

Wie wirklich ist die (Quanten-)Wirklichkeit?

Franz Embacher

<http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/>
franz.embacher@univie.ac.at

Fakultät für Physik
Universität Wien



Vortrag im Rahmen von
physics:science@school WS14/15
BRG 18, Schopenhauerstraße 49, Wien
29. September 2014

Inhalt

- Klassische Physik und Quantenphysik
- Doppelspalt-Experiment
- Unbestimmtheit
- Quantentheorie und Beobachtung/Messung
- Elitzur-Vaidmann-Bombentest
- Verschränkung, EPR-Paradoxon und Bellsche Ungleichung
- Quantenteleportation
- Quantenspiel
- Quantenkryptographie
- Quantencomputer
- Was wäre, wenn...

Klassische Physik und Quantenphysik

Klassische Physik und Quantenphysik

- Klassische Physik
 - Messgrößen (Observable)
 - Theoretische *und* experimentelle Befunde: Die klassische Physik kann nicht richtig sein!
 - Max Planck (1900), Albert Einstein (1905): Energie der Strahlung, Photonen („Licht-Teilchen“)
 - Niels Bohr (1913), Arnold Sommerfeld (1915), Erwin Schrödinger (1926), Werner Heisenberg (1927): Stabilität und Spektrum der Atome („formal“) erklärt!
- **Quantentheorie!**
- 1980er: Quanteninformation

Wellen, Messungen und Wahrscheinlichkeiten

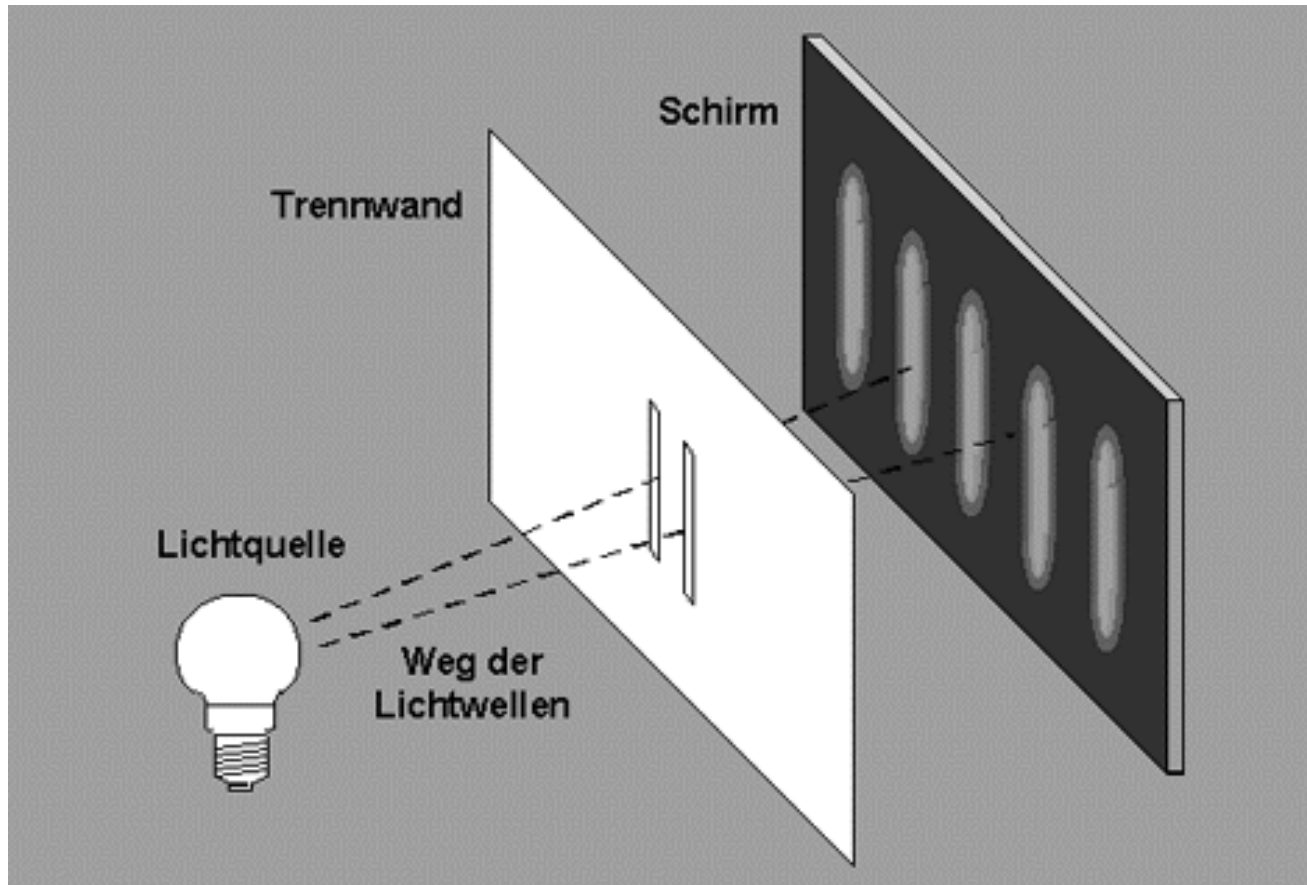
- Problem der „**Deutung**“ der neuen Theorie!
- Louis de Broglie (1924): Teilchen verhalten sich wie **Wellen** („Materiewellen“, Wellenfunktion, ψ)
- Max Born (1926): **Wellenfunktion** (ψ) \rightarrow **Wahrscheinlichkeiten** ($|\psi|^2$) für Messergebnisse (Kopenhagener Deutung)
 \rightarrow Orbitale, Atome, Moleküle, Bindungseigenschaften
- Wellen können einander überlagern (**Superpositionsprinzip**):
$$\psi = \psi_1 + \psi_2$$
- Quanteninformation: „Qubits“: Nur zwei Messwerte: 0 und 1

