

Cavity QED mit Mikrowellen Resonanz

Nobel Preis (2012) von Serge Haroche

Angelo Brade

University of Bonn

April 14, 2025

Outline

1 Historische Einordnung

- Vorrangegangene Entwicklungen
- Schrödingers Katze
- Prinzip

2 Mikrowellen Resonator

- Stehende Wellen und Moden
- Spiegel
- Q Faktor

3 QND

- Rydberg-Atom
- Ramsey Interferometer

4 Schrödingers Kätzchen

5 Ergebnisse

6 Zusammenfassung

Vorrangegangene Entwicklung

- Einstein, Schrödinger, etc. hatten nur Gedankenexperimente von einzelnen QM Zuständen (1930)
 - ▶ reales Experiment undenkbar
 - ▶ nur Theorie
- bisher nur Experimente mit den "Überresten" möglich (Ionisationsspuren, etc.)
 - ▶ **Teilchen/Zustand** wurde dabei **zerstört**

Schrödingers Katze

- Tod von Zustand des Teilchens abhängig
- Teilchen in Superposition
- ⇒ Katze mit Teilchen verschränkt
- Box wird geöffnet ⇒ Zustand kollabiert



Figure: Schrödingers Katze[2]

Prinzip

- Serge Haroche (geb. 1944)
- Ziel: Beobachtung von einzelnden Teilchen, ohne sie zu zerstören
-
- Nutzt Jaynes-Cummings Modell und QND



Figure: Serge Haroche[1]

Jaynes-Cummings Modell

Prinzip

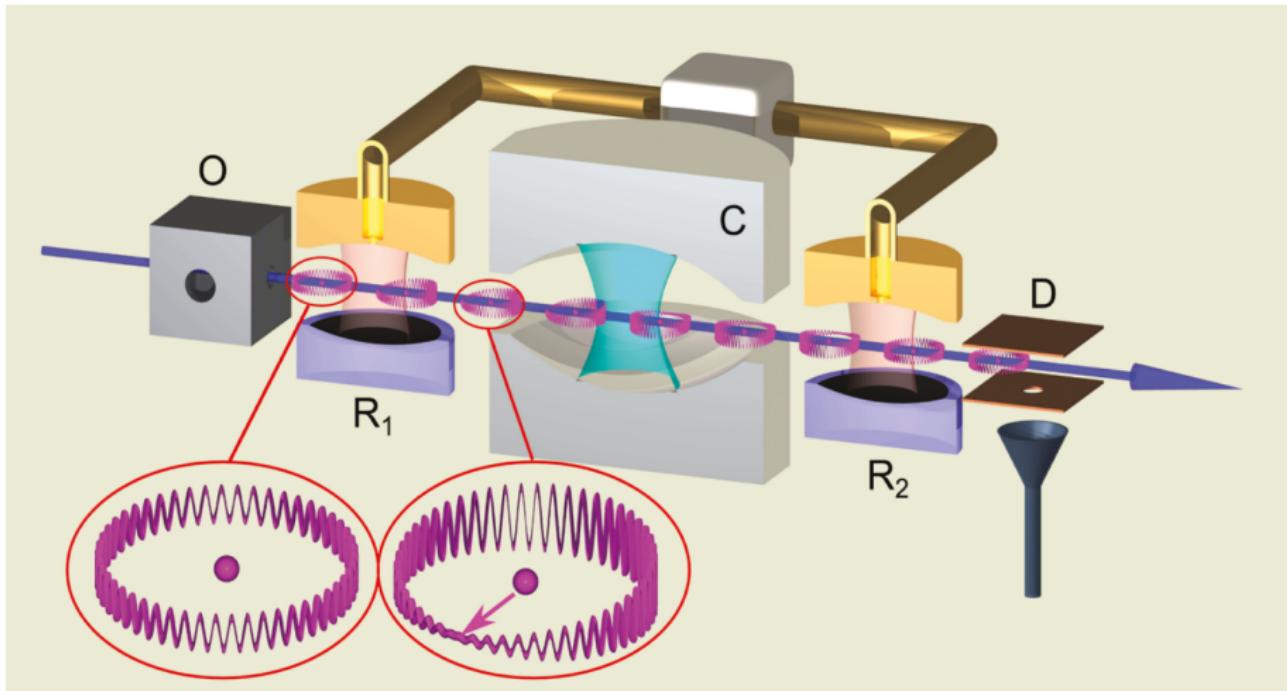


Figure: cQED Aufbau mit Ramsey Interferometer[2]

