

Weniger ist mehr: Vom Nutzen unscharfer Quanten-Messungen

1. Abstract

Die quantenmechanischen Standardmessungen greifen in die zeitliche Entwicklung eines Quantenzustandes massiv ein und ändern sie ab. Wenn man auf vollständige Information verzichtet und geeignet unscharf mißt, kann man durch eine Sequenz von Messungen die Zustandsentwicklung zum Beispiel eines einzelnen Photons näherungsweise in Echtzeit verfolgen.

2. Abstract

Mit einer Messung will man etwas über ein Objekt erfahren. In der Quantenwelt zahlt man dafür üblicherweise einen hohen Preis: Nach der quantenmechanischen Standardmessung (z.B. des Spins) befindet sich das Objekt in einem Eigenzustand (z.B. „spin up“ oder „spin down“), der sich möglicherweise drastisch vom Zustand vor der Messung unterscheidet. Ist es daher in der Quantenwelt unmöglich, die dynamische zeitliche Entwicklung – beispielsweise eines quantenoptischen Systems – ohne große Störung in Echtzeit messend zu verfolgen, so wie man das bei jedem fahrenden Auto kann?

Wer mit seinem Auto in eine Radarfalle gerät, merkt das dadurch, dass er angeblitzt wird. Einen Ruck an seinem Auto spürt er aber nicht. Die Geschwindigkeit des Autos, also sein Bewegungszustand, wird durch den Akt der Messung nicht abgeändert. Abbremsen muss der Fahrer sein Auto schon selber. Dieses Beispiel veranschaulicht einen charakteristischen Zug der Alltagsphysik: Messung ändert den Zustand eines Systems nicht ab. Der Sack Kartoffeln ist nach dem Wiegen genau so schwer wie vorher.

Das ändert sich fundamental für die Objekte der Quantenwelt. In der Regel ändern Messungen an einem Quantensystem den Zustand des Systems ab. Welcher neue Zustand nach der Messung vorliegt, hängt dabei vom erhaltenen Messergebnis ab. Wenn man z.B. an einem Quantensystem mit diskreten Energieniveaus – man kann sich z.B. ein Atom vorstellen – eine Energiemessung durchführt, dann zeigt das Messgerät einen der möglichen Energiewerte an und das System geht in den entsprechenden Energieeigenzustand über. Diese quantenmechanischen Messungen werden mit Bezug auf ihre theoretische Formulierung auch Projektionsmessungen genannt (s. Kasten 1).

Kasten 1: Direkte Projektionsmessung

Wir betrachten zwei 2-Niveau-Systeme, das Objektsystem O und als Hilfssystem das Metersystem M. Die den Niveaus von O zugeordneten orthonormalen Basisvektoren seien $|0\rangle$ und $|1\rangle$ bzw. bei M die Vektoren $|+\rangle$ und $|-\rangle$. Eine $\binom{0}{1}$ - Projektionsmessung (von Neumann-Messung) am Objektsystems O im Zustand

$$|\varphi\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle$$

hat mit der Wahrscheinlichkeit $|c_0|^2$ das Meßergebnis 0 und mit $|c_1|^2$ das Meßergebnis 1. Dabei wird O als Ergebnis der Messung „sprunghaft“ in den Zustand $|0\rangle$ bzw. $|1\rangle$ überführt (direkte Projektionsmessung). Für eine $\binom{+}{-}$ - Projektionsmessung am Hilfssystem M gilt Entsprechendes. In beiden Fällen handelt es sich um eine direkte Projektionsmessung am jeweiligen Untersystem.