Doppelspalt-Experiment

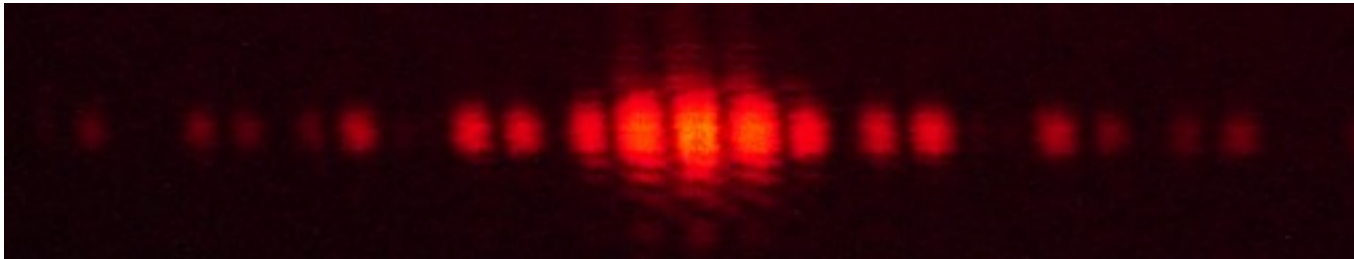
Doppelspalt-Experiment

Doppelspalt-Experiment

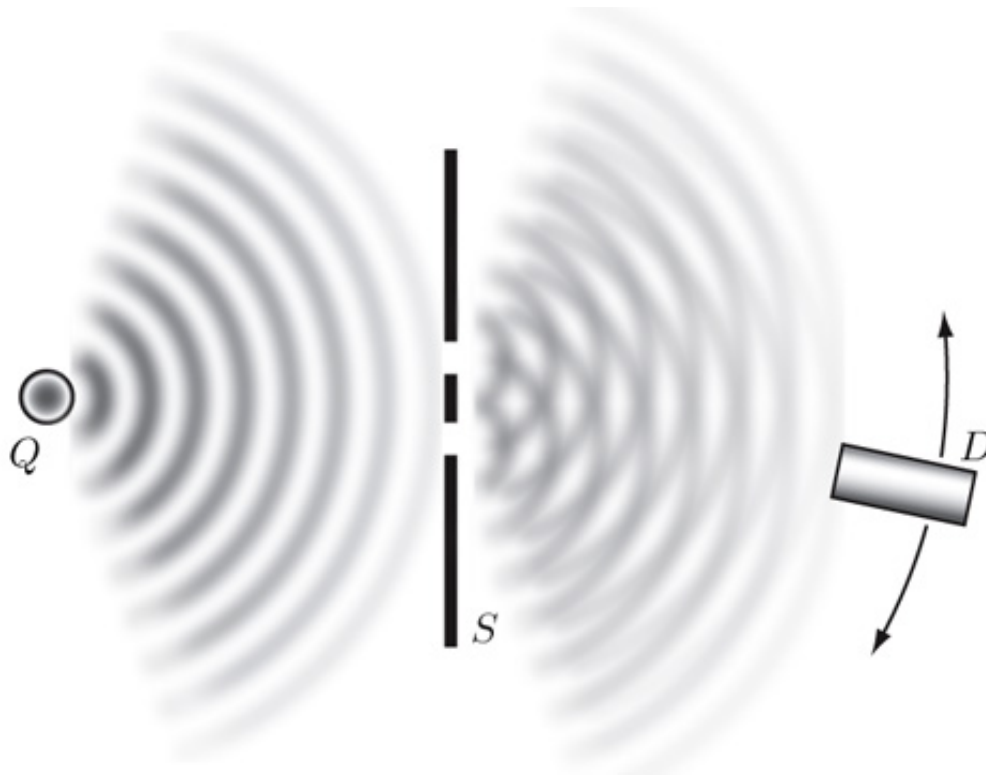
Thomas Young (1802) → Licht ist eine Welle!



