

Über das Ziel hinausgeschossen? Bemerkungen zu Einsteins Beiträgen zur Quantentheorie

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

Dr. Tobias Jung

Lehrstuhl für Philosophie und Wissenschaftstheorie
Technische Universität München (TUM)

19. Juli 2015

Lehrplanbezüge von Einsteins Beiträgen zur Quantentheorie I

- Exemplarische Lehrplanbezüge anhand des „Lehrplans für das Gymnasium in Bayern“
- Photoeffekt und Lichtquantenhypothese (10. und 12. Jahrgangsstufe)
- Photonenmodell des Lichts (9. Jahrgangsstufe)
- Welle-Teilchen-Dualismus (10. und 12. Jahrgangsstufe)
- Übergänge zwischen den diskreten Energieniveaus der Elektronen in der Atomhülle (9. und 12. Jahrgangsstufe)
- Laser als Beispiel für die „Quantenphysik als Grundlage moderner Technologien“ (10. Jahrgangsstufe, fakultativ)

Lehrplanbezüge von Einsteins Beiträgen zur Quantentheorie II

- Implikationen der Quantentheorie für das physikalische Weltbild (10. und 12. Jahrgangsstufe)
 - Probabilistischer Charakter der Quantentheorie
 - Ersetzen des strengen Determinismus im mikroskopischen Bereich durch Wahrscheinlichkeitsbetrachtung
- Hinsichtlich des Probabilismus der Quantentheorie sind natürlich die Arbeiten von Max Born (1882–1970) und Werner Heisenberg (1901–1976) zu berücksichtigen
- Heisenberg zu Einsteins diesbezüglichem Beitrag:

„Der liebe Gott würfelt nicht‘, das war eine Wendung, die man in diesen Diskussionen oft von ihm [d. h. Einstein] hören konnte.“

Einsteins Beiträge zur Quantenphysik – ein erster Überblick I

- Einstein an Michele Besso (1873–1955) am 12. Dezember 1951:
„Die ganzen 50 Jahre bewusster Grübeleien haben mich der Antwort der Frage ‚Was sind Lichtquanten‘ nicht näher gebracht. Heute glaubt zwar jeder Lump, er wisse es, aber er täuscht sich.“

Einsteins Beiträge zur Quantenphysik – ein erster Überblick II

- Zwei Phasen von Einsteins Beiträgen zur Quantentheorie:
 - ① 1905–1924: Neue Anregungen und konstruktive Beiträge zur sich formenden Quantentheorie
 - Lichtquantenhypothese und ihre physikalische Anwendung und Deutung zum Beispiel beim Photoeffekt (1905)
 - Formulierung des Welle-Teilchen-Dualismus (1909)
 - Beschreibung der Vorgänge in der Atomhülle (1916)
 - Einführung einer „Wahrscheinlichkeitssprache“ (1916)
 - ② 1926–1955: Infragestellen und kritische Hinterfragung der inzwischen mathematisch formulierten Quantentheorie
 - Kritik am probabilistischen Charakter und Hoffnung auf eine zugrunde liegende deterministische Theorie (Bohr-Einstein-Debatte, 1927)
 - Kritik am fehlenden Realismus (Bohr-Einstein-Debatte, 1927)
 - Nichtlokalität (EPR-Arbeit, 1935)

Einsteins Beiträge zur Quantenphysik – ein erster Überblick III

- These 1: Es gibt einen inneren Zusammenhang von Einsteins Arbeiten zur Quantenphysik in der ersten Phase, der auf seine Überzeugung von einer Einheit der Natur zurückgeführt werden kann
- These 2: Einsteins Beiträge zur Quantenphysik veranschaulichen aus wissenschaftshistorischer Sicht den Satz „Die Revolution frisst ihre Väter“ bei
 - ① Planck – Einstein
 - ② Einstein – Bohr, Heisenberg

Das Ausgangsproblem: Die Beschreibung der Strahlung eines schwarzen Körpers I

- Physikalisches Spezialproblem: Spektrale Energiedichte u_λ der Strahlung eines schwarzen Körpers in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ
- Näherungsweise experimentelle Realisierung durch Hohlraumstrahler:
 - Strahlung unabhängig vom Material
 - Strahlung nur abhängig von der Temperatur T des Hohlraumstrahlers
- Durch Messungen war spektrale Energiedichte u_λ in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ bekannt