Das typisch quantenmechanische Verhalten soll noch einmal am Beispiel der sogenannten Rabi-Oszillationen veranschaulicht werden: Ein Quantensystem besitzt zwei Energieniveaus. Unter äußerem Einfluß bewegt sich der Zustand des Systems in einem periodischen Vorgang von einem Energieeigenzustand zum anderen und wieder zurück. Etwas genauer muss man sagen, dass das System z.B. in einem der Energieeigenzustände startet, dass danach sein Zustand als eine Überlagerung beider Energiezustände zu beschreiben ist, dann der zweite Energiezustand angenommen wird und anschließend in Umkehrung der Bewegung wieder eine Superposition entsteht, dann erneut der erste Zustand angenommen wird und so fort. Misst man die Energie im Zustand „zwischen den Energieeigenzuständen“, also wenn sich das System in einer Superposition befindet, dann ergibt sich als Messwert mit der entsprechenden Wahrscheinlichkeit entweder der eine oder der andere Energiewert und das System wird instantan in den entsprechenden Energieeigenzustand überführt. Die stetig verlaufende ungestörte Zustandsentwicklung wird durch die Messung unterbrochen und je nach Messergebnis „springt“ das System in den entsprechenden Energieeigenzustand, von wo aus seine Entwicklung unter dem äusseren Einfluss erneut beginnt.

Wenn ein Auto seine Geschwindigkeit im Laufe der Zeit ändert, dann kann man diesen Geschwindigkeitsverlauf mit einer Sequenz von Radarmessungen verfolgen, ohne dass der Verlauf dabei abgeändert wird. Offenbar ist etwas Ähnliches in der Quantenwelt nicht möglich. Der Versuch, die Rabi-Oszillationen eines Quantenzustandes durch eine Ab-

folge von Projektionsmessungen zu registrieren scheitert, da nach jeder Messung die Zustandsbewegung neu von einem der Energieeigenzustände startet und so das ursprüngliche Gesamtverhalten völlig zerstört wird. Es ist unmöglich, auf diese Weise die ungestörte Zustandsentwicklung eines einzelnen Quantenobjekts in Echtzeit zu verfolgen. Eine analoge Situation würde entstehen wenn das Auto immer wieder von der Polizei angehalten wird und danach wieder von neuem anfängt zu fahren. Der ursprüngliche Fahrtverlauf wäre nicht mehr zu erkennen.

Dass die Verhältnisse in der Quantenwelt grundsätzlich verschieden sind von denen der Alltagsphysik lässt sich durch kein noch so geschicktes Vorgehen umgehen. Verglichen mit der klassischen Physik kann daher nur die Aufgabenstellung modifiziert werden. Wir wollen uns darauf beschränken, dass der ursprüngliche Verlauf der Rabi-Oszillationen des Zustandes nicht präzise, sondern nur näherungsweise in Echtzeit verfolgt und wiedergegeben wird. Die Vermutung ist, dass das gelingt, wenn wir zu einer Sequenz von Messungen neuen Typs übergehen, die keine Projektionsmessungen mehr sind, sondern die Eigenschaft haben, den Zustand durch die Messung nur geeignet schwach abzuändern. Dabei werden wir in Kauf nehmen müssen, dass sie auch nur weniger präzise Aussagen über den Quantenzustand liefern.

Die sogenannten unscharfen Messungen haben solche Eigenschaften. Sie werden verstärkt in den letzten Jahren im Rahmen der Quanten-Informationstheorie theoretisch untersucht und können z.B. quantenoptisch experimentell realisiert werden. Unscharfe Messungen sind spezielle verallgemeinerte Messungen und enthalten im Grenzfall scharfer Messungen die oben beschriebenen Projektionsmessungen. Sie nutzen das zentrale Hilfsmittel, das in Quanten-Informationstheorie und Quanten-Computing immer wieder eingesetzt wird: die Verschränkung von Quantensystemen [1] (s. Kasten 2).

Verschränkung soll kurz beschrieben werden: Wenn zwei einzelne Quantensysteme, z.B. zwei Photonen, sich isoliert voneinander jeweils in einem bestimmten Quantenzustand befinden, dann hat eine Projektionsmessung an einem dieser Systeme selbstverständlich keinerlei Einfluss auf das andere System. In unserem Beispiel überführt eine Projektionsmessung an einem der Photonen das andere Photon in keinen neuen Zustand. Das ändert sich, wenn die beiden Photonen ein einziges zusammengesetztes System bilden und in einem gemeinsamen 2-Photonen-Zustand vorliegen. Das kann das Ergebnis einer speziellen, an beiden Photonen angreifende Wechselwirkung sein, oder die beiden Photonen können in einem einzigen Erzeugungsprozeß entstanden sein.

