Philosophie der MINT-Fächer in der Praxis

Präsentation beim Workshop „Quantenphysik an der Schule“ der Heisenberg-Gesellschaft

Dr. Tobias Jung

Lehrstuhl für Philosophie und Wissenschaftstheorie
Technische Universität München (TUM)

13. Juli 2014

Motivation für einen philosophischen Zugang zu den MINT-Fächern

- Verschiedene Zugänge zur Physik:
  - Experimentell: Beobachtung als Ausgangspunkt (Frage „an die Natur [...] in der Qualität [...] eines bestallten Richters“)
  - Theoretisch: bekannte Gesetze als Ausgangspunkt für Ableitung neuer Aussagen
  - Philosophisch: Fragen nach der Natur der Natur
- Heutige Unterrichtspraxis: Überwiegen des experimentellen Zugangs ergänzt vom theoretischen Zugang
- Plädoyer für Berücksichtigung des philosophischen Zugangs

Der Projektansatz Phil:MINT im Rahmen des TUM-Schulclusters Benediktbeuern I

- Versuch einer Implementierung des philosophischen Zugangs
- Organisatorischer Rahmen:
  - TUM-Schulcluster Benediktbeuern: zwölf Schulen verschiedener Schularten
  - Technische Universität München (TUM)
  - Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung (ISB)
  - MB-Dienststelle Oberbayern-West
  - Eberhard von Kuenheim-Stiftung (EKS)
  - Zentrum für Umwelt und Kultur (ZUK)
  - Weitere Projektpartner

Der Projektansatz Phil:MINT im Rahmen des TUM-Schulclusters Benediktbeuern II

- Philosophie:
  - Inhaltlich:
    - Philosophie der Mathematik und Philosophie der Naturwissenschaften
    - Wissenschaftstheorie
    - Technikphilosophie
    - Ethik
    - ...
  - Methodisch:
    - Vierklang: Wissen – Philosophieren – Handeln – Haltung
    - Reflexion und Bewertung
    - Disziplin der Transdisziplinarität
- Derzeit noch strukturelle und finanzielle Hindernisse ...

Konkretisierung des Projektansatzes Phil:MINT

- Beispiel: Philosophische Aspekte der Quantentheorie im Rahmen des gymnasialen Physikunterrichts der Oberstufe
- Klar: Diktat des Lehrplans und der Zeit in der Oberstufe
- Möglichkeiten:
  - Studientage
  - W- und P-Seminare
  - Einfließenlassen in den Unterricht
  - Doppelstunde mit Präsentation und Diskussion

Ausgangspunkt: Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation

- Werner Heisenberg (1901–1976)
- März 1927: „Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik“

Eine einfache Formel ...

- Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation in üblicher mathematischer Darstellung für den Unterricht:

$$\boxed{\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}}$$

- $h = 6,6261 \cdot 10^{-34}$ J s: Plancksches Wirkungsquantum
- Δx: Unbestimmtheit des Ortes
- Δp: Unbestimmtheit des Impulses
- $p = m \cdot v$: Impuls ist Produkt aus Masse m und Geschwindigkeit v

... bereitet Schwierigkeiten

- Mathematische Struktur bereitet Schülerinnern und Schülern keine großen Probleme
- Aber philosophische Fragen:
  - Was bedeutet Unbestimmtheitsrelation wirklich?
  - Was bedeutet Unbestimmtheitsrelation für die Natur bzw. unsere Erkenntnis der Natur?
  - Was bedeuten die einzelnen Symbole in der Unbestimmtheitsrelation?