Das Ausgangsproblem: Die Beschreibung der Strahlung eines schwarzen Körpers II

- Ableitung der **Rayleigh-Jeans-Formel** für große Wellenlängen:

$$u_\lambda = \frac{8\pi k_B T}{\lambda^4} \quad \text{für} \quad \frac{hc}{k_B T \lambda} \ll 1.$$

k_B : Boltzmann-Konstante

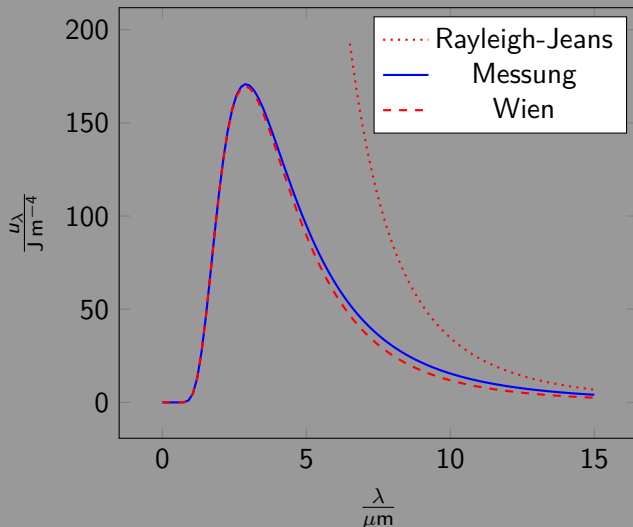
- Ultraviolett Katastrophe:

$$\lim_{\lambda_1 \rightarrow 0} \int_{\lambda_1}^{\infty} u_\lambda d\lambda = -\frac{8\pi k_B T}{3} \lim_{\lambda_1 \rightarrow 0} \left[\frac{1}{\lambda^3} \right]_{\lambda_1}^{\infty} \rightarrow \infty$$

- Phänomenologische **Wien-Formel** für kleine Wellenlängen:

$$u_\lambda = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \cdot e^{-\frac{hc}{k_B T \lambda}} \quad \text{für} \quad \frac{hc}{k_B T \lambda} \gg 1$$

Das Ausgangsproblem: Die Beschreibung der Strahlung eines schwarzen Körpers III



„Die Geburtsstunde der Quantentheorie“ I: Plancks Arbeiten von 1900

- Ausgerechnet Max Planck (1858–1947)
- 1874: Kommentar von Philipp von Jolly (1809–1884) zu Plancks Absicht, Physik zu studieren:

„[Er] schilderte mir [...] die Physik als eine hochentwickelte, nahezu voll ausgereifte Wissenschaft, die nunmehr, nachdem ihr durch die Entdeckung des Prinzips der Erhaltung der Energie gewissermaßen die Krone aufgesetzt sei, wohl bald ihre endgültige stabile Form angenommen haben würde. Wohl gäbe es vielleicht in einem oder dem anderen Winkel noch ein Stäubchen oder ein Bläschen zu prüfen und einzuordnen, aber das System als Ganzes stehe ziemlich gesichert da, und die theoretische Physik nähere sich merklich dem Grade der Vollendung, wie ihn etwa die Geometrie schon seit Jahrhunderten besitze.“

„Die Geburtsstunde der Quantentheorie“ II: Plancks Arbeiten von 1900

- Plancks Versuch einer Lösung des Problems der Strahlung eines schwarzen Körpers durch Verschieben des Problems von der Strahlung auf die strahlende Materie
- Einfaches Modell der Materie: Ansammlung linearer Oszillatoren

„Die Geburtsstunde der Quantentheorie“ III: Plancks Arbeiten von 1900

- Plancks Strahlungsgesetz – „eine[...] glücklich erratene[...] Interpolationsformel“:

$$u_{\lambda} = \frac{8\pi c}{\lambda^5} \frac{h}{e^{\frac{hc}{k_B T \lambda}} - 1}.$$

- Herleitung der Formel unter der Annahme, dass Oszillatoren nur diskrete, von der Oszillationsfrequenz $\nu = \frac{c}{\lambda}$ abhängige Energiepakete E aufnehmen und abgeben können:

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

h : Plancksches Wirkungsquantum

„Die Geburtsstunde der Quantentheorie“ IV: Plancks Arbeiten von 1900

- Bericht Heisenbergs über einen Spaziergang von Planck mit seinem Sohn im Berliner Grunewald im Herbst 1900:

„Auf diesem Weg hätte er [d. h. Max Planck] ihm [d. h. seinem Sohn] auseinandergesetzt, daß er das Gefühl habe, entweder eine Entdeckung allerersten Ranges gemacht zu haben, vielleicht vergleichbar mit den Entdeckungen Newtons, oder sich völlig zu irren.“

Lichtquantenhypothese und Photoeffekt I: Einsteins Arbeit von 1905

- Einstein knüpft an das Plancksche Strahlungsgesetz an
- „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“ (1905)

Lichtquantenhypothese und Photoeffekt II: Einsteins Arbeit von 1905

- Einstein an Conrad Habicht (1876–1958) im Mai 1905:
*„Es herrscht ein weihevolleres Stillschweigen zwischen uns, so daß es mir fast wie eine sündige Entweihung vorkommt, wenn ich es jetzt durch ein wenig bedeutsames Gepappel unterbreche. Aber geht es dem Erhabenen in der Welt nicht stets so?
Was machen Sie denn, Sie eingefrorener Walfisch, Sie geräuchertes, getrocknetes eingebüchstes Stück Seele, oder was ich sonst noch, gefüllt mit 70 % Zorn und 30 % Mitleid, Ihnen an den Kopf werfen möchte!“*

Lichtquantenhypothese und Photoeffekt III: Einsteins Arbeit von 1905

- Nicht die Arbeiten zur Bestimmung der Größe der Atome, zur Brownschen Molekularbewegung, zur Speziellen Relativitätstheorie, sondern nur die erste quantentheoretische Arbeit bezeichnete Einstein als „sehr revolutionär“
- Ausgangspunkt ist „ein tiefgreifender formaler Unterschied“: Energie von Materie ist diskontinuierlich über endlich viele Teilchen verteilt, Strahlungsenergie erstreckt sich kontinuierlich über gesamten Raum

Lichtquantenhypothese und Photoeffekt IV: Einsteins Arbeit von 1905

- Einstein:

„Es scheint mir nun in der Tat, daß die Beobachtungen über die ‚schwarze Strahlung‘, Photolumineszenz, die Erzeugung von Kathodenstrahlen durch ultraviolettes Licht und andere die Erzeugung bez. Verwandlung des Lichtes betreffende Erscheinungsgruppen besser verständlich erscheinen unter der Annahme, daß die Energie des Lichtes diskontinuierlich im Raume verteilt sei. Nach der hier ins Auge zu fassenden Annahme ist bei Ausbreitung eines von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahles die Energie nicht kontinuierlich auf größer und größer werdende Räume verteilt, sondern es besteht dieselbe aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Lichtquanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen und nur als Ganze absorbiert und erzeugt werden können.“

Lichtquantenhypothese und Photoeffekt V: Einsteins Arbeit von 1905

- **Lichtquantenhypothese:**

Elektromagnetische Strahlung besteht aus diskreten Energiequanten, die unteilbar sind und nur ganz oder gar nicht aufgenommen oder erzeugt werden können

- Vorsichtige Formulierung von Einstein:

„die Gesetze der Erzeugung und Verwandlung des Lichtes [sind] so beschaffen [...], wie wenn das Licht aus derartigen Energiequanten bestünde“

- Zusammenhang zwischen Energie E_γ eines Energiequants und Frequenz ν beziehungsweise Wellenlänge λ :

$$E_\gamma = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Lichtquantenhypothese und Photoeffekt VI: Einsteins Arbeit von 1905

- Verwendete Beziehung bei Planck (1900) und Einstein (1905) ist *formal* identisch:

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

- Aber:

Planck (1900)	Einstein (1905)
Modellierung der strahlenden Materie	Beschreibung der Strahlung selbst
Strahlung eines schwarzen Körpers unabhängig von Materie → „Rechentrick“	Physikalische Bedeutung der Beziehung