Zwei Photonen, die in diesem beide umfassenden Gesamtzustand vorliegen, zeigen ganzheitliches Verhalten, sie sind verschränkt. Wenn man in diesem Fall an einem der Photonen eine Projektionsmessung vornimmt, dann geht auch das Partnerphoton in einen speziellen Zustand über. Über die Verschränkung sind ganz besondere neue Formen der Einflußnahme auf das Partnersystem möglich.

Kasten 2: **Verschränkung und indirekte Projektionsmessung**

Wir können Projektionsmessungen am Objektsystem O auch indirekt durchführen, indem wir zunächst das aus O und M zusammengesetzte Gesamtsystem OM in geeigneter Weise in einen verschränkten Zustand versetzen und dann projektiv am Metersystem M statt am Objektsystem O messen:

Sei das Gesamtsystem OM zunächst im Produktzustand

$$|\Psi\rangle = |\psi\rangle \otimes |-\rangle = (c_0|0\rangle + c_1|1\rangle) \otimes |-\rangle.$$

Eine an beiden Teilsystemen angreifende Wechselwirkung soll folgendermaßen beschaffen sein: Wenn das Objektsystem im Zustand $|0\rangle$ ist, dann wird das Metersystem in den Zustand $|+\rangle$ überführt. Ist das Objektsystem hingegen im Zustand $|1\rangle$, dann passiert nichts. Der Zustand des Objektsystems entscheidet also darüber, ob die Wechselwirkung „angeschaltet“ wird oder nicht. Auf diese Weise entsteht aus $|\Psi\rangle$ der verschränkte Zustand

$$|\Psi\rangle \rightarrow |\Psi'\rangle = c_0|0\rangle \otimes |+\rangle + c_1|1\rangle \otimes |-\rangle.$$

Verschränkte Zustände sind echte Superpositionen von Produktzuständen. Sie lassen sich nicht in einen einzigen Produktzustand umschreiben.

Wenn wir nach dieser Verschränkung am Metersystem eine (\pm)- Projektionsmessung durchführen, dann ergibt sich mit der Wahrscheinlichkeit $|c_0|^2$ der Meßwert + und die Teilsysteme O und M werden in den Zustand $|0\rangle$ bzw. $|+\rangle$ überführt (entsprechend ergibt sich mit Wahrscheinlichkeit $|c_1|^2$ der Meßwert - mit Überführung in $|1\rangle$ bzw. $|-\rangle$). Interpretieren wir schliesslich noch das Messergebnis + als Ergebnis 0 und Messergebnis - als Ergebnis 1, dann haben wir am Objektsystem O hinsichtlich der Wahrscheinlichkeiten der Messergebnisse und der entsprechenden resultierenden Zustände effektiv eine ($\begin{smallmatrix} 0 \\ 1 \end{smallmatrix}$)- Projektionsmessung durchgeführt (indirekte Projektionsmessung).

Wir geben ein Beispiel: Wenn in einem speziellen

verschränkten Zustand eines der beiden Photonen bei einer Polarisationsmessung in vertikaler Polarisation überführt wird, dann wird auch das Partnerphoton unmittelbar vertikal polarisiert. Wird als Ergebnis der Messung das erste Photon horizontal polarisiert, dann erhält auch das zweite Photon instantan eine horizontale Polarisierung. Dabei können die beiden Photonen, die den verschränkten Zustand bilden, im Prinzip beliebig weit voneinander entfernt sein. Es findet keine Wechselwirkung zwischen ihnen statt! Das Verhalten ist allein Folge der Verschränktheit des Ausgangszustandes des 2-Photonen-Systems. Verschränkung gibt es nicht nur zwischen zwei Photonen, sie ist zwischen irgendzwei oder mehr Quantensystemen möglich.

