

# Seminar — Grundlagen der Quantenmechanik

Armin Scrinzi

October 16, 2019

## Contents

<b>1 Information zu den Themen</b>	<b>2</b>
1.1 Photoeffekt und Strahlung eines schwarzen Körpers (1)+(1)	2
1.2 Neutroneninterferometrie (2)	2
1.3 Moderne Doppelspaltexperimente (2)	2
1.4 Das EPR Paradoxon und die Bell'sche Ungleichung (2)	3
1.5 Verschränkte Photonen — parametric down conversion (2)	3
1.6 Experiment zur Verletzung der Bell'schen Ungleichung von A. Aspect (2)	3
1.7 (*) Symmetrien und das Wigner-Theorem (1)	3
1.8 (*) Entropie und Linearität der Quantenmechanik (1)	3
1.9 (*) Warum ist die Zeitentwicklung unitär? (1)	3
1.10 Quantenkryptographie (1)	3
1.11 Aharonov-Bohm und Quanten-Zeno Effekt (1)+(1)	3
1.12 Quantencomputer: Prinzip und Algorithmen (1)	4
1.13 Quantencomputer: Aktuelle Realisierung	4
1.14 Messung: Konzepte und aktuelle Beiträge (1)	4
1.15 Quantendynamik mit Wignerfunktionen (1)	4
1.16 Bohm'sche Mechanik(1)	4
1.17 Interpretationen der Quantenmechanik (2)	4

## Ablauf

### Voraussetzungen

Ein Teil der Themen eignet sich gut für Studierende im Bachelorstudium mit erfolgreicher T2. Die mit (\*) gekennzeichneten Themen sind anspruchsvoller und daher eher am Masterniveau zu empfehlen.

### Themenvergabe und Vorbereitung

Ab Montag, 22. 10., 18:00 ist die Anmeldung per E-mail an armin.scrinzi@lmu.de offen. Themen werden nach dem Eintreffzeitpunkt der Anmeldung vergeben. E-mails mit Versendezeit vor 18:00 werden nicht berücksichtigt.

In der E-mail, bitte, folgende Informationen:

- Bachelor oder Master, mit Semesterangabe
- Weitere eventuell relevante Informationen (Nebenfach, spezifische Vorkenntnisse, T4 absolviert?)
- mindestens 4 nach Priorität gereihten Wunscht Themen (bevorzugtes zuerst), z.B.
  - [11] Quanten-Kryptographie
  - [12] Quanten-Zeno
  - [2] Neutroneninterferometrie
  - [9] Warum ist die Zeitentwicklung unitär?

Ein erster Entwurf für Ihre Präsentation soll **mindestens 2 Wochen** vor dem Termin vorliegen. Ausgenommen sind offensichtlich die ersten beiden Vorträge. Der Entwurf soll eine Inhaltsangabe und Eckpunkte der Argumentation einschließen. Sie erhalten dann von mir Feedback. Ohne den Entwurf können Sie Ihr Seminarthema an eventuelle andere Interessenten verlieren.

## Literatur

Zu jedem Thema gibt es einige Literaturhinweise (siehe unten) als Grundlage für die Seminararbeit. Im Allgemeinen soll das Thema anhand der Literatur erarbeitet werden. Das schliesst unter Umständen ein, weitere Literatur zu suchen. Für die Literatursuche empfehle ich im Allgemeinen das Netz zu nutzen, im Speziellen Thomson Reuters' "Web of knowledge" <http://apps.webofknowledge.com>, das von innerhalb des LMU Netzes zugänglich ist.

## Anrechnung

Es werden Anwesenheitslisten geführt. Voraussetzung für die Ausstellung eines Zeugnisses ist die Teilnahme an allen Terminen mit **maximal 2 Fehlstunden** und eine Präsentation.

## Form und Beurteilungskriterien

Im Seminarvortrag soll zunächst die physikalische Grundidee so einfach wie möglich dargestellt werden. Dann soll auf experimentelle oder theoretische Details eingegangen werden. Wenden Sie sich an Ihre Mitstudenten im Seminar und versuchen sie *ihnen* (und natürlich sich selbst, und zuletzt gerne auch mir) die Inhalte klar zu machen.

Je nach Gegenstand und persönlichen Vorlieben, sind Tafervorträge, Powerpoint Präsentationen gleichermaßen möglich. Auch Mischformen sind erlaubt, doch Vorsicht: diese erfordern normalerweise besonders sorgfältige Planung!

Die kommunikative und formelle Qualität des Vortrags fliessen zu einem geringen Teil auch in die Beurteilung ein (z.B. ein inhaltlich genialer, aber unverständlicher Vortrag gibt nur 1.3).