Stehende Wellen

① Einlaufende Welle

- ▶ $E_1 = A e^{i(\omega t - kx)}$

② Reflexion

- ▶ Umkehrung der Phase $kx \rightarrow -kx$ und Phasenverschiebung π

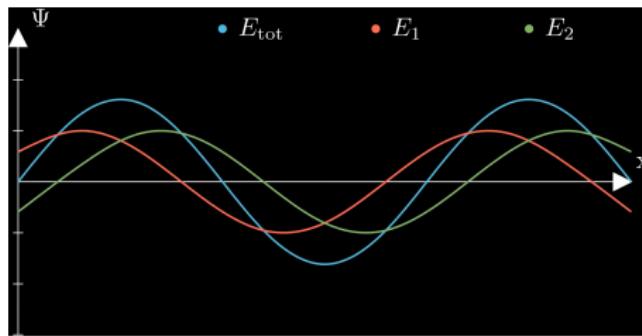
③ Auslaufende Welle

- ▶ $E_1 \rightarrow E_2 = A e^{i(\omega t + kx + \pi)}$

④ Interferenz nach Superpositionsprinzip

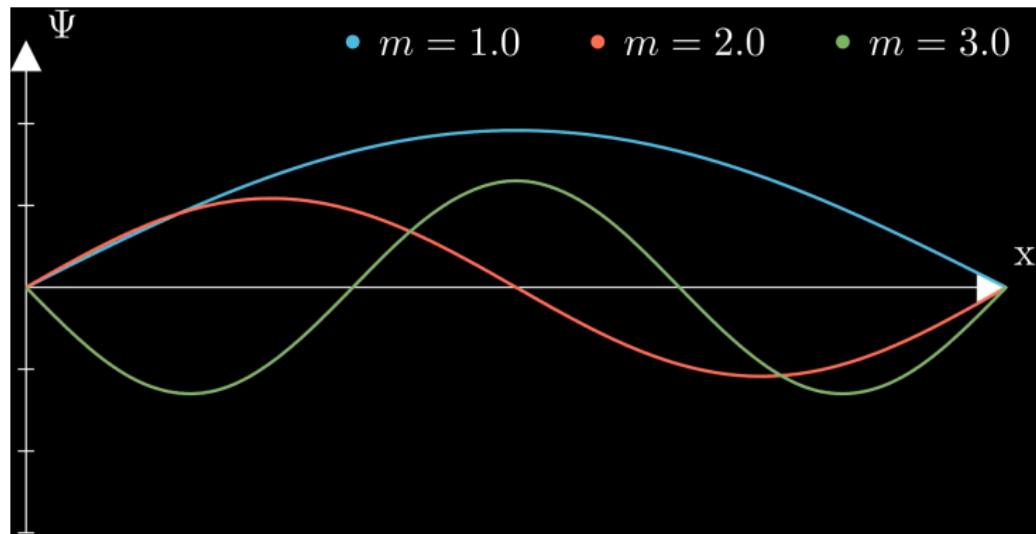
- ▶ $E_{\text{tot}} = E_1 + E_2 = 2A e^{i(\omega t + \frac{\pi}{2})} \cos(kx + \frac{\pi}{2})$

- ▶ $\Rightarrow y(x, t) = \text{Re}(E_{\text{tot}}) = 2A \sin(\omega t) \sin(kx)$



Moden

- Mode: $y(x, t) = \text{Re}(E_{\text{tot}}) = 2A \sin(\omega t) \sin(kx)$
 - ▶ mit $k = \pi \cdot m, m \in \mathbb{N}$
 - ▶ für $v_{\text{gr.}} = c = 1 \Rightarrow k = \omega$