Kasten 3: Verallgemeinerte Messung

Wenn wir die indirekte Projektionsmessung (s. Kasten 2) etwas modifizieren, erhalten wir eine unscharfe Messung am Objektsystem O. Sie ist zugleich ein einfaches Beispiel für eine verallgemeinerte Messung (POVM-Messung). Wieder handelt es sich um die Superposition zweier Produktzustände, aber die Zustände des Objektsystems sind dabei selber wieder Superpositionen.

Hierzu verlangen wir, dass die an beiden Teilsystemen zugleich angreifende Wechselwirkung den Ausgangszustand $|\Psi\rangle$ des Gesamtsystems in den verschränkten Zustand

$$|\Psi''\rangle = (\sqrt{1-p} c_0|0\rangle + \sqrt{p} c_1|1\rangle) \otimes |+\rangle + (\sqrt{p} c_0|0\rangle + \sqrt{1-p} c_1|1\rangle) \otimes |-\rangle$$

überführt. p ist ein offener Parameter.

Anschließend führen wir (\pm) - Projektionsmessungen am Metersystem M durch und erhalten mit der Wahrscheinlichkeit $w_+ = (1-p)|c_0|^2 + p|c_1|^2$ den Messwert $+$. Das Objektsystem geht dabei in die Superposition

$$|\varphi''_+\rangle = (\sqrt{1-p} c_0|0\rangle + \sqrt{p} c_1|1\rangle) \cdot w_+^{-\frac{1}{2}}$$

und nicht mehr, wie bei der indirekten Projektionsmessung, in den Zustand $|0\rangle$ über. Für das Meßresultat $-$ finden wir $w_- = p|c_0|^2 + (1-p)|c_1|^2$ und

$$|\varphi''_-\rangle = (\sqrt{p} c_0|0\rangle + \sqrt{1-p} c_1|1\rangle) \cdot w_-^{-\frac{1}{2}}$$

Dieses verblüffende typisch quantenmechanische Verhalten kann man nun dazu nutzen, um Projektionsmessungen (s. Kasten 2) aber auch um unscharfe Messungen zu realisieren (s. Kasten 4). Dazu führt man neben dem Objektsystem, das ausgemessen werden soll, ein Metersystem als Hilffsystem ein. Die-

se Systeme werden in einer an beiden angreifenden geeigneten dynamischen Entwicklung in einen verschränkten Zustand überführt (s. Kasten 3). Die Dynamik kann man dabei über Parameter so einstellen, daß verschiedene Gerade von Verschränkung erzielt werden.

Führt man nach der Verschränkung am Metersystem eine Projektionsmessung durch, dann wird auch das Objektsystem – so wie wir das oben für das Photonenpaar beschrieben haben – in einen neuen Zustand überführt.

Kasten 4: Unscharfe Messungen

Wir können den Parameter p von Kasten 3 noch frei einstellen. Im Grenzfall $p = 0$ liegt wieder die im Kasten 2 diskutierte indirekte $\binom{0}{1}$ - Projektionsmessung an O vor. Für einen Parameter $p \neq 0$ ergibt eine indirekte Messung am speziellen Objektzustand $|\varphi\rangle = |0\rangle$ (d.h. $c_0 = 1, c_1 = 0$) aber nicht mehr mit Sicherheit den Meßwert $+$, vielmehr kann mit der Wahrscheinlichkeit $w_+ = p$ auch der Meßwert $-$ auftreten. Die Meßwerte streuen also. Wir haben die gewünschte unscharfe Messung erhalten. Zugleich wird bei Auftreten des Meßwertes $+$ das Objektsystem O nicht mehr in den Zustand $|0\rangle$, sondern in die Linearkombination $|\varphi''_+\rangle$ überführt.