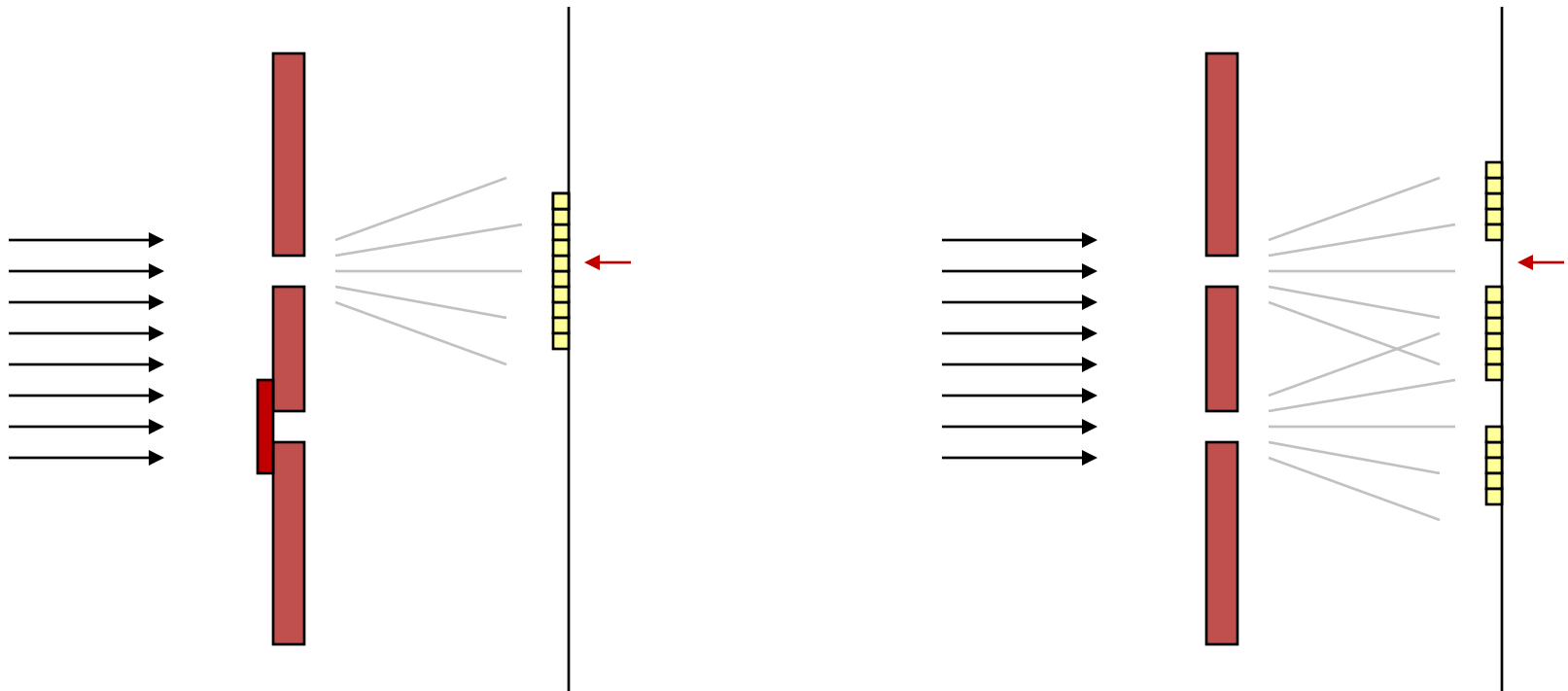
Doppelspalt-Experiment



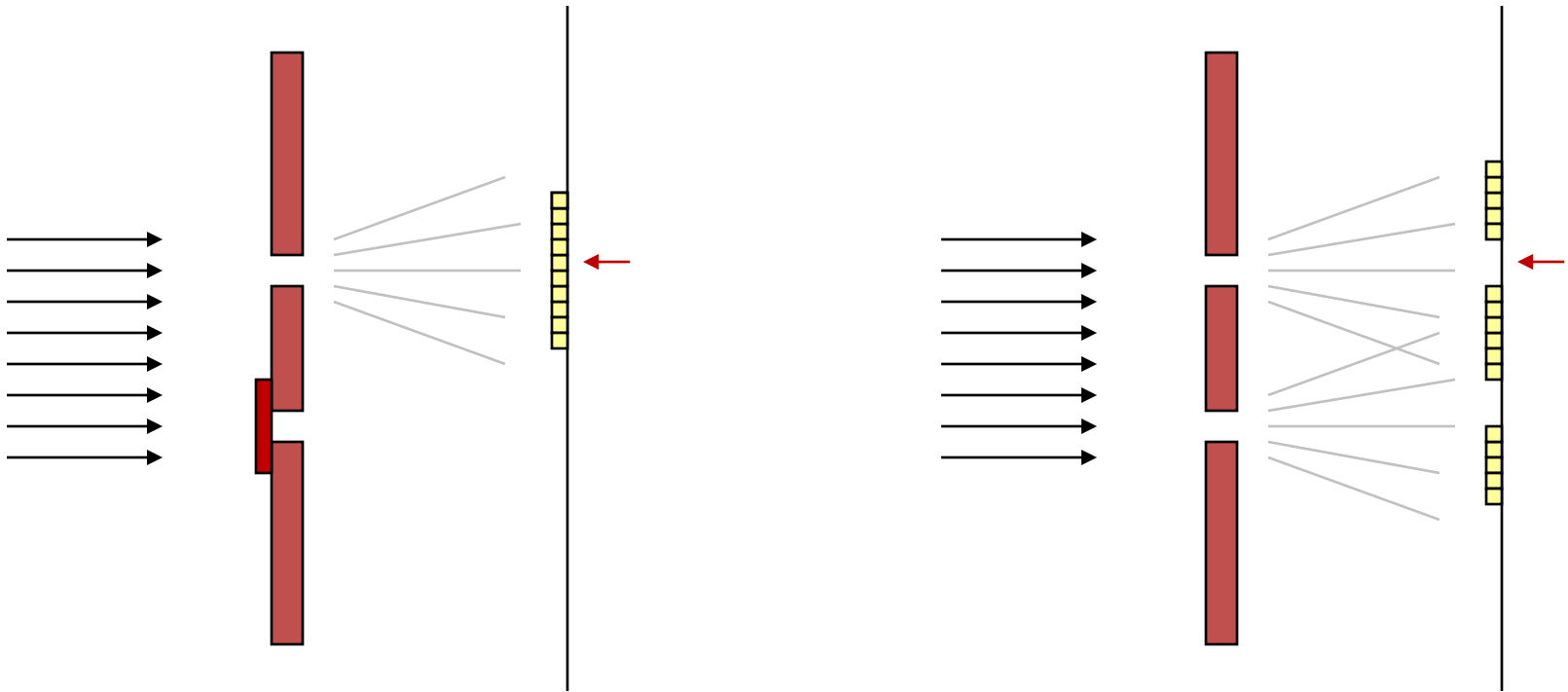
Doppelspalt-Experiment



Doppelspalt-Experiment



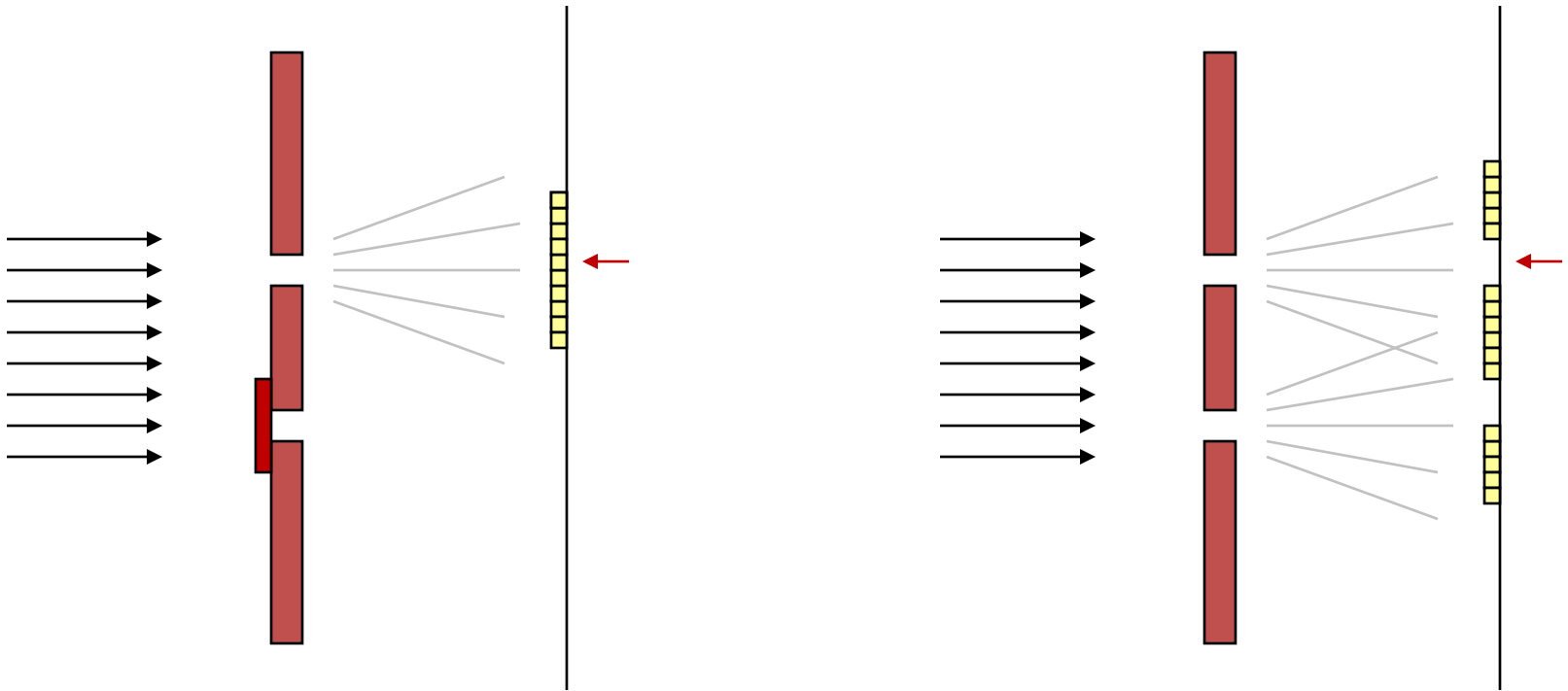
Doppelspalt-Experiment



Nun Beschuss mit *einzelnen* Teilchen (Photonen)!

Annahme: Das Teilchen geht durch *einen* Spalt → Das Verhalten eines Teilchens, das durch den *oberen* Spalt geht, hängt davon ab, ob der *untere* Spalt offen ist!
→ Widerspruch? Problem für unsere Auffassung von **Realität**?

Doppelspalt-Experiment



Wenn das Teilchen durch *einen* der beiden Spalten geht, woher „weiß“ es dann, ob der *andere* Spalt offen oder geschlossen ist?
→ Nichtlokalität!

Unbestimmtheit

Unbestimmtheit

Unbestimmtheit

- Werner Heisenberg (1927): Messgrößen sind fundamental **unbestimmt** („unscharf“)
- Es gibt Messgrößen, die nicht gleichzeitig scharfe Werte haben **können** (komplementäre Messgrößen):
 - Beliebige Körper: Ort und Impuls
 - Elektronen: Spinkomponenten in verschiedene Richtungen
 - Photonen: Polarisationen (= Verhalten an Polarisatoren mit unterschiedlichen Orientierungen)
 - Doppelspalt-Experiment: Weg des Teilchens
- **Was ist an einer Messgröße „wirklich“?**

Quantentheorie und Beobachtung/Messung

→ <http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Quantentheorie/gicks/>

Elitzur-Vaidmann-Bombentest

Elitzur-Vaidmann- Bombentest

→ <http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Quantentheorie/Bombe/>

Elitzur-Vaidmann-Bombentest

- Der Bombentest illustriert die „Quantenlogik“: kein klassisches „entweder – oder“ anwendbar!
- Einige Bombe sind scharf und bestehen den Test, d.h. sie explodieren nicht – *womit* wurde das eigentlich „gesehen“, wenn doch kein Photon beim Zünder war?

Elitzur-Vaidmann-Bombentest

- Der Bombentest illustriert die „Quantenlogik“: kein klassisches „entweder – oder“ anwendbar!
- Einige Bombe sind scharf und bestehen den Test, d.h. sie explodieren nicht – *womit* wurde das eigentlich „gesehen“, wenn doch kein Photon beim Zünder war?
 - „Mit der Möglichkeit, dass die Bombe explodieren hätte können!?“
 - Unbestimmtheit und Nichtlokalität!
 - Was ist nun „wirklich“?