## 1 Information zu den Themen

Hier eine Auflistung der Themen mit Literatur. Die Themen sind in ihrer ungefähren zeitlichen Abfolge angegeben. Die Mehrzahl davon kann von 2 Vortragenden gemeinsam bearbeitet werden, (1) oder (2) gibt die Anzahl der Vortragenden an.

### 1.1 Photoeffekt und Strahlung eines schwarzen Körpers (1)+(1)

Die beiden Themen sind weitgehend unabhängig, verbunden nur dadurch, dass beide zu den Grundlagen der Quantenmechanik gehören und von Materie-Licht Wechselwirkung handeln. Zum schwarzen Körper sind vor allem die Fragen des thermodynamischen Gleichgewichts interessant, die aus heutiger Sicht die Quantisierung des Lichts erfordern. Beim Photoeffekt soll zunächst die kühne Hypothese Einsteins erklärt werden. Interessant ist, dass aus heutiger Sicht Quantisierung des Lichts nicht *notwendig* zur Erklärung des Effekts ist, die Quantisierung der Materie jedoch schon. Beim Photoeffekt soll klar gemacht werden, welche experimentellen Fakten wirklich vorliegen, und was bis heute nur "Gedankenexperiment" ist.

Literatur: [1, 2, 3, 4, 5]

### 1.2 Neutroneninterferometrie (2)

Neutronen-Interferometrie ist ein Wegbereiter der modernen Atom-Optik. Hier werden erstmals Interferenzexperimente mit massiven, neutralen Teilchen gemacht. Fragen der Kohärenz der Neutronenstrahlen treten stark in den Vordergrund. Einige grundlegende Experimente wurden erstmals von den Gedanken ins Labor gebracht.

Literatur: [6, Kap. 7],[7]

### 1.3 Moderne Doppelspaltexperimente (2)

Der Doppelspaltversuche wurde mit van-der-Waals Clustern und mit  $C_{60}$  "bucky ball" Molekülen durchgeführt. Was sind die relevanten Abmessungen und Wellenlängen? Wie wurde der Strahl realisiert? Was sind die Schwierigkeiten der Statistik? Wie gut etabliert ist das Ergebnis? Was begrenzt die Grösse der Teilchen?

Literatur: [8, 9]

## 1.4 Das EPR Paradoxon und die Bell'sche Ungleichung (2)

In dem berühmten Paper von 1936 wiesen Einstein, Podolski und Rosen auf die erstaunlichen Konsequenzen der Quantenmechanik hin (und implizierten, dass die Theorie daher in irgendeinem Sinn unvollständig sein müsse). In Verfolgung des Gedankens formulierte Bell seine Ungleichungen. Letztere bilden die Grundlage aller modernen Experimente zum Nachweis der Notwendigkeit einer nicht "lokal-realistischen" Theorie, wie sie die QM darstellt. Sie reportieren ueber die Theorie und arbeiten insbesondere die verwendeten Konzepte von "Realität" und Lokalität aus.

Literatur: [10],[11]

## 1.5 Verschränkte Photonen — parametric down conversion (2)

Effekte der nicht-linearen Optik erlauben die Umwandlung eines gegebenen Photons in 2 Photonen niedriger Frequenz. Dieser Mechanismus dient zur Erzeugung verschränkter Photon-Paare. Sie erklären Theorie und experimentelle Realisierung.

Kenntnisse der Optik und Atomphysik sind Voraussetzung für dieses Thema

Literatur: [2],[12, Sec.5.2],[13]

## 1.6 Experiment zur Verletzung der Bell'schen Ungleichung von A. Aspect (2)

Mittels verschränkter Photonenpaare war es erstmals möglich, die Verletzung der Bell'schen Ungleichungen experimentell mit ausreichender statistischer Signifikanz nachzuweisen. Sie referieren die die theoretischen Grundlagen und Realisierung des Experiments.

Literatur: [14, 15]

## 1.7 (\*) Symmetrien und das Wigner-Theorem (1)

Symmetrien werden in der QM zumeist durch unitäre Transformationen dargestellt, mit Ausnahme der Zeitumkehrsymmetrie. Sie führen das Konzept der Symmetrie ein und präsentieren dann das Wigner Theorem (in einer einfachen Form).

Literatur: [16]

## 1.8 (\*) Entropie und Linearität der Quantenmechanik (1)

Zu den nicht wesentlichen Aspekten der Quantenmechanik gehört die Linearität der Gleichungen für die Wellenfunktion. Es ist *a priori* nicht offensichtlich, dass dies so sein muss. Hat man aber einmal Entropie (im Sinn von J. von Neumann) in die QM eingeführt, dann erfordert der 2te Hauptsatz Linearität.