Mit wachsendem Parameterwert p werden die beiden Zustände $|\varphi''_+\rangle$ und $|\varphi''_-\rangle$, in die das Objektsystem durch die unscharfe Messung überführt werden kann, dem Ausgangszustand $|\varphi\rangle$ von Gl. (1) immer ähnlicher. Der abändernde Einfluß der Messung wird also immer schwächer. Im Grenzfall $p = \frac{1}{2}$ wird schließlich der Objektzustand durch die Messung gar nicht mehr abgeändert: $|\varphi''_+\rangle = |\varphi''_-\rangle = |\varphi\rangle$. Dafür ergeben sich allerdings auch für jeden beliebigen Zustand $|\varphi\rangle$ die Meßresultate $+$ und $-$ stets mit gleicher Häufigkeit ($w_+ = w_- = \frac{1}{2}$). Es wird in diesem Fall keine Information mehr über den Zustand vor oder nach der Messung gewonnen. Im Allgemeinen läßt sich somit durch geeignete Wahl des Parameters p die Unschärfe der Messung beziehungsweise die Schwäche des Messeinflusses beliebig einstellen.

Der Messwert am Metersystem wird abgelesen und der Gesamtprozeß kann als Messprozeß am Objektsystem mit Messwert und Zustandsüberführung aufgefasst werden. Es ist eine unscharfe Messung entstanden (s. Kasten 4). Das Größe der Zustandsänderung hängt vom Grad der Verschränkung ab und läßt sich durch die Parameterwahl einstellen. Die Information, die man über das Objektsystem gewinnt ist um so geringer je schwächer die Verschränkung ist.

Dafür wird aber andererseits der Ausgangszustand des Objektsystems bei schwächer werdender Verschränkung immer weniger geändert. Es ergibt sich so die für die Quantentheorie typische Wechselbeziehung zwischen Informationsgewinn und Störung des Ausgangszustandes. Diese Wechselbeziehung nutzen wir aus.

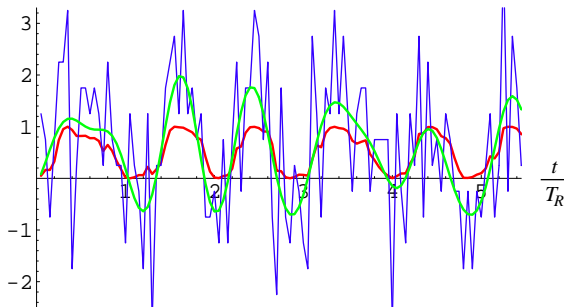
Durch die unscharfen Messungen haben wir einen neuen Zugang zu unserem Ausgangsproblem gefunden [2-4]. Das Objektsystem, z.B. ein 2-Niveau-Atom, führt eine Rabi-Oszillation zwischen den Zuständen $|0\rangle$ und $|1\rangle$ durch. Sein Zustandsvektor wird durch

$$|\varphi(t)\rangle = c_0(t)|0\rangle + c_1(t)|1\rangle$$

mit $|c_0(t)|^2 + |c_1(t)|^2 = 1$ beschrieben. Rabi-Oszillation äussert sich dann im Zeitverhalten mit $|c_1(t)|^2 = \sin^2(\omega t + \phi)$. Wir verschränken mit einem Metersystem und führen mit dessen Hilfe eine Sequenz unscharfer Messungen durch. Diese Messungen müssen dabei durch Einstellung der Parameter so dimensioniert werden, dass die Verarbeitung der Meßergebnisse näherungsweise noch die ungestörte Entwicklung von $|c_1(t)|^2$ widerspiegelt.

Um das zu erreichen sind die verschiedenen Einflüsse in ihrer Wirkung auf das 2-Niveau-System auszubalancieren. Zu berücksichtigen ist dabei einmal die Stärke der äusseren Wechselwirkung, die bewirkt, dass der Zustand Rabi-Oszillationen durchführt. Die Frequenz ω ist ein Maß dafür. Dem wirkt der abändernde Einfluß durch die Sequenz der unscharfen Messungen entgegen. Hinzu kommt noch, dass die Sequenz umso effektiver im Sinne einer Projektion des und damit Abänderung Zustandes wirkt, je schneller die Messungen aufeinander folgen (quantenmechanischer Zeno-Effekt).