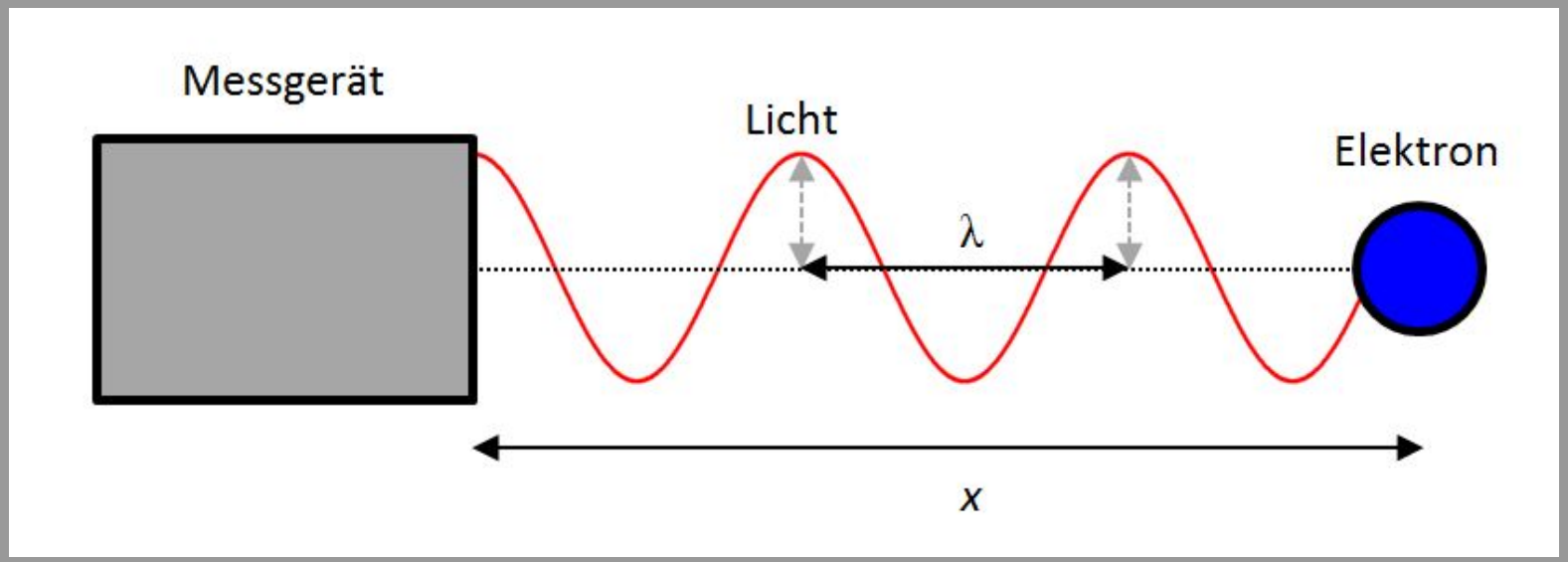
Eine kontroverse Formel

- Mario Bunge (geb. 1919), argentinischer Philosoph und Physiker:

  „Die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation ist vermutlich die kontroverseste Formel der gesamten theoretischen Physik.“

Veranschaulichung der Unbestimmtheitsrelation I

- Messung des Orts eines Elektrons
  $\rightarrow$ Wechselwirkung zwischen Elektron und Messgerät für die Ortsmessung z. B. vermittelt durch elektromagnetische Strahlung
- Wellenbild: Elektromagnetische Strahlung hat Wellenlänge λ
  $\rightarrow$ Unbestimmtheit des Ortes des Elektrons $\Delta x \approx \lambda$



Veranschaulichung der Unbestimmtheitsrelation II

- Teilchenbild: Streuung eines Photons am Elektron (Compton-Effekt)
- Impuls des Photons $p = \frac{h}{\lambda}$.
- Übertragung von Impuls vom Photon auf das Elektron
  $\rightarrow$ Unbestimmtheit des Impulses des Elektrons $\Delta p \approx \frac{h}{\lambda}$
- Produkt der Unbestimmtheit des Ortes des Elektrons und der Unbestimmtheit des Impulses des Elektrons:

$$\Delta x \cdot \Delta p \approx \lambda \cdot \frac{h}{\lambda} = h$$

- Entspricht im Wesentlichen der Unbestimmtheitsrelation

Was folgt aus dieser Veranschaulichung für die Deutung der Unbestimmtheitsrelation?

Folgerungen aus der Veranschaulichung

- Grund für die Unbestimmtheit des Ortes des Elektrons ist der Wellencharakter der elektromagnetischen Strahlung
- Grund für die Unbestimmtheit des Impulses des Elektrons ist die Wechselwirkung mit einem Photon
  $\rightarrow$ (Vermeintliche) Störung des Elektrons
- Störung des Elektrons beruht auf der Messung, die Wechselwirkung zwischen Elektron und Messgerät voraussetzt
- Störung des Elektrons kann nicht beliebig verkleinert werden:

  > *„In dem Moment, in dem der Ort des Elektrons bekannt ist, kann daher sein Impuls nur bis auf Größen, die jener unstetigen Änderung entsprechen, bekannt sein; also je genauer der Ort bestimmt ist, desto ungenauer ist der Impuls bekannt und umgekehrt[.]“*