Spiegel

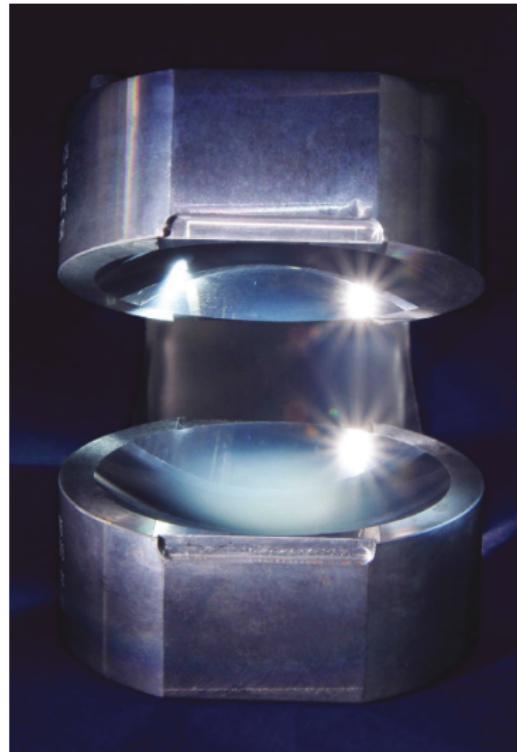


Figure: Photonbox[2]

Spiegel

- Luft und Spiegel können als Leiter betrachtet werden
- Reflektionskoeffizient: $r = \frac{Z_A - Z_W}{Z_A + Z_W}$
 - ▶ Z_A :=Abschlusswiderstand
 - ▶ Z_W :=Wellenwiderstand
- Für Metalle gilt: $Z_M = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma + i\omega\epsilon}}$ mit σ :=Leitfähigkeit
- Spiegel (Abschluss) aus Metall: $Z_A = Z_M$
- $\Rightarrow \lim_{\sigma \rightarrow \infty} r = -1$

Q Faktor: Güte

- $Q := \frac{\text{gespeicherte Energie}}{\text{Energieverlust}}$
- $r \rightarrow \pm 1 \Leftrightarrow Q \rightarrow \infty$
- Spiegel von Haroche: $Q \approx 10^6 \hat{=} \tau_\gamma \propto 10^{-3} \text{s}$
 - ▶ Zu niedrig
- Bandbreite $B \propto \frac{1}{Q}$
 - ▶ geringere Bandbreite \Rightarrow Mode trifft Resonanzfrequenz besser
- \Rightarrow Leitfähigkeit soll maximiert werden

Wie kann man die Leitfähigkeit erhöhen?

Q Faktor: Meschede

- Spiegel von Meschede:
 $Q \approx 10^{10} \hat{=} \tau_\gamma \propto 10^1 \text{s}$
 - ▶ nutzt **Supraleiter**
 $\Leftrightarrow Z_M \approx 0 \Leftrightarrow r \approx -1$
- Haroche nutzt Spiegel von Meschede
- Meschede wird Postdoc von Haroche



Figure: Dieter Meschede[4]