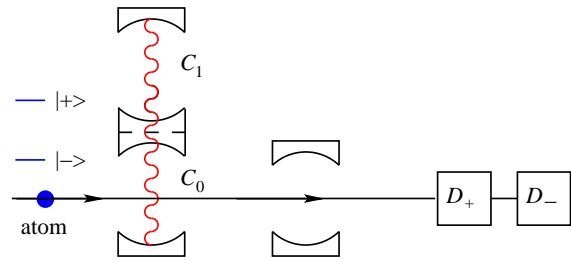
Tatsächlich kann die gewünschte Balance zwischen den Einflüssen gefunden werden. Unsere Computersimulationen liefern ein optimistisch stimmendes Resultat.



Die Abbildung zeigt als Ergebnis einer Computersimulation, dass in einer one-run-Situation für eine Sequenz *geeignet unscharfer* Messungen die Messkurve (blaue Kurve) mit der tatsächlichen

Zustandsentwicklung $|c_1(t)|^2$ (rote Kurve) korreliert ist. Dies wird besonders deutlich nach einer Reduktion des Rauschens (grüne Kurve). Wenn keine Messungen durchgeführt werden, haben die Rabi-Oszillationen der ungestörten Zustandsentwicklung die Schwingungsdauer T_R . Die gestrichelte Messkurve gibt das gut wieder. Unser Ergebnis ist: Die ersten Rabi-Oszillationen werden einerseits nur wenig abgeändert und doch kann andererseits durch Verarbeitung der Sequenz der Messergebnisse in Echtzeit diese etwas gestörte Rabi-Bewegung näherungsweise wiedergegeben werden. Bei zu scharfer Messung werden die ursprünglichen Rabi-Oszillationen völlig abgeändert (Kasten 6). Bei zu unscharfer Messung werden sie durch die Messkurve nicht wiedergegeben (Kasten 7).

Kasten 5: Rabi-Oszillationen eines Photons



Das Objektsystem ist ein Photon. Es führt Rabi-Oszillationen zwischen zwei Kavitäten C_0 und C_1 durch. Im Zustand $|0\rangle$ (bzw. $|1\rangle$) befindet es sich in der Kavität C_0 (bzw. C_1). Durch C_0 fliegt ein 2-Niveau-Atom mit den Energieeigenzuständen $|+\rangle$ und $|-\rangle$ (Metersystem). Nur wenn sich das Photon in der Kavität C_0 und damit im Zustand $|0\rangle$ befindet, tritt eine Wechselwirkung auf und der Atomzustand wird abgeändert. Das hat zur Folge (siehe Kasten 3), dass der Photonenzustand $|\psi\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle$ und der Atomzustand in einen verschränkten Zustand übergehen. Nach weiteren Manipulationen am Atomzustand (symbolisch durch die dritte Kavität angedeutet) wird schließlich die Energie des Atoms projektiv gemessen mit Messergebnis $+$ oder $-$. Dies stellt dann umgekehrt die gewünschte unscharfe Messung des Photonenzustandes dar. Ihre Parameter lassen sich über die Dimensionierungen der Versuchsanordnung einstellen.

Ist im Rahmen der Quantenoptik eine experimentelle Demonstration einer solchen Visualisierung von Rabi-Oszillationen möglich? Unser Vorschlag [5] hierfür beruht auf einer Modifikation des Experiments von Brune, Haroche et. al. [6], das hier nur unvollständig beschrieben werden kann (s. Kasten 5). Ein einzelnes Photon (Objektsystem) oszilliert zwi-

schen zwei gekoppelten Mikrowellenkavitäten C_0 und C_1 hin und her. Dieses Zeitverhalten soll registriert werden. Die Zustände $|0\rangle$ bzw. $|1\rangle$ von Gleichung (1) liegen vor, wenn das Photon sich in genau einer der Kavitäten befindet. Als Metersystem wird ein einzelnes Rydberg-Atom, das sich effektiv wie ein System mit nur zwei Energieniveaus verhält, durch eine der Kavitäten geschickt. Dabei zeigt sich, dass die Atomzustände im allgemeinen verschieden stark an beide Kavitätszustände koppeln. Atom und Photon gehen in einen verschränkten Zustand über. Damit ist die Voraussetzung für eine unscharfe Messung am Photon gegeben. Nach Verlassen der Kavität wird hierzu am Metersystem Atom eine projektive Energiemessung vorgenommen.