EPR-Paradoxon und Bellsche Ungleichung

Verschränkung, EPR-Paradoxon und Bellsche Ungleichung

Verschränkung, EPR-Paradoxon und Bellsche Ungleichung

- Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen (1934): Ist die Quantentheorie unvollständig?
- In der Version von David Bohm, mit Gicksen:
 - <http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Quantentheorie/gicks/epr.html>
- EPR-Paradoxon
- John Bell (1964): Konzept für eine **Entscheidung** durch ein Experiment
- Bellsche Ungleichung

EPR-Paradoxon und Bellsche Ungleichung

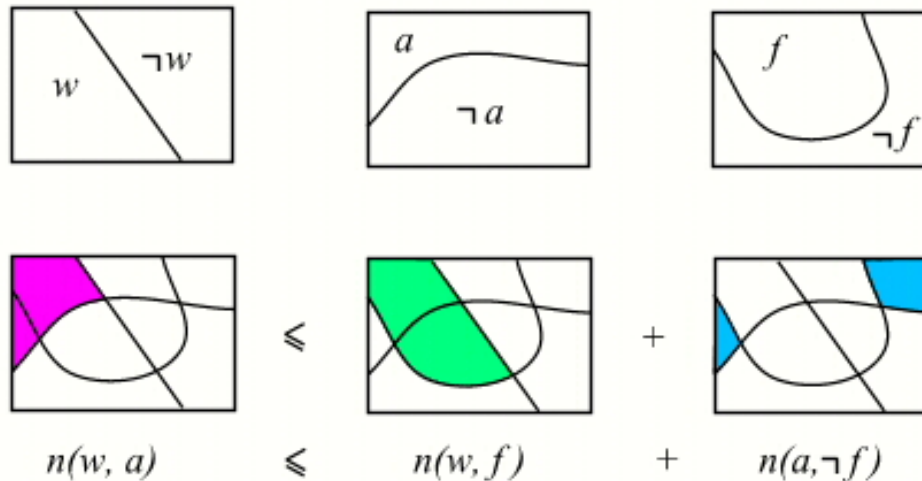
- John Bell (1964): Konzept für eine **Entscheidung** durch ein Experiment
- Bellsche Ungleichung

$$n(\text{Frauen, Auto}) \leq n(\text{Frauen, französisch}) + n(\text{AutofahrerInnen, nicht französisch})$$

EPR-Paradoxon und Bellsche Ungleichung

- John Bell (1964): Konzept für eine **Entscheidung** durch ein Experiment
- Bellsche Ungleichung

$$n(\text{Frauen, Auto}) \leq n(\text{Frauen, französisch}) + n(\text{AutofahrerInnen, nicht französisch})$$

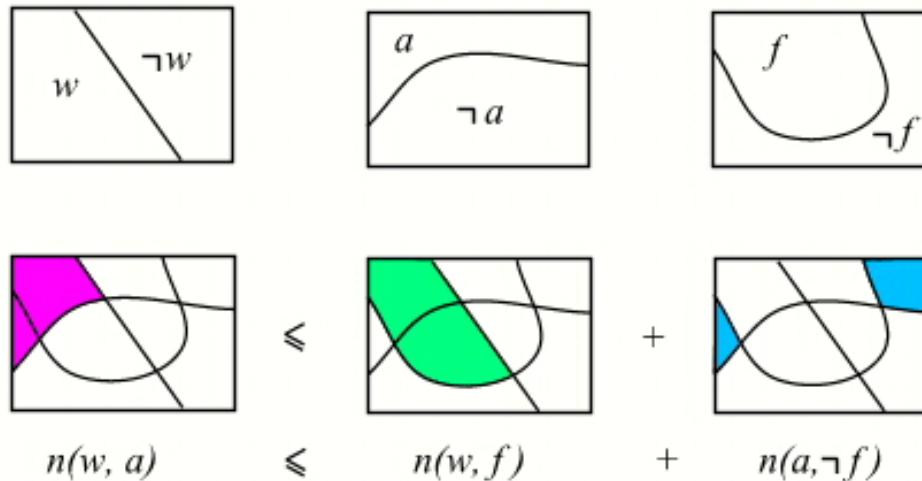


EPR-Paradoxon und Bellsche Ungleichung

- John Bell (1964): Konzept für eine **Entscheidung** durch ein Experiment
- Bellsche Ungleichung

physikalisch: Polarisierungen von Photonenpaaren

$$n(\text{Frauen, Auto}) \leq n(\text{Frauen, französisch}) + n(\text{AutofahrerInnen, nicht französisch})$$



EPR-Paradoxon und Bellsche Ungleichung

- **Experiment** (Alain Aspect 1982, Anton Zeilinger 1997):
Bellsche Ungleichung *verletzt!*
- Individuelle Polarisierungen von Photonen eines verschränkten Paares



können keine „Eigenschaften“ im herkömmlichen Sinn sein!!
→ *echte* Unbestimmtheit und Nichtlokalität!

- Die quantenmechanische Unbestimmtheit ist nicht lediglich Unkenntnis, sondern tatsächlich ein „**Keinen-festen-Wert-Haben**“! Sie kann *nicht* durch eine zugrundeliegende („lokal-realistische“) klassische Theorie erklärt werden (wie Einstein vermutet hat).

Zwischenbilanz...

- Unbestimmtheit und Nichtlokalität → Problem der „Interpretation der Quantenphysik“

Zwischenbilanz...