Quantum nondemolition (QND) measurement

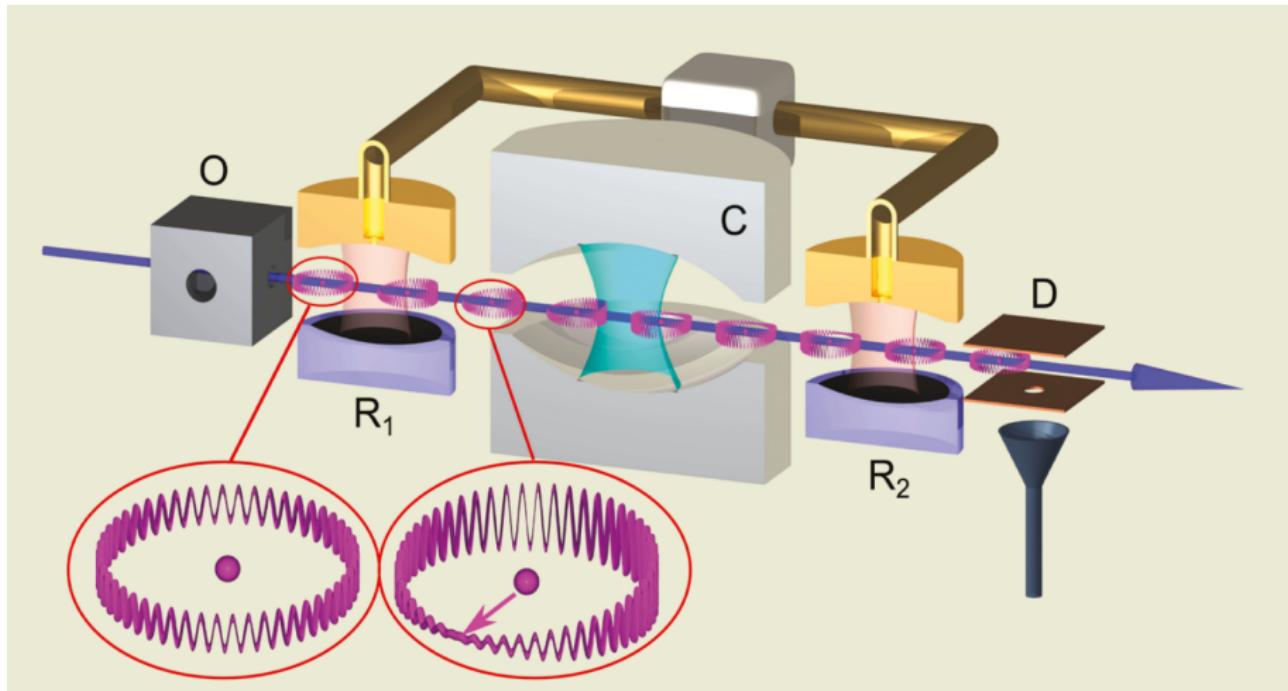


Figure: cQED Aufbau mit Ramsey Interferometer[2]

Rydberg-Atom

- Atom: stark angeregte e^-
- hier: e^- in $n = 50$ und $n = 51$ Orbital
 - ▶ $|g\rangle = |n = 50\rangle$ und $|e\rangle = |n = 51\rangle$
 - ▶ schnelle Oszillation
 $\Rightarrow \approx$ monopol (uniforme Welle)
- $\frac{1}{\sqrt{2}}(|g\rangle + |e\rangle) \Rightarrow$ Schwebung
 - ▶ Störung ist analog zu Spin Resonanz mit $\pi/2$ -RF Puls
 - ▶ Schwebung: $f = 51$ GHz \Rightarrow dipol
- Photon präsent $|g\rangle$ und $|e\rangle$ werden leicht verschoben
 $\Rightarrow f \neq 51$ GHz

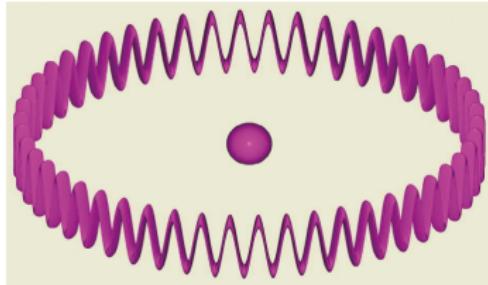


Figure: Uniforme Welle[2].

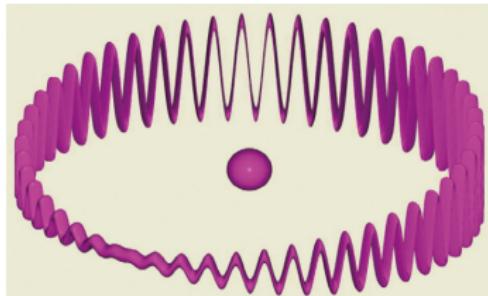


Figure: Dipol Welle[2].