Literatur: [16]

## 1.9 (\*) Warum ist die Zeitentwicklung unitär? (1)

Die Unitarität der Zeitentwicklung führt zur Schrödingergleichung und umgekehrt. Doch warum wollen wir eine unitäre Zeitentwicklung? Es ist ein gängiges Missverständnis, dass Erhaltung der Wahrscheinlichkeit Unitarität bedingt. (Hier sind jedenfalls Grundkenntnis der Gruppentheorie erforderlich, Literatur wir noch geliefert.)

## 1.10 Quantenkryptographie (1)

Auf Grundlage des Entanglement können Verschlüsselungsreihen abhörsicher verteilt werden: "quantum key distribution". Ein eventueller Lauscher ("eavesdropping") wird sicher detektiert. Verschieden Protokolle existieren und erste kommerzielle Umsetzung wurde versucht.

Literatur: [17, 18],[19, Chap.IV]

## 1.11 Aharonov-Bohm und Quanten-Zeno Effekt (1)+(1)

Der Aharonov-Bohm Effekt ist letztlich eine Folge der Nicht-Lokalität der Wellenfunktion. Scheinbar paradox, wurde er doch experimentell realisiert. Eine recht direkte Konsequenz der quantenmechanischen Messtheorie und der Zeitreversibilität ist der Quanten-Zeno Effekt: ein ständig beobachtetes System verharrt in seinem Anfangszustand. Bemerkenswerter Weise wurde das auch experimentell realisiert.

Literatur: [16, p.88],[20, 21], [22], Lehrbücher, e.g. [23].

## 1.12 Quantencomputer: Prinzip und Algorithmen (1)

Die Funktion eines Quantencomputers erklärt sich gut anhand erstens des Shore-Algorithmus und zweitens des “universellen Quanten-Gates”. Eine wichtige Rolle spielen die hoch-verschränkten Quantenzustände und das “Auslesen”, d.h. der Messung des generierten Quantenzustands. Die Verschränkung enthält substanzielle Information und die Aufrechterhaltung (oder Re-generation) der Kohärenz ist ein zentrales Problem des Quantencomputers.

Literatur: [19, 26];[27, Kapitel 6 - 8][28].

## 1.13 Quantencomputer: Aktuelle Realisierung (1)

Es gibt eine Reihe von Versuchen, Quantencomputer im Experiment zu realisieren: Ionenfallen, SQUIDs, “optical lattices”, NMR-basierte. Vor kurzen wurde eine Nachricht ueber “Quantum Supremacy” von Google kolportiert. Sie berichten ueber die dabei angewandte Technik und stellen sie in den Kontext anderer die vielversprechendsten Verfahren. Nach Moeglichkeit beturteilen Sie die Substanz der Geruechte.

Literatur: (wird noch bekanntgegeben, eigene aktuelle Recherche noetig. <http://www.spaceref.com/news/viewsr.html>).

## 1.14 Messung: Konzepte und aktuelle Beitraege (1)

Die Quantenmechanik stellt sich als erste naturwissenschaftlichen Theorie der Frage, wie denn objektive Sachverhalte (“Realität”, “Tatsachen”) zu etablieren sind. Sie scheitert an diesem eigenen Anspruch. Sie stellen das Problem allgemein dar und berichten dann insbesondere ueber eine aktuelle Publikation, die eine Inkonsistenz der Messbegriffs der QM zu zeigen scheint, und deren Wiederhall in der Literatur.

Literatur: [16]Kap.12, [29]

## 1.15 Quantendynamik mit Wignerfunktionen (1)

Definition der Wignerfunktion und ihre Interpretation. Eigenschaften der Wignerfunktion. Formulierung der Dynamik für die Wignerfunktion. Approximationen und Grenzen der Formulierung.

Literatur: [24],[25, Chap. 10]

## 1.16 Bohm’sche Mechanik(1)

Ein Versuch, des schillernden Konzepts der Realität in der QM Herr zu werden ist die Bohm’sche Mechanik. Sie präsentieren deren Formulierung und diskutieren eventuelle (erkenntnistheoretische) Konsequenzen anhand aktueller Arbeiten.

Literatur: [30, 31]

## 1.17 Interpretationen der Quantenmechanik (2)

Der Konflikt des quantenmechanischen Systems mit der Denktradition jedenfalls der Physik, wahrscheinlich auch eines grossen Teils des Denkens im Alltag fordert Versuche heraus, physikalische Beobachtungen und Denkgewohnheit wieder in Einklang zu bringen. Verschiedene Anschauungen dazu existieren.