- Unbestimmtheit und Nichtlokalität → Problem der „Interpretation der Quantenphysik“

aber:

- Sie können ausgenutzt werden, um neue Technologien zu schaffen! In diesem Sinn sind sie ganz „**real**“!

Quantenteleportation

Quantenteleportation

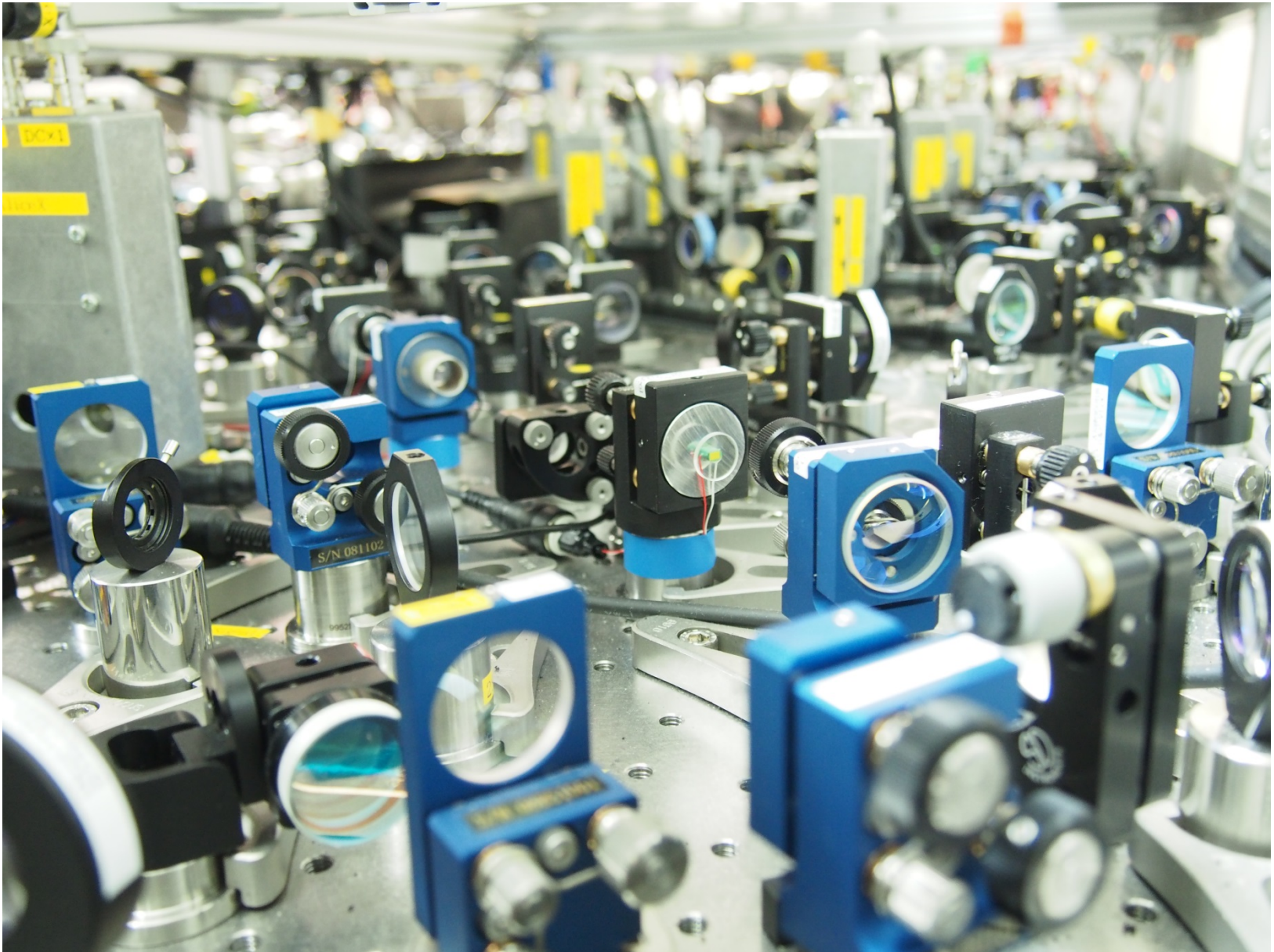
Quantenteleportation

- Alice „schickt“ Bob einen Quantenzustand nach einem bestimmten „Protokoll“.
 - <http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Quantentheorie/gicks/teleportation.html>
 - <http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Quantentheorie/Teleportation/> (in Bildern)

Quantenteleportation

- Alice „schickt“ Bob einen Quantenzustand nach einem bestimmten „Protokoll“.
 - <http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Quantentheorie/gicks/teleportation.html>
 - <http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Quantentheorie/Teleportation/> (in Bildern)
- Es ist verblüffend wenig „klassische Kommunikation“ nötig ist!
- Keine Überschreitung der Lichtgeschwindigkeit (!), aber Ausnutzung der quantenmechanischen Nichtlokalität.

Aufbau des Experiments an der Universität Tokio



Quantenspiel

Quantenspiel

Quantenspiel

3 KandidatInnen, getrennt, jedeR bekommt *eine* Frage:

- $G_{\text{geschmack}}$... süß oder sauer? \rightarrow 1 oder -1
- $T_{\text{temperatur}}$... heiß oder kalt? \rightarrow 1 oder -1

Aufgabe:

- *Falls* GTT, TGT oder TTG ... Das Produkt der Antworten soll **1** sein.
- *Falls* GGG ... Das Produkt der Antworten soll **-1** sein.

