der Trajektorien in Kauf nehmen, wenn keine neuen Vorhersagen getroffen werden können.]

Die Frage ist, ob die Voraussetzungen für die Anwendbarkeit von Ackham's Rasierer überhaupt erfüllt sind. Schließlich unterscheiden sie sich radikal in ihrer jeweiligen Vorstellung von Physikalische Realität

**4. Kritik an der Bohmschen Mechanik**

**Folie 18.**

**Leere Wellenfunktion**Die Wellenfunktion in der Quantenmechanik
In der ***QM*** stellt die Wellenfunktion kein Feld im physikalischen Sinn dar.
Es erscheint vielmehr wie eine Hilfskonstruktion um Vorhersagen über den Ausgang von Messungen zu gewinnen.

Im Gegensatz dazu bekommt die Wellenfunktion in der ***BM*** eine reale physikalische Bedeutung. Sie hat jedoch eine Doppelfunktion:
1. Sie drückt eine Wahrscheinlichkeitsverteilung des Quantengleichgewichts
 aus.
2. Aber sie leitet auch die Teilchenbewegung (v∼∇S) und hat damit einen
 "realen" Charakter. Der Ort zeichnet den Zweig der Wellenfunktion aus,
 der dem tatsächlichen Zustand des Systems entspricht. Alle anderen
 Zweige der Wellenfunktionen, in die keine Trajektorien führen, sind
 jedoch ebenfalls "real".
 Der Raum ist gemäß der BM also mit Myriaden von "leeren
 Wellenfunktionen" bevölkert.

**5. Schlussbemerkung**

**Folie 20.**

Es zeigt sich, dass die BM eine interessante Synthese der kontroversen Sichtweisen von Einstein und Bohr leistet.
Wie Einstein, behauptet die BM die Unvollständigkeit der üblichen Quantenmechanik und postuliert die Teilchenorte als zusätzliche
***reale*** und ***objektive*** Eigenschaft.

In großer Nähe zu Bohrs Auffassung jedoch bekommen alle anderen Eigenschaften erst durch den speziellen Kontext der Messung eine Bedeutung.

Es drängt sich der Eindruck auf, dass der zweifelhafte Ruf der der Beschäftigung mit Theorien verborgener Variablen anhaftet, teilweise auch historischen Zufälligkeiten geschuldet ist.

Die BM stellt einen einzigartigen Beitrag in der Debatte um die Interpretation der QM dar. Bohm selber sah sogar den Hauptverdienst seiner Theorie darin, nachzuweisen, dass eine deterministische Interpretation der QM überhaupt möglich ist.
Dies wurde von den Begründern der QM bekanntlich geleugnet.

Abschließend nach Bertram Russel:

***"Der Wert der Philosophie darf nicht von irgend einem festumrissenen
Wissensstand abhängen, den man durch Studium erwerben könnte.

Der Wert der Philosophie besteht im Gegenteil gerade wesentlich in
der Ungewissheit, die sie mit sich bringt."***--> Anhang: Bild Doppelspalt und animierte Präsentation der
 Wellenfunktion