RF-Puls

- ① zwei niveau System \Leftrightarrow Bloch-Kugel
- ② $\pi/2$ -Puls "klappt"
 $|g\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|g\rangle + |e\rangle)$ um
- ③ Phase ϕ präzidiert
 - ▶ Photon präsent: $\phi \rightarrow 2\pi$
 - ▶ Photon abwesend: $\phi \rightarrow \pi$
- ④ R2 Puls "klappt" mit $\pi/2$ -Puls nach
 - ▶ nach oben ($\phi = 2\pi$)
 - ▶ nach unten ($\phi = \pi$)

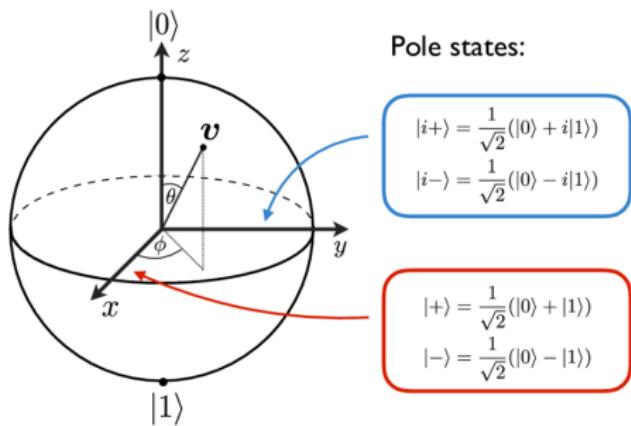


Figure: Blochkugel[3].

Ramsey Interferometer

- ① R1: $\pi/2$ -Puls für Superposition
- ② Cavity: ändert Präzidierung
 - ▶ Rydberg-Atom wird nicht durch Photon angeregt \Rightarrow Photon wird **nicht absorbiert**
 - ▶ Photon resoniert nur mit Dipol \Rightarrow verschiebt Energieniveaus
- ③ R2: $\pi/2$ -Puls klappt in $|g\rangle$ oder $|e\rangle$ um
 - ▶ $|g\rangle \Rightarrow$ ein Photon
 - ▶ $|e\rangle \Rightarrow$ kein Photon

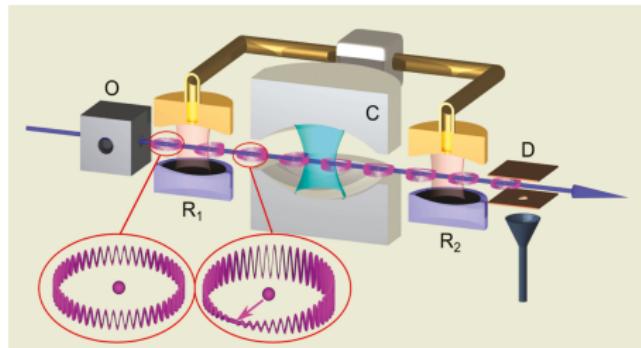
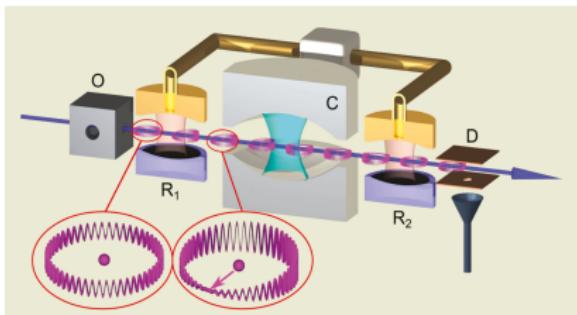


Figure: cQED Aufbau mit Ramsey Interferometer[2]

Schrödingers Kätzchen

- Rydberg-Atom $\hat{=}$ Katze
 - ▶ Zustand vom Rydberg-Atom gibt Aufschluss über Zustand von Photon
 - ▶ Zustand von Katze gibt Aufschluss über Zustand von Atom