Quantenspiel

3 KandidatInnen, getrennt, jedeR bekommt *eine* Frage:

- $G_{\text{geschmack}}$... süß oder sauer? \rightarrow 1 oder -1
- $T_{\text{temperatur}}$... heiß oder kalt? \rightarrow 1 oder -1

Aufgabe:

- *Falls* GTT, TGT oder TTG ... Das Produkt der Antworten soll **1** sein.
- *Falls* GGG ... Das Produkt der Antworten soll **-1** sein.

Gibt es eine sichere Strategie, die Aufgabe zu lösen?

Quantenspiel

3 KandidatInnen, getrennt, jedeR bekommt *eine* Frage:

- $G_{\text{geschmack}}$... süß oder sauer? \rightarrow 1 oder -1
- $T_{\text{temperatur}}$... heiß oder kalt? \rightarrow 1 oder -1

Aufgabe:

typisch quantenmechanische Situation

- *Falls* GTT, TGT oder TTG ... Das Produkt der Antworten soll **1** sein.
- *Falls* GGG ... Das Produkt der Antworten soll **-1** sein.

Gibt es eine sichere Strategie, die Aufgabe zu lösen?

\rightarrow <http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Quantentheorie/Quantenspiel.pdf>

Quantenspiel

„Strategiezettel“:

- **Kandidat 1:** T ... x_1 G ... y_1 (x_1 und y_1 ... 1 oder -1)
- **Kandidat 2:** T ... x_2 G ... y_2 (x_2 und y_2 ... 1 oder -1)
- **Kandidat 3:** T ... x_3 G ... y_3 (x_3 und y_3 ... 1 oder -1)

Anforderungen an die Strategie:

$$\text{GTT} \dots y_1 \ x_2 \ x_3 = 1$$

$$\text{TGT} \dots x_1 \ y_2 \ x_3 = 1$$

$$\text{TTG} \dots x_1 \ x_2 \ y_3 = 1$$

$$\text{GGG} \dots y_1 \ y_2 \ y_3 = -1$$

Quantenspiel

„Strategiezettel“:

- **Kandidat 1:** T ... x_1 G ... y_1 (x_1 und y_1 ... 1 oder -1)
- **Kandidat 2:** T ... x_2 G ... y_2 (x_2 und y_2 ... 1 oder -1)
- **Kandidat 3:** T ... x_3 G ... y_3 (x_3 und y_3 ... 1 oder -1)

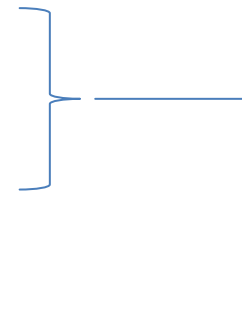
Anforderungen an die Strategie:

$$\text{GTT} \dots y_1 \ x_2 \ x_3 = 1$$

$$\text{TGT} \dots x_1 \ y_2 \ x_3 = 1$$

$$\text{TTG} \dots x_1 \ x_2 \ y_3 = 1$$

$$\text{GGG} \dots y_1 \ y_2 \ y_3 = -1$$



Folgerung: $y_1 \ y_2 \ y_3 \ (x_1)^2 \ (x_2)^2 \ (x_3)^2 = 1$

$\rightarrow y_1 \ y_2 \ y_3 = 1$... Widerspruch zu GGG!

Quantenspiel

„Strategiezettel“:

- **Kandidat 1:** T ... x_1 G ... y_1 (x_1 und y_1 ... 1 oder -1)
- **Kandidat 2:** T ... x_2 G ... y_2 (x_2 und y_2 ... 1 oder -1)
- **Kandidat 3:** T ... x_3 G ... y_3 (x_3 und y_3 ... 1 oder -1)

Anforderungen an die Strategie:

$$\text{GTT} \dots y_1 \ x_2 \ x_3 = 1$$

$$\text{TGT} \dots x_1 \ y_2 \ x_3 = 1$$

$$\text{TTG} \dots x_1 \ x_2 \ y_3 = 1$$

$$\text{GGG} \dots y_1 \ y_2 \ y_3 = -1$$

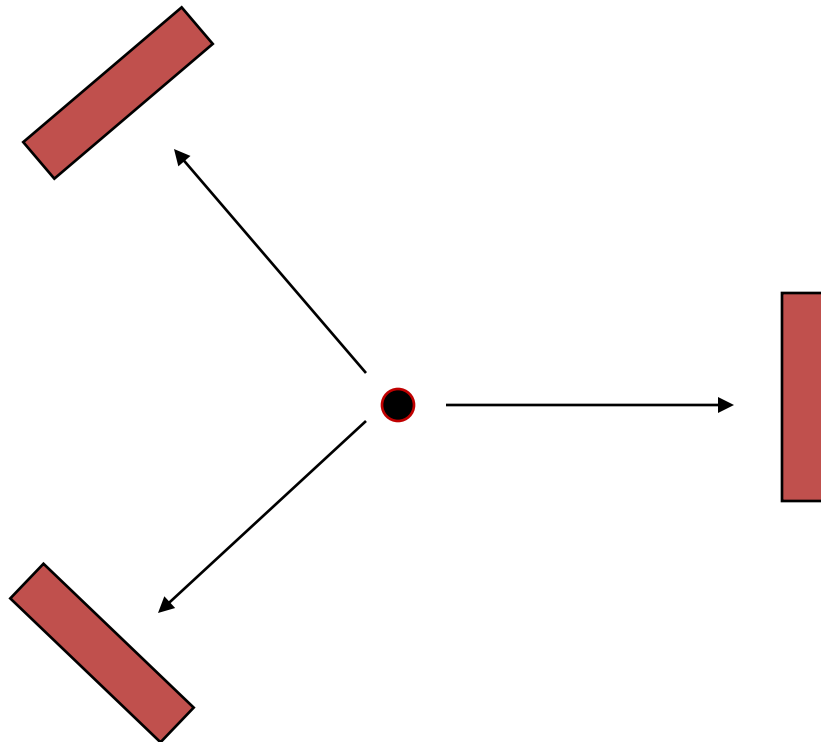
Folgerung: $y_1 \ y_2 \ y_3 \ (x_1)^2 \ (x_2)^2 \ (x_3)^2 = 1$

→ $y_1 \ y_2 \ y_3 = 1$... Widerspruch zu GGG!