Heisenbergs ursprüngliche Deutung – Zusammenfassung

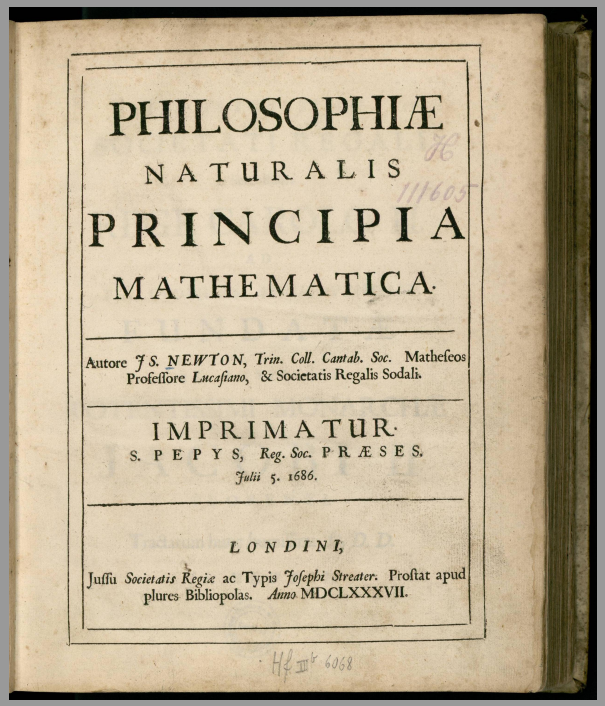
1. Unbestimmtheitsrelation ist auf ein *einzelnes* Teilchen anwendbar
2. Unbestimmtheitsrelation resultiert aus einer mit der Messung unvermeidlich verbundenen Störung, d. h. sie ist *prinzipiell*
3. Unbestimmtheitsrelation macht keine Aussagen über das *Teilchen an sich und seine Eigenschaften* unabhängig von der Messung sondern über das Wissen, das ein Beobachter von dem Teilchen erlangen kann (*subjektivistische Deutung*)

Anknüpfung der Lehrwerke an Heisenbergs ursprüngliche Deutung

1. Physik 12 (Duden Paetec): „Je bestimmter der Ort x eines Quantenobjekts ist, umso unbestimmter ist sein Impuls $p = m \cdot v$ und umgekehrt.“
2. Fokus Physik 12 (Cornelsen): „Ort und Impuls eines Quantenobjekts lassen sich gleichzeitig nur mit einer begrenzten Genauigkeit angeben.“
3. Häufig in Aufgaben Anwendung der Unbestimmtheitsrelation auf einzelne Ereignisse.
   Beispiel aus Physik 13 (G9) (Oldenbourg):
   „Für ein Staubkorn der Masse 1 μg ist die Ortsunschärfe 1 μm. Wie groß ist die Impulsunschärfe bzw. die Geschwindigkeitsunschärfe mindestens?“

Ausblick: Kausalität in der klassischen Mechanik I

- Klassische Mechanik: Wenn in einem System erstens alle Kräfte und zweitens für einen beliebigen Zeitpunkt t_0 Ort und Geschwindigkeit aller Teilchen bekannt sind, dann ist die zeitliche Entwicklung des Systems durch die Newtonschen Bewegungsgleichungen vollständig bestimmt



PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

Autore J S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,
Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

Ausblick: Kausalität in der klassischen Mechanik II

- Pierre Simon Laplace (1749–1827):

  „Eine Intelligenz, welche für einen gegebenen Augenblick alle in der Natur wirkenden Kräfte sowie die gegenseitige Lage der sie zusammensetzenden Elemente kennte, und überdies umfassend genug wäre, um diese gegebenen Größen der Analysis zu unterwerfen, würde in derselben Formel die Bewegungen der größten Weltkörper wie des leichtesten Atoms umschließen; nichts würde ihr ungewiß sein und Zukunft wie Vergangenheit würden ihr offen vor Augen liegen.“

Ausblick: Kausalität in der Quantenmechanik nach Heisenberg (1927)

- Quantenmechanik: Man kann zu einem gegebenen Zeitpunkt gar nicht die Orte und Impulse aller Teilchen eines Systems durch Messung *bestimmen*.
- Heisenberg:

  > *„Aber an der scharfen Formulierung des Kausalgesetzes: ‚Wenn wir die Gegenwart genau kennen, können wir die Zukunft berechnen', ist nicht der Nachsatz, sondern die Voraussetzung falsch. Wir können die Gegenwart in allen Bestimmungen prinzipiell nicht kennenlernen. [...] Weil alle Experimente den Gesetzen der Quantenmechanik [. . .] unterworfen sind, so wird durch die Quantenmechanik die Ungültigkeit des Kausalgesetzes definitiv festgestellt."*