\Leftrightarrow



Figure: cQED Aufbau mit Ramsey Interferometer[2]

Figure: Schrödingers Katze[2]

Ergebnisse

- können so auf die Präsenz eines singulären Photons schließen
- kann aber auch so angepasst werden, dass verschiedene Dipolausrichtungen verschiedene Mengen an Photonen darstellen

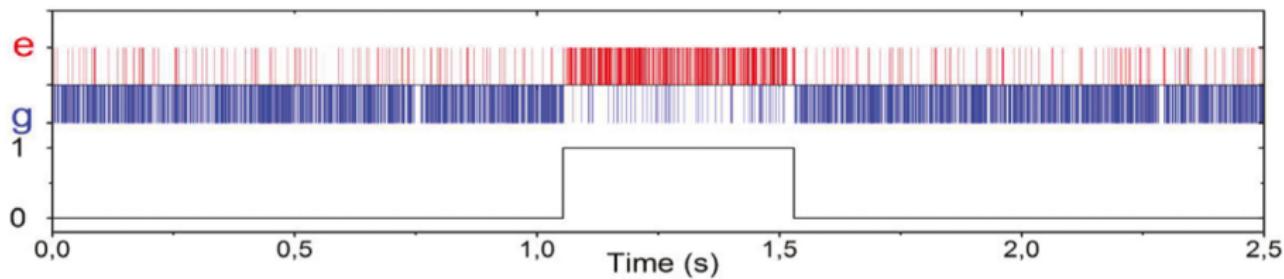


Figure: Aufnahme[2]

Ergebnisse

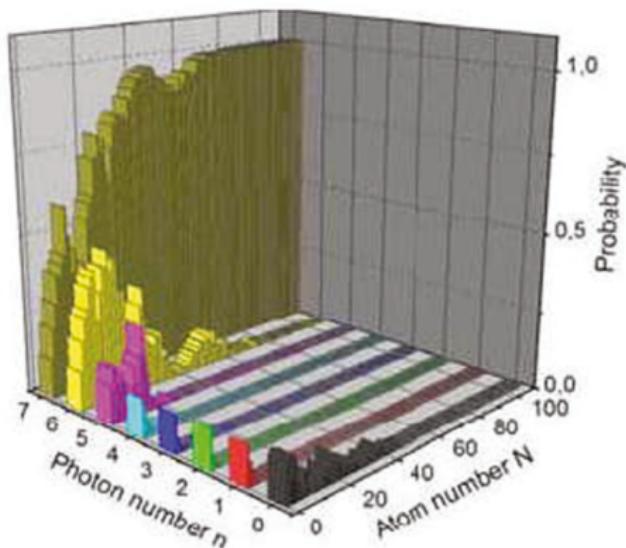
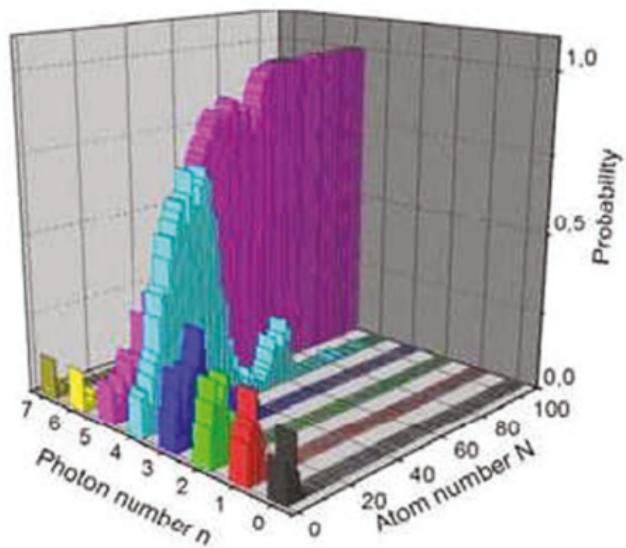


Figure: Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Photonenanzahl[2]