Literatur(vorläufig): [32]

## References

- [1] A. Zeilinger, G. Weihs, Th. Jennewein, and M. Aspelmeyer. Happy centenary, photon! *Nature*, 433:230, 2005. 2
- [2] M. O. Scully and M. S. Zubairy. *Quantum optics*. Cambridge University Press, 2008. 2, 3
- [3] A. Einstein. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. 2005. 2
- [4] E. Meyer and W. Gerlach. Über den photoelektrischen Effekt an ultramikroskopischen Metallteilen. *Annalen d. Physik*, 18:177, 1914. 2
- [5] W. E. Lamb Jr and M. Scully. Technical report, 1968. 2
- [6] A. G. Wagh and V. C. Rakhecha. Quantum Physics with Neutrons. *Prog. Part. Nucl. Phys.*, 37:485, 1996. 2

- [7] H. Rauch. Neutron interferometric tests of quantum mechanics. *Contemporary Physics*, 01(1072954):37 – 41, 1986. 2
- [8] M. Arndt et al. Wave-particle duality of  $c_{60}$  molecules. *Nature*, 401, 1999. 2
- [9] W. Schöllkopf and J. P. Toennies. Nondestructive Mass Selection of Small van der Waals Clusters. *Science*, 266(5189):1345 – 1348, 1994. 2
- [10] A Einstein, B Podolsky, and N Rosen. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *PHYSICAL REVIEW*, 47(10):0777–0780, MAY 1935. 3
- [11] JS BELL. ON PROBLEM OF HIDDEN VARIABLES IN QUANTUM MECHANICS. *REVIEWS OF MODERN PHYSICS*, 38(3):447–&, 1966. 3
- [12] B. Lounis and M. Orrit. Single-photon sources. *Rep. Prog. Phys.*, 68:1129, 2005. 3
- [13] P. G. Kwiat, K. Mattle, H. Weinfurter, A. Zeilinger, A. V. Sergienko, and Y. Shih. New High-Intensity Source of Polarization-Entangled Photon Pairs. 75:14337, 1995. 3
- [14] J. F. Clauser and A. Shimony. Bell’s theorem. experimental tests and implications. *Reports on Progress in Physics*, 41(12):1881, 1978. 3
- [15] A. Aspect, J. Dalibard, and G. Roger. Experimental test of bell’s inequalities using time- varying analyzers. *Phys. Rev. Lett.*, 49, 1982. 3
- [16] Asher Peres. *Quantum Theory: Concepts and Methods*. Kluwer, 1995. 3, 4
- [17] N. Gisin and R. Thew. Quantum communication. *Nature Photonics*, page 165, 2007. 3
- [18] N. Gisin, G. Ribordy, W. Tittel, and H. Zbinden. *Rev. Mod. Phys.*, 74:145, 2002. 3
- [19] A. Galindo and M. A. Martin-Delgado. Information and computation: classical and quantum aspects. *Rev. Mod. Phys.*, 74(2):347, 2002. 3, 4
- [20] A. Peres. 48:931, 1980. 3
- [21] N. Osakabe, T. Matsuda, T. Kawasaki, J. Endo, A. Tonomura, S. Yano, and H. Yamada. Experimental confirmation of Aharonov-Bohm effect using a toroidal magnetic field confined by a superconductor. *Phys. Rev.*, 34(2):815, 1986. 3
- [22] W. M. Itano, D. J. Heinzen, J. J. Bollinger, and D. J. Wineland. Quantum Zeno effect. *Phys. Rev.*, 41(5):2295, 1990. 3
- [23] Griffiths. *Quantenmechanik*. 1968. 3
- [24] W. P. Schleich. *Quantum Optics in Phase Space*. Wiley, 2001. 4
- [25] Hai-Wong Lee. Pii: 0370-1573(95)00007-4. *Phys. Rep.*, 259:147–211, 1995. 4
- [26] A. Ekert and R. Jozsa. Quantum computation and Shor’s factoring algorithm. 68(3):733, 1996. 4
- [27] A. Steane. Quantum computing. *Rep. Prog. Phys.*, 61:117, 1998. 4
- [28] L. M. K. Vandersypen and I. L. Chuang. NMR techniques for quantum control and computation . *Rev. Mod. Phys.*, 76:1037, 2004. 4
- [29] Daniela Frauchiger and Renato Renner. Quantum theory cannot consistently describe the use of itself. *NATURE COMMUNICATIONS*, 9, SEP 18 2018. 4
- [30] Siddhant Das, Markus Noeth, and Detlef Duerr. Exotic Bohmian arrival times of spin-1/2 particles: An analytical treatment. *PHYSICAL REVIEW A*, 99(5), MAY 28 2019. 4
- [31] Siddhant Das and Detlef Duerr. Arrival Time Distributions of Spin-1/2 Particles. *SCIENTIFIC REPORTS*, 9, FEB 19 2019. 4
- [32] M. Schlosshauer, J. Kofler, and A. Zeilinger. A snapshot of foundational attitudes toward quantum mechanics. *arxiv.org:1301.1069v1*. 4