Ausblick: Messproblem

- Klassische Mechanik: Festlegung der zeitlichen Entwicklung eines Systems bei Kenntnis der Kräfte und Anfangsbedingungen durch $\boldsymbol{F} = \dot{\boldsymbol{p}}$
- Quantenmechanik:
  - Keine Messung am Quantensystem: Schrödinger-Gleichung

$$\mathrm{i}\frac{h}{2\pi}\frac{\partial}{\partial t}\left|\psi\right\rangle = \hat{H}\left|\psi\right\rangle$$

  - Messung am Quantensystem: „Kollaps der Wellenfunktion“

$$\left|\psi\right\rangle = \sum_n c_n \left|\psi_n\right\rangle \rightarrow \left|\psi_k\right\rangle \text{ mit Wahrscheinlichkeit } \left|c_k\right|^2 = c_k \cdot c_k^*$$

$\rightarrow$ Zwei verschiedene Formeln für die zeitliche Entwicklung eines Quantensystems.

$\rightarrow$ Möglicherweise Inkonsistenz der Quantenmechanik

Eine formale Herleitung der Quantenmechanik I

- Herleitung der Unbestimmtheitsrelation aus dem mathematischen Formalismus der Quantenmechanik:
  - 1929: Howard Percy Robertson (1903–1961)
  - 1930: Erwin Schrödinger (1887–1961)

Eine formale Herleitung der Quantenmechanik II

- Schwarzsche Ungleichung für beliebige Vektoren x und y eines reellen oder komplexen Vektorraumes:

$$|\langle x, y\rangle|^2 \leq \langle x, x\rangle \cdot \langle y, y\rangle$$

- Anwendung auf beliebige Operatoren $\hat{A}$ und $\hat{B}$ ergibt verallgemeinerte Formulierung der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation:

$$\Delta\hat{A} \cdot \Delta\hat{B} \geq \frac{1}{2}\left|\langle\left[\hat{A}, \hat{B}\right]\rangle\right|$$

- $\Delta\hat{A} = \sqrt{\langle\psi, \left(\hat{A} - \langle\hat{A}\rangle\right)^2 \psi\rangle}$: mittlere Abweichung, Unschärfe

Eine formale Herleitung der Quantenmechanik III

- Für den Ortsoperator $\hat{x}$ und den Impulsoperator $\hat{p}$ gilt:

$$\Delta\hat{x} \cdot \Delta\hat{p} \geq \frac{1}{2} \left| \langle [\hat{x}, \hat{p}] \rangle \right|$$

- $\Delta\hat{x}$ und $\Delta\hat{p}$: Standardabweichungen
- $[\hat{x}, \hat{p}] = \hat{x}\hat{p} - \hat{p}\hat{x}$: Kommutator
- Bedeutung von $[\hat{x}, \hat{p}] \neq 0$: Nichtkommutativität
- Es gilt: $[\hat{x}, \hat{p}] = \mathrm{i}\hbar$
- Daraus folgt:

$$\Delta\hat{x} \cdot \Delta\hat{p} \geq \frac{\hbar}{2} = \frac{h}{4\pi}$$

Unbestimmtheitsrelation auf Grundlage der Statistischen Interpretation

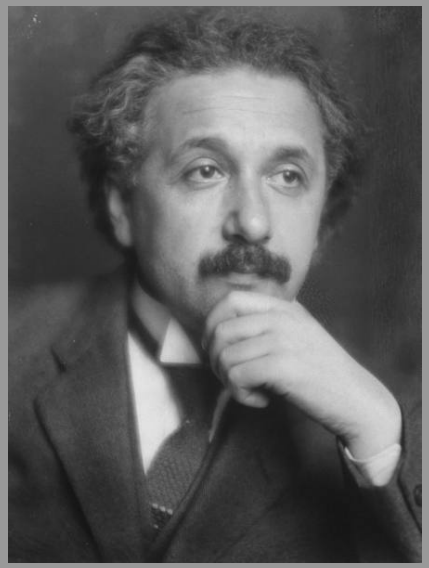
- Sinnvolle Bestimmung von Erwartungswert und Standardabweichung setzt mehrere Messungen voraus
- In Übereinstimmung mit statistischer Interpretation von Max Born (1882–1970) aus dem Jahre 1926
- Unbestimmtheitsrelation nicht gültig für *ein einzelnes Teilchen* sondern für ein *Ensemble von Teilchen*
  $\rightarrow$ Begriff „Objekt“ wird fraglich
  $\rightarrow$ Keine Aussage über Objekte, sondern über Zustände
- Unbestimmtheitsrelation beruht nicht auf einer Störung des Teilchens durch die Messung, da ja an jedem Teilchen des Ensembles *entweder* der Ort *oder* der Impuls gemessen wurde