Lichtquantenhypothese und Photoeffekt VII: Einsteins Arbeit von 1905

- Vorschlag zur Aufnahme Einsteins in die *Preußische Akademie der Wissenschaften* durch Planck und andere am 12. Juni 1913:
„Zusammenfassend kann man sagen, daß es unter den großen Problemen, an denen die moderne Physik so reich ist, kaum eines gibt, zu dem nicht Einstein in bemerkenswerter Weise Stellung genommen hätte. Daß er in seinen Spekulationen auch einmal über das Ziel hinausgeschossen haben mag, wie z. B. in seiner Hypothese der Lichtquanten, wird man ihm nicht allzuschwer anrechnen dürfen; denn ohne einmal ein Risiko zu wagen, läßt sich auch in der exaktesten Naturwissenschaft keine wirkliche Neuerung einführen.“
- Folglich:
„Die Revolution frisst ihre Väter.“

Einsteins Einführung einer Wahrscheinlichkeitssprache I

- Zwei Entwicklungsstränge führen zur Quantentheorie:
 - ① Frage nach der Natur der Strahlung
 - ② Frage nach der Natur der strahlenden Materie:
 - Diskretes Linienspektrum
 - Bohrsches Atommodell
- Bezugnahme auf Bohrsches Atommodell durch Einstein in zwei Arbeiten von 1916: Genauere Betrachtung der Übergänge von Elektronen zwischen möglichen Energieniveaus
- Annahme von drei Arten von Übergängen:
 - ① Spontane Emission eines Energiequants beim Übergang eines Elektrons von einem höheren auf ein niedrigeres Energieniveau
 - ② Die Absorption eines Energiequants beim Übergang eines Elektrons von einem niedrigeren auf ein höheres Energieniveau
 - ③ Induzierte Emission, d. h. Freisetzung eines entsprechenden Energiequants durch Einstrahlung

Einsteins Einführung einer Wahrscheinlichkeitssprache II

- Ziel Einsteins im Prinzip wie in der Arbeit von 1905: Ableitung des Planckschen Strahlungsgesetzes auf theoretischer Grundlage, diesmal durch Rückführung auf Prozesse in der Atomhülle
- Blickwendung von der Strahlung auf die Wechselwirkung von Strahlung und Materie
- Einführung des Begriffs „Zufall“:

„Erleidet das Molekül ohne äußere Anregung einen Energieverlust von der Größe $h\nu$, indem es diese Energie in Form von Strahlung abgibt (Ausstrahlung), so ist auch dieser Prozeß ein gerichteter. Ausstrahlung in Kugelwellen gibt es nicht. Das Molekül erleidet in einer beim jetzigen Stande der Theorie nur durch den ‚Zufall‘ bestimmten Richtung bei dem Elementarprozeß der Ausstrahlung einen Rückstoß von der Größe $\frac{h\nu}{c}$.“

Einsteins Einführung einer Wahrscheinlichkeitssprache III

- Impuls der Strahlung:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h \cdot \nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

- Einführung des Begriffs „Zufall“ und statistische Überlegungen zu den Übergängen zwischen den Energieniveaus der Elektronen stellen wesentlichen Beitrag zur einer „Wahrscheinlichkeitssprache“ in quantentheoretischen Überlegungen dar
- Zurückhaltung Einsteins:

„Die Schwäche der Theorie liegt einerseits darin, daß sie uns dem Anschluß an die Undulationstheorie [d. h. die Wellentheorie des Lichts] nicht näher bringt, andererseits darin, daß sie Zeit und Richtung der Elementarprozesse dem ‚Zufall‘ überläßt; trotzdem hege ich das volle Vertrauen in die Zuverlässigkeit des eingeschlagenen Weges.“

De Broglies Materiewellen und der Welle-Teilchen-Dualismus I

- Welle-Teilchen-Dualismus in Bezug auf elektromagnetische Strahlung (Einstein, 1909):

„Deshalb ist es meine Meinung, daß die nächste Phase der Entwicklung der theoretischen Physik uns eine Theorie des Lichtes bringen wird, welche sich als eine Art Verschmelzung von Undulations- und Emissionstheorie des Lichtes auffassen läßt.“