Für eine Sequenz solcher Einschüsse einzelner Atome ergibt die Computersimulation nach geeigneter Einstellung aller experimentellen Parameter und Verarbeitung der Messergebnisse die oben dargestellten Kurven. Eine messende Verfolgung der Zustandsentwicklung eines einzelnen Photons in Echtzeit sollte also mit Hilfe unscharfer Messungen experimentell realisierbar sein.

Wie man am Beispiel der unscharfen Messungen sieht, kann das Motto des Bauhaus-Architekten Mies van der Rohe

“less is more”

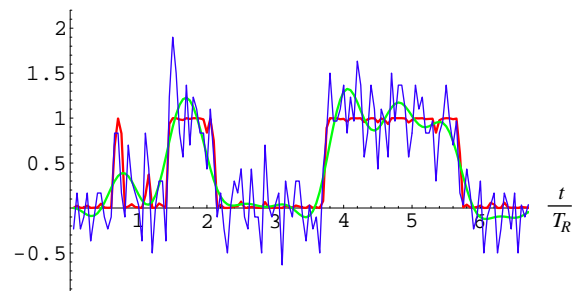
auch im Quantenbereich zum Erfolg führen.

Jürgen Audretsch

Literatur

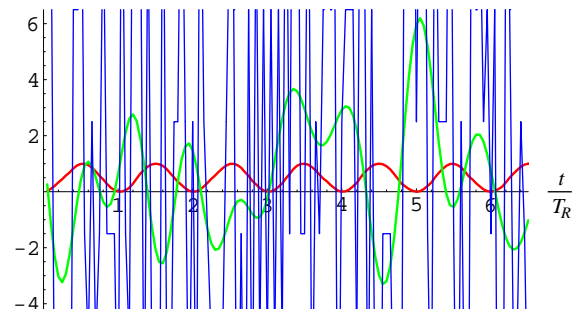
- [1] J. Audretsch (Hrsg.), *Verschränkte Welt- Faszination der Quanten*, Wiley-VCH, Weinheim 2002
- [2] J. Audretsch, T. Konrad, M. Mensky, *Gen. Relativity and Gravitation* **33**, 1165-1180, 2001
- [3] J. Audretsch, T. Konrad, A. Scherer, *Phys. Rev. A* **63**, 052102 (1-10), 2001
- [4] J. Audretsch, L. Diosi, T. Konrad, *Phys. Rev. A* **66**, 0223010 (1-11), 2002
- [5] J. Audretsch, T. Konrad, A. Scherer, *Phys. Rev. A* **65**, 033814 (1-6), 2002
- [6] M. Brune, S. Haroche, V. Lefevre, J.M. Raimond, N. Zagury, *Phys. Lett.* **65**, 976, 1990

Kasten 6: Zu scharfe Messung



Es besteht eine gute Übereinstimmung zwischen der Messkurve vor und nach der Reduktion des Rauschens (blau bzw. grün) einerseits und der tatsächlichen Zustandsentwicklung $|c_1(t)|^2$ (rot) andererseits. Allerdings sind die ungestörten Rabi-Oszillationen mit Schwingungsdauer T_R durch die Messung völlig angeändert worden. Das Atom macht hin und wie Sprünge von einem Zustand zum anderen.

Kasten 7: Zu unscharfe Messung



Die $|c_1(t)|^2$ -Kurve der Rabi-Oszillationen (rot) bleibt ungestört. Allerdings wird sie durch die Messkurve (blau) auch nach Reduktion des Rauschens (grün) nicht wiedergegeben. Es besteht keine Korrelation. Die Messkurve enthält keine Informationen über die Zustandsbewegung.