Epistemologische und ontologische Deutung der Unbestimmtheitsrelation

- *Epistemologische* Deutung:
  Unbestimmtheitsrelation drückt *Beschränkung des Wissens* über Ort und Impuls *eines* Teilchens bzw. *eines Ensembles* von Teilchen aus
- *Ontologische* Deutung:
  Unbestimmtheitsrelation drückt *Beschränkung hinsichtlich der Eigenschaften* eines Teilchens aus, d. h. ein Teilchen *besitzt* nicht zugleich einen Ort und einen Impuls

Einstein und der *deus ludens*

- Einführung des Begriffs der Wahrscheinlichkeit in die Quantenmechanik im Jahre 1916 durch Albert Einstein (1879–1955)



- Aber Ablehnung des Probabilismus der Quantenmechanik als letztgültige Beschreibung der Natur durch Einstein z. B. in Brief an Born von 1926:

  „Die Quantenmechanik ist sehr achtung-gebietend. Aber eine innere Stimme sagt mir, daß das doch nicht der wahre Jakob ist. Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten [d. h. Gottes] bringt sie uns kaum näher. Jedenfalls bin ich überzeugt, daß der nicht würfelt.“

Frage nach der Unvollständigkeit der Quantenmechanik I

- 1935: „Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?“ von Einstein, Boris Podolsky (1896–1966) und Nathan Rosen (1909–1995)
- Hinreichende Bedingung für Element der *physikalischen Wirklichkeit*: Möglichkeit der exakten Vorhersage einer physikalischen Größe, das diesem Element der physikalischen Wirklichkeit entspricht
- Notwendige Bedingung für *Vollständigkeit*: Jedes Element der physikalischen Wirklichkeit hat Entsprechung in der physikalischen Theorie
- Folgerung: Da z. B. Ort und Impuls eines Teilchens *in der Quantenmechanik* nicht gleichzeitig physikalische Wirklichkeit haben, ist die *Quantenmechanik* eine *unvollständige* Theorie

Frage nach der Unvollständigkeit der Quantenmechanik II

- Möglichkeit der Quantenmechanik als statistischer Theorie einer fundamentaleren deterministischen Theorie
- Kann es eine vollständige Theorie im Sinne Einsteins geben?
- Heutige Antwort: Zumindest nicht als Theorie mit lokalen verborgenen Parametern
- Ergo: Die Quantenmechanik ist vielleicht doch der wahre Jakob ...

Ausblick: Verschränkung

- Teilchen mit Spin $S = 0$ zerfällt in zwei Elektronen, die auseinanderfliegen und nicht miteinander wechselwirken
- Gesamtspin bleibt erhalten: $S_1 + S_2 = S = 0$
- Verschränkung von Elektron 1 und Elektron 2:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (|\uparrow\rangle_1 \otimes |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 \otimes |\uparrow\rangle_2)$$

- *Nichtseparabilität*: Elektron 1 und Elektron 2 lassen sich nicht *getrennt* voneinander beschreiben
- *Nichtlokalität*: Abhängigkeit des Ergebnisses einer Messung an Elektron 2 vom Ergebnis der Messung an Elektron 1 bleibt auch erhalten, wenn Elektron 1 und Elektron 2 nicht einmal mehr mit Lichtgeschwindigkeit „kommunizieren“ können

Zusammenfassung I

- 1. Deutung (Heisenberg, 1927): Unbestimmtheitsrelation gilt für einzelnes Teilchen und resultiert aus der Störung in Folge der Messung
- 2. Deutung: Unbestimmtheitsrelation gilt für Ensemble von Teilchen und kann *nicht* durch eine Störung in Folge der Messung verursacht sein
- 3. Deutung: Unbestimmtheitsrelation bezieht sich nicht auf unsere Kenntnis von der Natur sondern auf die Natur an sich, d. h. sie macht keine epistemologische sondern eine ontologische Aussage

Zusammenfassung II

- Heisenberg im Gespräch mit Niels Bohr (1885–1962):

  „Ich fragte Bohr daher: ‚Wenn die innere Struktur der Atome einer anschaulichen Beschreibung wenig zugänglich ist [...], wenn wir eigentlich keine Sprache besitzen, mit der wir über diese Struktur reden können, werden wir dann die Atome überhaupt jemals verstehen?‘ Bohr zögerte einen Moment und sagte dann: ‚Doch. Aber wir werden dabei gleichzeitig erst lernen, was das Wort verstehen bedeutet.‘“

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!