→ Es gibt *keine* sichere Strategie!

Quantenspiel

Verschränkte Teilchen *haben* aber eine solche Strategie!



→ Nichtlokalität

„GHZ-Zustand“

G und T entsprechen Messungen von Polarisationen mit unterschiedlich ausgerichteten Polarisatoren.

Quantenkryptographie

Quantenkryptographie

Quantenkryptographie

- Alice will Bob eine geheime Nachricht schicken. Dazu brauchen sie einen geheimen „Schlüssel“. Alice präpariert Photonen mit zufälligen Polarisator-Stellungen: + ($|=0$, $- =1$) oder x ($/=0$, $\backslash=1$), z.B.:

Alices Basis: + x x + x + + + ...

Spin/Polarisation: 0 1 1 0 1 1 0 0 ...

- Bob misst (zufällig) in einer der 2 Basen, z.B.:

Bob misst: Basis: x + x x x x + x ...

Spin/Polarisation: 1 1 1 0 1 0 0 1 ...

Quantenkryptographie

- Alice will Bob eine geheime Nachricht schicken. Dazu brauchen sie einen geheimen „Schlüssel“. Alice präpariert Photonen mit zufälligen Polarisator-Stellungen: + ($|=0$, $- =1$) oder x ($/=0$, $\backslash=1$), z.B.:

Alices Basis: + x **x** + **x** + **+** + ...
Spin/Polarisation: 0 1 **1** 0 **1** 1 **0** 0 ...

- Bob misst (zufällig) in einer der 2 Basen, z.B.:

Bob misst: Basis: x + **x** x **x** x **+** x ...
Spin/Polarisation: 1 1 **1** 0 **1** 0 **0** 1 ...

- Austausch der Basen

Quantenkryptographie

- Alice will Bob eine geheime Nachricht schicken. Dazu brauchen sie einen geheimen „Schlüssel“. Alice präpariert Photonen mit zufälligen Polarisator-Stellungen: + ($|=0$, $- =1$) oder x ($/=0$, $\backslash=1$), z.B.:

Alices Basis: + x **x** + **x** + **+** + ...
Spin/Polarisation: 0 1 **1** 0 **1** 1 **0** 0 ...

- Bob misst (zufällig) in einer der 2 Basen, z.B.:

Bob misst: Basis: x + **x** x **x** x **+** x ...
Spin/Polarisation: 1 1 **1** 0 **1** 0 **0** 1 ...

- Austausch der Basen → Schlüssel: **1 1 0** ...
- Einige Bits testen: Lauscher werden bemerkt!

→ Für ein interaktives Programm dazu siehe
<http://homepage.univie.ac.at/heidemarie.knobloch/>

Quantencomputer

Quantencomputer

Quantencomputer

- Richard Feynman, David Deutsch: Parallelrechnung in den Zweigen („Partialwellen“) einer Überlagerung
- Wie viele elementare Rechenschritte sind nötig, um herauszufinden, ob zwei Zahlen (die jeweils 0 oder 1 sind) gleich sind?

Quantencomputer

- Richard Feynman, David Deutsch: Parallelrechnung in den Zweigen („Partialwellen“) einer Überlagerung
- Wie viele elementare Rechenschritte sind nötig, um herauszufinden, ob zwei Zahlen (die jeweils 0 oder 1 sind) gleich sind?

cl ... 2 / qu ... 1

Quantencomputer

- Richard Feynman, David Deutsch: Parallelrechnung in den Zweigen („Partialwellen“) einer Überlagerung
- Wie viele elementare Rechenschritte sind nötig, um herauszufinden, ob zwei Zahlen (die jeweils 0 oder 1 sind) gleich sind?

cl ... 2 / qu ... 1

- Wie viele Ablesungen sind nötig, um eine Nummer in einem Telefonbuch einer Millionenstadt zu finden?

Quantencomputer

- Richard Feynman, David Deutsch: Parallelrechnung in den Zweigen („Partialwellen“) einer Überlagerung
- Wie viele elementare Rechenschritte sind nötig, um herauszufinden, ob zwei Zahlen (die jeweils 0 oder 1 sind) gleich sind?

cl ... 2 / qu ... 1

- Wie viele Ablesungen sind nötig, um eine Nummer in einem Telefonbuch einer Millionenstadt zu finden?

cl ... 500000 / qu ... 1000

→ <http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Quantencomputer/>

Was wäre, wenn...

Was wäre, wenn...

Was wäre, wenn...

...die Natur nicht „quantenmechanisch“ wäre:

- **Unbestimmtheit** und **Pauli-Prinzip**: Es gäbe keine Atome!
- **Tunneleffekt**:
 - Die Sonne würde nicht leuchten, denn in ihr gäbe es keine Kernfusion!
 - Es gäbe (wenn überhaupt) keine schwereren Atomkerne als Wasserstoff und Helium!
 - Es gäbe keine Halbleiter und daher keine elektronischen Geräte!
- Es wäre (?) die Zukunft determiniert!

Danke...

... für Ihre Aufmerksamkeit!



Diese Präsentation (und ein paar zusätzliche Links)
finden Sie im Web unter

<http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Quantentheorie/Quantenwirklichkeit/>