- Hypothese des Welle-Teilchen-Dualismus in Bezug auf Materie durch Louis de Broglie (1892–1987) mit seiner Dissertation „Untersuchungen zur Quantentheorie“ (1923/1924)

De Broglies Materiewellen und der Welle-Teilchen-Dualismus II

- Positives Gutachtens Einsteins zu de Broglies Arbeit
- Einstein an Hendrik Antoon Lorentz (1853–1928) am 16. Dezember 1924:

„Ich glaube, das [nämlich de Broglies Dissertation] ist ein erster schwacher Strahl zur Erhellung dieses schlimmsten unserer physikalischen Rätsel.“

- **Materiewellenlänge** oder **de Broglie-Wellenlänge**:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

p : Impuls des materiellen Teilchens

- Formal identisch zum Impuls der Strahlung

De Broglies Materiewellen und der Welle-Teilchen-Dualismus III

- Versuch Einsteins, das Spannungsverhältnis zwischen der Maxwellschen Theorie für elektromagnetische Strahlung und den Theorien zur Beschreibung des Zustands und der Bewegung der Materie, zwischen Feldern und Teilchen, zwischen Kontinuum und Struktur aufzulösen
- Die Überzeugung von der Einheit der Natur als wesentliche Triebfeder für Einsteins gesamtes Denken
- Einstein an Marcel Grossmann (1878–1936) am 14. April 1901:

„Es ist ein herrliches Gefühl, die Einheitlichkeit eines Komplexes von Erscheinungen zu erkennen, die der direkten sinnlichen Wahrnehmung als ganz getrennte Dinge erscheinen.“

„Die Revolution frisst ihre Väter“ (Teil II) I

- 1926: Mathematische Formulierung der Quantentheorie durch Matrizenmechanik von Heisenberg und Wellenmechanik von Schrödinger
- Einsteins Kritik an der Quantentheorie:
 - Kritik am probabilistischen Charakter der Quantentheorie
 - Kritik an der „Unvollständigkeit“ der Quantentheorie
- Einstein an Born am 4. Dezember 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.“

„Die Revolution frisst ihre Väter“ (Teil II) II

- Einstein an Cornelius Lanczos (1893–1974):

„Es scheint hart, dem Herrgott in die Karten zu gucken. Aber dass er würfelt und sich telepathischer Mittel bedient (wie es ihm von der gegenwärtigen Quantentheorie zugemutet wird), kann ich keinen Augenblick glauben.“

„Die Revolution frisst ihre Väter“ (Teil II) III

- Fünfte Solvay-Konferenz (1927): Bohr-Einstein-Debatte
- Einstein präsentierte Gedankenexperimente insbesondere zur Widerlegung der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation
- Bohr legte jeweils Lösung am nächsten Morgen vor

„Die Revolution frisst ihre Väter“ (Teil II) IV

- Wirkung von Einsteins Gedankenexperimenten auf Bohr nach der Schilderung von Paul Ehrenfest (1880–1933):

„Für Bohr bedeutete dies einen schweren Schlag. Im Augenblick sah er keine Lösung. Den ganzen Abend war er äußerst unglücklich, ging von einem zum anderen und versuchte alle zu überreden, daß es nicht wahr sein könne, denn es würde das Ende der Physik bedeuten, hätte Einstein recht. Doch er konnte keine Widerlegung finden. Ich werde niemals den Augenblick vergessen, den die Gegner beim Verlassen des Universitätsclubs boten. Einstein, eine majestätische Gestalt, ging ruhig mit einem leicht ironischen Lächeln, und Bohr trottete neben ihm höchst aufgeregt.“

„Die Revolution frisst ihre Väter“ (Teil II) V

- Einstein konnte die Folgerungen Bohrs und Heisenbergs aus der Quantenphysik, die er selbst doch auch wesentlich auf den Weg gebracht hatte, genauso wenig mittragen, wie es zuvor Planck hinsichtlich den Schlüssen Einsteins aus seiner Quantisierungshypothese konnte
- Die Revolution frisst ihre Väter, wenn diese nicht zuvor ihre Kinder fressen ...

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

„Die Überlegung ist lustig und bestechend; aber ob der Herrgott nicht darüber lacht und mich an der Nase herumgeführt hat, das kann ich nicht wissen.“