Ergebnisse

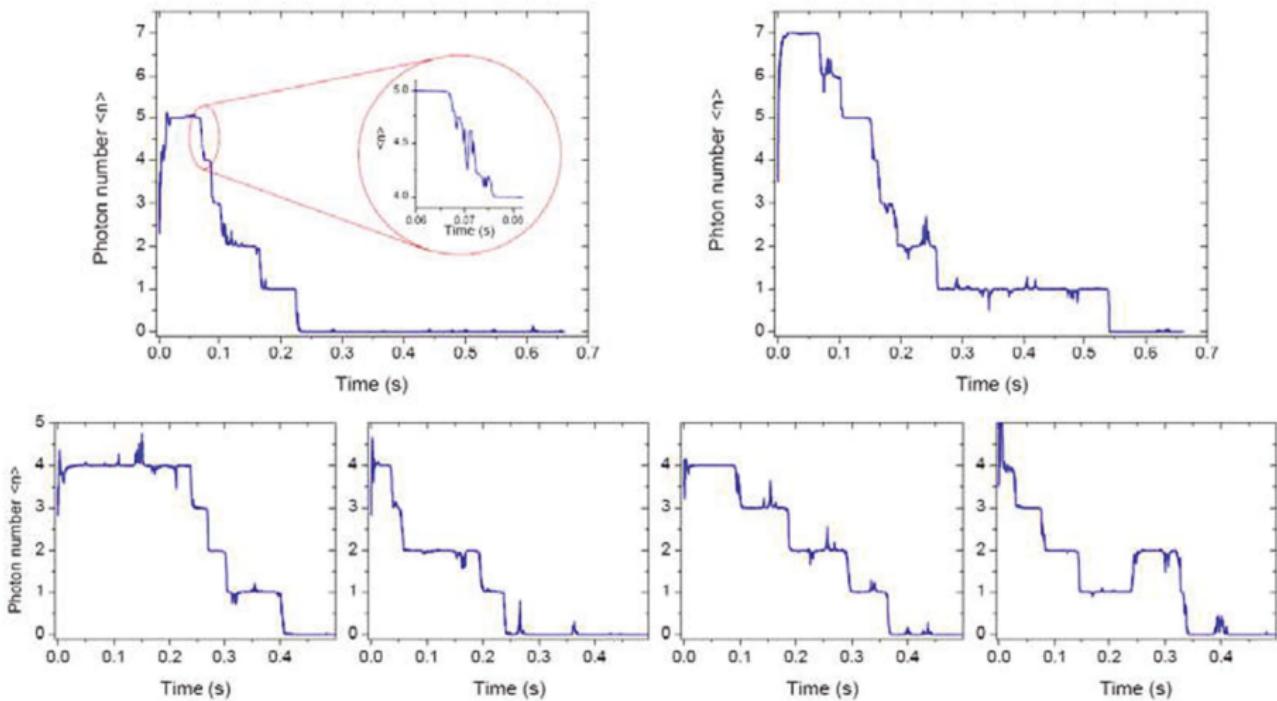


Figure: Zeitentwicklung[2]

Zusammenfassung

- Aparatur
 - ▶ Cavity: Stehende Mikrowelle
 - ▶ QND: Rysberg-Atom in Superposition abhängig von Präsens von Photon
- Zum ersten Mal einzelnes Teilchen gemesse, ohne Zustand zu zerstören
- direkt analog zu bekanntem Gedankenexperiment: Schrödingers Katze

- [1] *britannica.*
<https://www.britannica.com/biography/Serge-Haroche>. Letzter Zugriff: 2025-04-11.
- [2] *Serge Haroche. Nobel Lecture: Controlling Photons in a Box and Exploring the Quantum to Classical Boundary.* Letzter Zugriff: 2025-04-10.
- [3] *Andreas Ketterer. Modular variable in quantum information.* Letzter Zugriff: 2025-04-14.
- [4] *qute.sk.* <https://www.qute.sk/qute-sk-welcomed-renowned-physicist-prof-dr-dieter-meschede-to-slovakia/>. Letzter Zugriff: 2025-04-10.